

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**

**Faculté du génie de la construction
Département de génie civil**

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème :

***Conception et dimensionnement
des chaussées souples***

Proposé et dirigé par :

Mme MEZIANI F.

Présenté par :

M^{elle} BENSAFIA LITICIA

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier le bon Dieu, le clément et le miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail.

Je remercie vivement mon encadreur Madame MEZIANI F., pour son suivi et ses précieux conseils, pour ses qualités scientifiques et humaines, pour la disponibilité dont elle a toujours fait preuve à mon égard, et pour m'avoir fait profiter de son expérience dans le domaine de la géotechnique.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Je n'oublie pas de remercier aussi l'ensemble du corps enseignant et administratif du département, et du laboratoire de recherche de Génie Civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Je remercie également mes collègues de promotion : Kamelia, Biba, Lydia et Aghiles, qui ont été présent depuis le début.

Je ne terminerai pas sans avoir remercié mes proches, qui m'ont donnés leur soutien et leur patience tout au long de la réalisation de ce travail.

DEDICACES

C'est avec l'expression de ma plus grande reconnaissance que je dédie cet ouvrage :

A la mémoire de mon défunt Grand Père « Si L'Mouloud » Paix à son âme ;

A mes irremplaçables Grands Parents ;

A mes chers Parents ;

A mes amours de Frères « Samy », « Amine » et « Akram » ;

A mes adorables Tantes et plus particulièrement mon ange gardien « Nawal » ;

A ma Sœur de cœur « Mélissa » ;

A mes meilleures Amis « Amel » et « Narimene » ;

A la promotion géotechnique 2019/2020 ;

A tous ceux qui m'aiment, et que j'aime.

Merci d'être toujours à mes côtés.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le fonctionnement des chaussées

Figure I.1. Bourbier	3
Figure I.2. Lit de pierres	4
Figure I.3. Chaussée romaine	4
Figure I.4. Macadam	5
Figure I.5. Formation d'une ornière sous l'effet d'une charge se déplaçant sur un sol	5
Figure I.6. Schéma de principe illustrant la déflexion d'un sol sous l'effet de passage d'une charge.	6
Figure I.7. Schéma de fonctionnement d'une chaussée constituée d'une couche non liée reposant sur le sol naturel	7
Figure I.8. Schéma de fonctionnement d'une chaussée constituée d'une couche traitée au ciment reposant sur le sol naturel	8

Chapitre II : Caractéristiques générales des chaussées

Figure II.1. Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de la chaussée d'un véhicule léger et d'un poids lourd	10
Figure II.2. Route Nationale	12
Figure II.3. Chemin Wilaya	12
Figure II.4. Profil en travers type d'une route	14
Figure II.5. Route à deux voies	15
Figure II.6. Route à une voie	16
Figure II.7. Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée	17
Figure II.8. Structure type d'une chaussée souple	20
Figure II.9. Structure type d'une chaussée semi-rigide	21
Figure II.10. Structure-type d'une chaussée à trafic $> 50 \text{ PL/j/sens}$	21
Figure II.11. Structure-type d'une chaussée à trafic $\leq 50 \text{ PL/j/sens}$	22

Chapitre IV : Caractéristiques géométriques des routes

Figure IV.1. Distance de visibilité en virage	48
Figure IV.2. Position de l'œil du conducteur et calcul théorique du dégagement latéral	49
Figure IV.3. Distance de visibilité en angle saillant	50
Figure IV.4. Caractéristiques géométriques des véhicules	51
Figure IV.5. Forces agissantes sur un véhicule	58
Figure IV.6. Inscription des véhicules dans les virages.	62
Figure IV.7. Trajectoire réelle du véhicule	64
Figure IV.8. Décalage du cercle	65
Figure IV.9. Courbe de raccordement Parabole cubique	66
Figure IV.10. Courbe de raccordement lemniscate	66
Figure IV.11. Courbe de raccordement clothoïde	67
Figure IV.12. Comparaison des 3 types courbe de raccordement	68
Figure IV.13. Courbure de la clothoïde	68
Figure IV.14. Raccordement d'un alignement à un rayon	71
Figure IV.15. Raccordement de deux alignements à un rayon	72
Figure IV.16. Raccordement de deux alignements par deux branches de clothoïde	73
Figure IV.17. Raccordement de deux arcs de sens contraire par un seul arc de clothoïde	73
Figure IV.18. Raccordement de deux rayons (l'un intérieur à l'autre) par une courbe en ovale.	74

Figure IV.19. Raccordement de deux rayons (l'un extérieur à l'autre) par une courbe en C	74
Figure IV.20.a. Représentation schématique de tracé en situation	75
Figure IV.20.b. Représentation schématique de variation de la courbure.	75
Figure IV.20.c. Représentation schématique de variation de la forme superficielle de la chaussée.	75
Figure IV.20.d. Représentation schématique de variation de l'accélération transversale pour la voie extérieure	76
Figure IV.21. Éléments géométriques du profil en long	77
Figure IV.22. Aménagement d'une voie lente	81
Figure IV.23. Aménagement d'une voie de dépassement	82
Figure IV.24. Visibilité en raccordement convexe	84
Figure IV.25. Visibilité en raccordement concave	84

Chapitre V : Étude géotechnique

Figure V.1. Classification des sols	87
Figure V.2. Tarière électrique	92
Figure V.3. Sondeuse	93
Figure V.4. Tamiseuse électrique.	96
Figure V.5. Définition de l'équivalent de sable.	97
Figure V.6. Appareil de Casagrande manuel.	98
Figure V.7. Matériel de l'essai au bleu de méthylène	99
Figure V.8. Appareillage Proctor et C.B.R	102
Figure V.9. Appareil pour essai Los Angeles	103
Figure V.10. Appareil pour essai Micro Deval	104
Figure V.11. Presse Marshall	105
Figure V.12. Presse Duriez	105

Chapitre VI : Conception des couches de chaussées

Figure VI.1. Analyseur de profil en long	109
Figure VI.2. Transversoprofilomètre à ultrasons	109
Figure VI.3. La pendule SRT	110
Figure VI.4. L'appareil SCRIM	110
Figure VI.5. Textures de revêtements	113
Figure VI.6. Terminologie	114
Figure VI.7. Chargement du crible et éjection des éléments grossiers par basculement de la grille	119
Figure VI.8. Epandeur	120
Figure VI.9. Malaxeur à arbre horizontal	120
Figure VI.10. Réglage des plates-formes de couches de forme en sols traités par rabotage	121
Figure VI.11. Épandage des gravillons de cloutage.	122
Figure VI.12. Répandage de l'émulsion	122

Chapitre VII : Méthodes de dimensionnement des structures de chaussées

Figure VII.1. Abaque donnant l'épaisseur de la chaussée en fonction du CBR et de la charge p	136
Figure VII.2. Organigramme de la démarche du catalogue.	139
Figure VII.3. Épaisseur minimum requise	142

Figure VII.4. Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq	143
Figure VII.5. Schéma du modèle de Westergaard.	144
Figure VII.6. Modèle Bicouche de Hogg (1938)	146
Figure VII.7. Schéma du modèle de Burmister 1943	146
Figure VII.8. Epaisseur de la couche de surface en matériau bitumineux (pour les chaussées à faible trafic, à assise granulaire)	151

Liste des tableaux

Chapitre II : Caractéristiques générales des chaussées

Tableau II.1. Catégories de routes	13
------------------------------------	----

Chapitre III : Critères de choix des structures de chaussées

Tableau III.1. Durées de vie adaptées	25
Tableau III.2. Risques adoptés pour le réseau RP1	26
Tableau III.3. Risques adoptés pour le réseau RP2	26
Tableau III.4. Classes de portance des sols S_i	27
Tableau III.5. Classes de portance à long terme du sol support	27
Tableau III.6. Zones climatiques de pluviométrie	28
Tableau III.7. Choix des températures équivalentes	29
Tableau III.8. Classification des environnements	29
Tableau III.9. Valeurs du facteur de cumul C	31
Tableau III.10. Valeurs du coefficient d'agressivité A	31
Tableau III.11. Coefficient d'équivalence p.	32
Tableau III.12. Valeur de K_1	33
Tableau III.13. Valeurs de K_2	33
Tableau III.14. Limites de capacité.	33
Tableau III.15. Risque de calcul retenu à 20%	38

Chapitre IV : Caractéristiques géométriques des routes

Tableau IV.1. La visibilité en fonction de la hauteur visée	51
Tableau IV.2. Caractéristiques géométriques des véhicules	52
Tableau IV.3. Valeurs des coefficients f_t et f_l (B40)	52
Tableau IV.4. valeurs de l'accélération – décélération (B40)	53
Tableau IV.5. valeurs du dévers (B40).	53
Tableau IV.6. Gamme de vitesses de base pratiquées dans certains pays	56
Tableau IV.7. Valeurs des vitesses de base (B 40).	57
Tableau IV.8. Valeurs du dévers.	59
Tableau IV.9. Rayons en plan et dévers associés.	61
Tableau IV.10. Valeur de la déclivité maximale (B40)	78

Chapitre V : Étude géotechnique

Tableau V.1. Classification des matériaux	90
Tableau V.2. Valeurs de vitesses d'ondes P en fonction de la nature du sol	93
Tableau V.3. Caractéristiques des essais Proctor.	99
Tableau V.4. Description des méthodes des essais Proctor	100

Chapitre VI : Conception des couches de chaussées

Tableau VI.1. Classes de portance à long termes au niveau de l'arase de la partie supérieure des terrassements (PST)	116
Tableau VI.2. Tableau des cas de partie supérieure des terrassements (PST)	117
Tableau VI.3. Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme.	123
Tableau VI.4. Tableau définissant les classes de plate-forme PFi	124

Tableau VI.5. La classe de plate-forme PFi visée en fonction de la portance du sol Ps et de l'arase de terrassement ARj	124
Tableau VI.6. Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée.	126
Tableau VI.7. Tableau des conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en sol fin traité en place	127
Tableau VI.8. Tableau des conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques	128
Tableau VI.9. Epaisseur de couche de forme constituée en grave naturelle GN	129
Tableau VI.10. Epaisseur de couche de forme constituée de divers matériaux naturels pour une classe de PF2	129
Tableau VI.11. Epaisseur de couche de forme constituée de divers matériaux naturels pour une classe de PF3	130

Chapitre VII : Méthodes de dimensionnement des structures de chaussées

Tableau VII.1. Coefficients d'équivalence des matériaux constituant un corps de chaussée.	137
Tableau VII.2. Classe des trafics (règlement Algérien B60-B61).	138
Tableau VII.3. Classes de sol support	138
Tableau VII.4. Les résultats de différentes épaisseurs de la couche de forme.	141
Tableau VII.5. Avantages et inconvénients des deux méthodes	149

Sommaire

Introduction générale	1
 Chapitre I : Généralités sur le fonctionnement des chaussées	
I.1. Introduction	3
I.2. Evolution de la structure d'une chaussée	3
I.3. Déplacement d'un véhicule sur le sol	5
I.4. Interposition d'une couche granulaire non liée entre le sol et la roue	6
I.5. Interposition d'une couche granulaire traitée au ciment entre le sol et la roue	8
I.6. Interposition d'une dalle en béton de ciment entre le sol et la roue	9
I.7. Interposition d'une couche granulaire traitée au bitume entre le sol et la roue	9
I.8. Conclusion	9
 Chapitre II : Caractéristiques générales des chaussées	
II.1. Introduction	10
II.2. Le trafic	10
II.2.1. Définition	10
II.2.2. Détermination du type de réseau	11
II.2.2.1. Hiérarchisation du réseau routier national	11
II.2.2.2. Choix du niveau de réseau principal	11
II.2.3. Détermination des classes de trafic	12
II.2.3.1. Définition du poids lourd	12
II.2.3.2. Répartition transversale du trafic	13
II.2.3.3. Détermination de la classe de trafic (TPL _i)	13
II.3. Catégories fonctionnelles de la route	13
II.4. Les caractéristiques géométriques	14
II.4.1. Profil en travers	14
II.4.2. Profil en long	15
II.4.3. Tracé en plan	15
II.4.4. Routes à deux voies de circulation	15
II.4.5. Routes à une voie de circulation	15
II.5. Constitution des chaussées : les différentes couches	16
II.5.1. Formation des chaussées	16
II.5.2. La couche de surface	17
II.5.3. La couche de forme	17
II.5.4. Les sous-couches	18
II.6. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées	18
II.6.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée	18
II.6.2. Les matériaux à éléments fins	19
II.6.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron	19
II.6.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques	19
II.7. Les différentes structures de chaussées	20
II.7.1. Les chaussées souples	20
II.7.2. Les chaussées semi-rigides	20
II.7.3. Les chaussées rigides	21
II.8. Conclusion	22

Chapitre III : Critères de choix des structures de chaussées

III.1. Introduction	23
III.2. Choix d'une structure de chaussée	23
III.2.1. Durée de vie	24
III.2.2. Risque de calcul	25
III.2.3. Sol support	26
III.2.3.1. Détermination de la classe de portance de sol-support de chaussée	26
III.2.3.2. Portance des sols terrassés	26
III.2.3.3. Présentation des classes de portance des sols	27
III.2.3.4. Classes de sols supports par niveau de réseau principal (R _{Pi})	27
III.2.3.5. Calcul des déformations admissibles sur le sol support ($\xi_{z.da}$)	27
III.2.4. Climat et Environnement	28
III.2.5. Trafic	30
III.2.6. Classement géotechnique des sols naturels	34
III.2.7. Matériaux de chaussée	34
III.2.8. Type d'hiver et Indice de gel	34
III.2.9. Cout global	35
III.3. Les choix de stratégie d'investissement et d'entretien	35
III.3.1. Choix d'une durée de référence pour la comparaison des stratégies	36
III.3.2. Les différentes stratégies investissement-entretien en relation avec le choix du niveau de service	36
III.3.3. Éléments économiques pour le choix de la stratégie	39
III.3.4. Implication sur le choix techniques de chaussée	40
III.4. Étude technico-économique d'optimisation pour les choix de dimensionnement	41
III.4.1. Étude d'une possibilité d'intégration de la couche de forme dans la structure de chaussée	41
III.4.2. Choix des techniques de chaussée	42
III.4.3. Prise en compte de la qualité obtenue sur chantier et des dispositions constructives dans le dimensionnement	43
III.5. Conclusion	43

Chapitre IV : Caractéristiques géométriques des routes

IV.1. Introduction	44
IV.2. Paramètres fondamentaux des projets routiers	44
IV.2.1. La visibilité	44
IV.2.1.1. Estimation des vitesses pratiquées	45
IV.2.1.2. Exigences en matière de visibilité	47
IV.2.1.3. Distances de visibilité offerte par le tracé	48
IV.2.2. Caractéristiques géométriques des véhicules	51
IV.2.3. Dynamique des véhicules	52
IV.2.3.1. Coefficients de frottement longitudinal f_l et transversal f_t	52
IV.2.3.2. Accélérations et décélérations longitudinales	53
IV.2.4. Dévers de la chaussée	53
IV.2.5. Débit de pointe horaire	53

IV.2.6. Vitesse de référence	54
IV.2.6.1. Notion de vitesse	54
IV.2.6.2 choix des vitesses de projet	56
IV.3. Tracé en plan	57
IV.3.1. Alignements	57
IV.3.2. Arcs de cercle	58
IV.3.2.1. Stabilité en courbe	58
IV.3.2.2. Sur largeur	62
IV.3.3. Courbes de raccordement	63
IV.3.3.1. Rôle et nécessité des courbes de raccordement	63
IV.3.3.2. Types de courbes de raccordement	65
IV.3.3.3. Clothoïde	68
IV.3.3.4. Choix de la clothoïde- clothoïde minimum	69
IV.3.4. Représentation schématique	75
IV.4. Profil en long	76
IV.4.1. Déclivités	77
IV.4.2. Voie supplémentaire pour un véhicule lent	80
IV.4.2.1. Trafic dans les rampes	80
IV.4.2.2. Longueur limite des rampes	80
IV.4.2.3. Voie lente	81
IV.4.2.4. Voie de dépassement	82
IV.4.3. Raccordements verticaux	82
IV.4.3.1. Raccordements convexes	83
IV.4.3.1.1. Condition de confort	83
IV.4.3.1.2. Condition de visibilité	83
IV.4.3.2. Raccordements concaves	84
IV.5 Conclusion	85

Chapitre V : Étude géotechnique

V.1. Introduction	86
V.2. Objectifs d'une étude géotechnique	86
V.3. Caractérisation du sol en place	86
V.3.1. Nécessité d'une classification spécifique	86
V.3.2. Classification des sols	87
V.3.2.1. Paramètres retenus pour la classification des sols	88
V.3.3. Classification des matériaux rocheux	89
V.3.4. Classification des sols organiques et sous-produits industriels	90
V.3.5. Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	91
V.4. Moyens de reconnaissance	91
V.4.1. Étude des archives et documents existants	92
V.4.2. Visites sur le site et les essais in-situ	92
V.4.2.1. Reconnaissance in-situ	92
V.4.2.1.1. Le forages	92
V.4.2.1.2. Les méthodes géophysiques	93
V.4.2.2. Les essais in-situ	94
V.4.2.2.1. L'essai de plaque	94

Chapitre VI : Conception des couches de chaussées

VI.1. Introduction	108
VI.2. Conception des couches de chaussées souples	108
VI.2.1. Couche de surface	108
VI.2.1.1. Fonctions et objectifs à considérer pour la couche de surface	108
VI.2.1.2. Choix du type de couche de surface	112
VI.2.1.3. Sélection des performances des matériaux	113
VI.2.2. Plate-forme support de la chaussée	114
VI.2.2.1. Fonctions et critères de classement des plates - formes	114
VI.2.2.2. Identification des matériaux et conditions d'emploi	115
VI.2.2.3. Environnement hydrique	115
VI.2.2.4. Classe de portance de l'arase de terrassement	116
VI.2.3. Couche de forme	117
VI.2.3.1. Techniques de préparation et de protection des matériaux	118
VI.2.3.2. Portance à long terme de la plate-forme	124
VI.2.3.3. Règles de surclassement de portance des plates-formes	124
VI.2.3.4. Couches de forme en matériau non traité	125
VI.2.3.5. Couches de forme en sols argileux et limoneux traités en place	126
VI.2.3.6. Couches de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques	127
VI.2.4. Corps de chaussée	130
VI.2.4.1. Le choix du corps de chaussée	130
VI.2.4.2. La règle des équivalences	131
VI.2.4.3. Les structures de corps de chaussée	131
VI.3. Conclusion	133

Chapitre VII : Méthodes de dimensionnement des structures de chaussées	
VII.1. Introduction	134
VII.2. Caractéristiques mécaniques des sols en vue du dimensionnement des chaussées	134
VII.2.1. Calcul des sollicitations dans la chaussée sous l'essieu de référence	134
VII.2.2. Déformations permanentes du support de chaussée	135
VII.3. Méthodes de dimensionnement des couches d'assise	135
VII.3.1. Méthodes empiriques	135
VII.3.1.1. Méthode C.B.R	135
VII.3.1.2. Méthode tenant compte du trafic (CBR amélioré)	136
VII.3.1.3. Méthode du catalogue des structures SETRA	138
VII.3.1.4. Méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et chaussées)	139
VII.3.1.5. Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTTTP	139
VII.3.1.6. Méthode (Américaine) A.A.S.H.O	141
VII.3.1.7. Méthode de l'Asphalte Institute	141
VII.3.2. L'approche théorique	142
VII.3.2.1. Modèle de Boussinesq (1885)	143
VII.3.2.2. Modèle de Westergaard (1925)	144
VII.3.2.3. Modèle bicouche de Hogg (1938)	145
VII.3.2.4. Modèle de Burmister (1943)	146
VII.3.2.5. Modèle d'Odemark (1949)	147
VII.3.2.6. Modèle monocouche de Pasternak (1954)	147
VII.3.2.7. Modèle de Jeuffroy-Bachelez (1955)	148
VII.3.2.8. Modèle monocouche de Kerr (1964)	148
VII.3.2.9. Modèle aux éléments finis	148
VII.4. Avantages et Inconvénients des méthodes de dimensionnement	149
VII.5. Epaisseur de la couche de surface	149
VII.6. Conclusion	151
 Conclusion générale	 152
 Références bibliographiques	 153
 Normes techniques	 156
 Annexe	

Introduction générale

Les voies de communication en général et les infrastructures routières en particulier sont un facteur important et incontournable pour le développement économique, culturel et social d'un pays ou d'un continent. Si dans les années 1950 les voies de communication étaient essentiellement constituées de quelques routes en terre, aujourd'hui le linéaire a considérablement augmenté. Les routes bitumées ont fait leur apparition. Les techniques et les méthodes d'exécution ont évolué avec la technologie routière.

Les chaussées peuvent être définies comme étant la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules, elles se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée.

Une chaussée est essentiellement destinée à supporter les actions mécaniques des véhicules et à les reporter sur le terrain de fondation sous-jacent, sans que se produisent des déformations permanentes, ni dans ce terrain, ni dans la chaussée elle-même.

La croissance socio-économique impose la préservation et la rénovation des moyens de communication notamment dans le domaine de la géotechnique routière. Par souci de maintenir en phase motorisation et infrastructure de transport, et répondre aux exigences de confort et sécurité de celui-ci, un véritable programme de modernisation et d'élargissement du réseau routier est reconnu impératif. C'est par conséquent, un élément fondamental dans le processus de développement des activités économiques du pays.

Dans le cadre de la civilisation et la modernité, l'homme se trouve lui-même obligé de construire des ouvrages dans les endroits caractérisés par différents sols. Le développement social et l'explosion démographique imposent d'habiter et urbaniser des sites de plus en plus lointains, et des terrains de plus en plus médiocres.

L'homme est, ainsi, appelé à appliquer les connaissances théoriques acquises et se met face aux problèmes réels existants dans les terrains concernant l'étude et la réalisation des projets routiers. Cette situation l'a conduit à trouver des solutions alternatives ayant trait à la conception de chaussée : types de routes à considérer, récolte des données, choix de la méthode de dimensionnement, faisabilité des essais, analyse des résultats, ...

Par ailleurs, un dimensionnement adéquat d'une structure de chaussée ou, en d'autres termes, la détermination optimale des épaisseurs des couches constitutives du corps de chaussée passe inévitablement par une bonne connaissance des caractéristiques réelles des plates-formes de sols-supports et notamment du comportement mécanique des matériaux utilisés dans les assises de fondation.

L'objectif de ce travail est de présenter les techniques de conception des chaussées souples ainsi que les différentes méthodes de dimensionnement des épaisseurs des couches en prenant en considération plusieurs paramètres.

Le plan d'étude adopté, en vue de répondre à cet objectif, repose principalement sur une succession d'informations répertorié en sept chapitres.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur le fonctionnement des chaussées : le comportement des différentes couches de chaussées sous l'effet des sollicitations mécaniques ainsi que les spécifications requises pour les matériaux routiers.

Le second chapitre explicite les caractéristiques générales des chaussées : leurs constitutions, leurs structures, leurs catégories fonctionnelles, le trafic et ses classes, etc.

Dans le troisième chapitre sont déterminés les critères de choix des structures de chaussées. Ce choix dépend de plusieurs paramètres (durée de vie, risque de calcul, sol support, trafic, etc.). Un choix de stratégie d'investissement et d'entretien et une étude technico-économique d'optimisation pour le choix de dimensionnement sont requis pour une bonne conception ; les détails ont été développés dans le même chapitre.

Un quatrième chapitre intitulé caractéristiques géométriques des routes, est présenté. Il propose les paramètres fondamentaux des projets routiers tels que : la visibilité, les caractéristiques géométriques et la dynamique des véhicules. Il présente aussi le tracé en plan et le profil en long des chaussées.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude géotechnique. On y retrouve la classification des sols, les essais in situ et les essais au laboratoire à réaliser. On parle aussi des conditions d'utilisation des sols en remblais.

Le chapitre six est réservé à la conception des différentes couches de chaussées ; allant de la plate-forme support passant par la couche de forme, le corps de chaussée ainsi que la couche de surface.

Dans le dernier chapitre sont explicités les différentes méthodes de dimensionnement. Les deux approches ont été développées : l'approche empirique et l'approche théorique.

Enfin, on termine cette étude bibliographique par une conclusion générale, où on a synthétisé les critères les plus pertinents dans la conception et le dimensionnement des chaussées souples.

Chapitre I

Généralités sur le fonctionnement des chaussées

I.1. Introduction.....	3
I.2. Evolution de la structure d'une chaussée	3
I.3. Déplacement d'un véhicule sur le sol	5
I.4. Interposition d'une couche granulaire non liée entre le sol et la roue.....	6
I.5. Interposition d'une couche granulaire traitée au ciment entre le sol et la roue	8
I.6. Interposition d'une dalle en béton de ciment entre le sol et la roue.....	9
I.7. Interposition d'une couche granulaire traitée au bitume entre le sol et la roue	9
I.8. Conclusion.....	9

I.1. Introduction

L'apparition de l'automobile a marqué un tournant décisif dans l'histoire de la route et si l'on a pu, au début, se contenter des méthodes anciennes de construction des chaussées, l'utilisation rapidement croissante de ce moyen de transport a très vite nécessité une infrastructure offrant des garanties de plus grand confort, de rapidité et de sécurité.

Il est utile de rappeler le fonctionnement d'une chaussée sur le plan général. Ceci permet de souligner les règles fondamentales pour la concevoir et la dimensionner, mais aussi les spécifications requises pour les matériaux routiers.

Dans ce chapitre, est présentée l'influence de la nature des différents matériaux utilisés dans la construction des différentes couches, sur la durabilité et le comportement global de la chaussée.

I.2. Evolution de la structure d'une chaussée

De tout temps, on a eu besoin de circuler. Mais, les « routes » ne furent guère que des pistes plus ou moins sommaires permettant de joindre des villes, villages ou hameaux, sans empiéter sur les prairies ou terres cultivées. La route ne différait alors pas tellement des surfaces qui la bordaient [20].

Il est vrais qu'on circulait aisément sur des pistes bien nivelées quand les conditions climatiques étaient favorables, mais en période de pluie, les sols mouillés devenaient glissants ou se transformaient en bourbiers. On entreprit alors d'étaler, aux endroits les plus mauvais, des lits de pierres dont le mérite était d'être moins sensible à l'eau [3].



Figure I.1. Bourbier



Figure I.2. Lit de pierres

L'idée du matelas de pierres a duré de nombreux siècles. Elle s'est développée à l'époque des Romains pour donner naissance à la « chaussée romaine » : le dallage. Plus tard, la route empierrée « macadam » a fait son apparition et avec elle, les premières spécifications pour l'exécution d'une bonne route.



Figure I.3. Chaussée romaine

Avec le développement des engins lourds au début du XX^e siècle, les premiers problèmes ont surgi : l'apparition de nids de poule, le poinçonnement du hérisson et l'effondrement de la chaussée aux premières pluies.



Figure I.4. Macadam

La structure de la chaussée était donc mal adaptée. Une mutation s'imposait pour aboutir à une route moderne. Elle a été initiée par l'emploi des matériaux à granulométrie continue et de calibre déterminé et puis avec l'émergence des matériaux traités au ciment [18].

I.3. Déplacement d'un véhicule sur le sol

Le poids du véhicule est transmis au sol, sous forme de pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques.

D'une manière générale, les sols ne peuvent supporter sans dommage de telles pressions. Si le sol n'est pas assez porteur, le pneu comprime le sol et il se forme une ornière (Figure I.5).

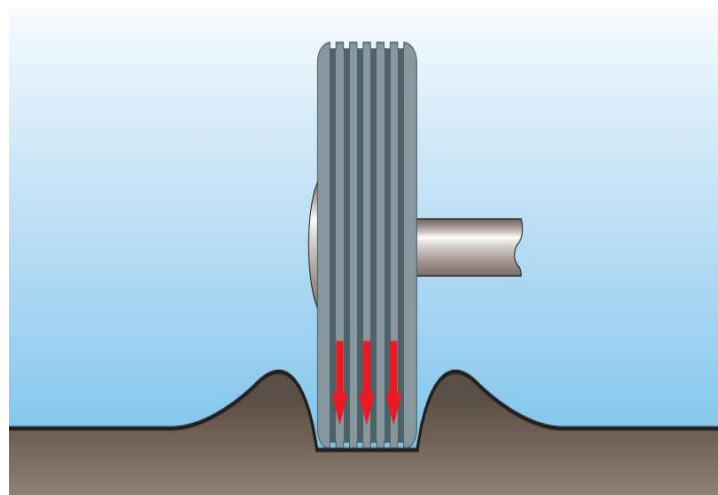


Figure I.5. Formation d'une ornière sous l'effet d'une charge se déplaçant sur un sol

Si le sol est porteur, il se passe deux choses imperceptibles mais qu'il faut bien comprendre (Figure I.6) :

- le sol s'affaisse sous le pneu. C'est la déformation totale : W_t
- lorsque la roue s'éloigne, le sol remonte mais pas totalement : il reste une déformation résiduelle : W_r

L'orniérage est la déformation résiduelle « W_r » qui s'accroît au fur et à mesure des passages des véhicules et proportionnellement à leur charges [21].

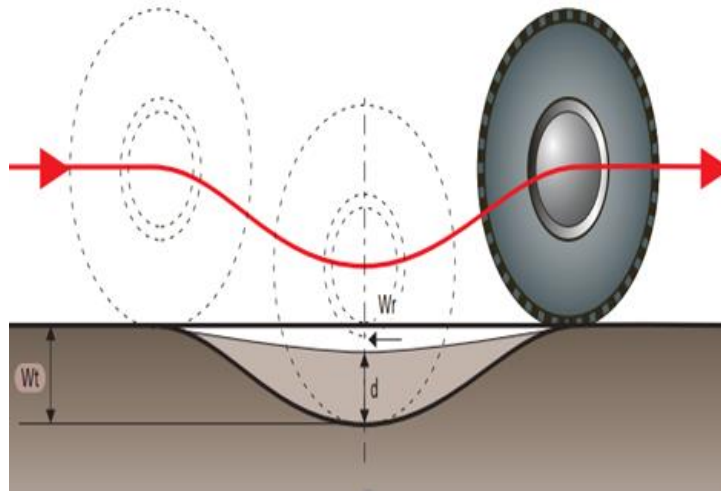


Figure I.6. Schéma de principe illustrant la déflexion d'un sol sous l'effet de passage d'une charge.

La déflexion « d » ($d = W_t - W_r$) est proportionnelle à la charge appliquée. Elle est pratiquement constante si l'on répète l'application de cette charge des milliers de fois [5].

I.4. Interposition d'une couche granulaire non liée entre le sol et la roue

Dans une couche granulaire non liée, les grains constitutifs restent indépendants les uns des autres. Ce sont donc des matériaux à module faible compris entre 100 et 500 MPa. Par conséquent, sous l'action d'une charge, cette couche travaille principalement en compression, c'est-à-dire qu'elle transmet au sol sous-jacent la totalité de la charge en la répartissant d'une façon non uniforme. La pression la plus importante se situe en dessous de la charge [18].

Pour schématiser le phénomène, imaginons un empilement de pierres identiques (Figure I.7), ou même de billes [5].

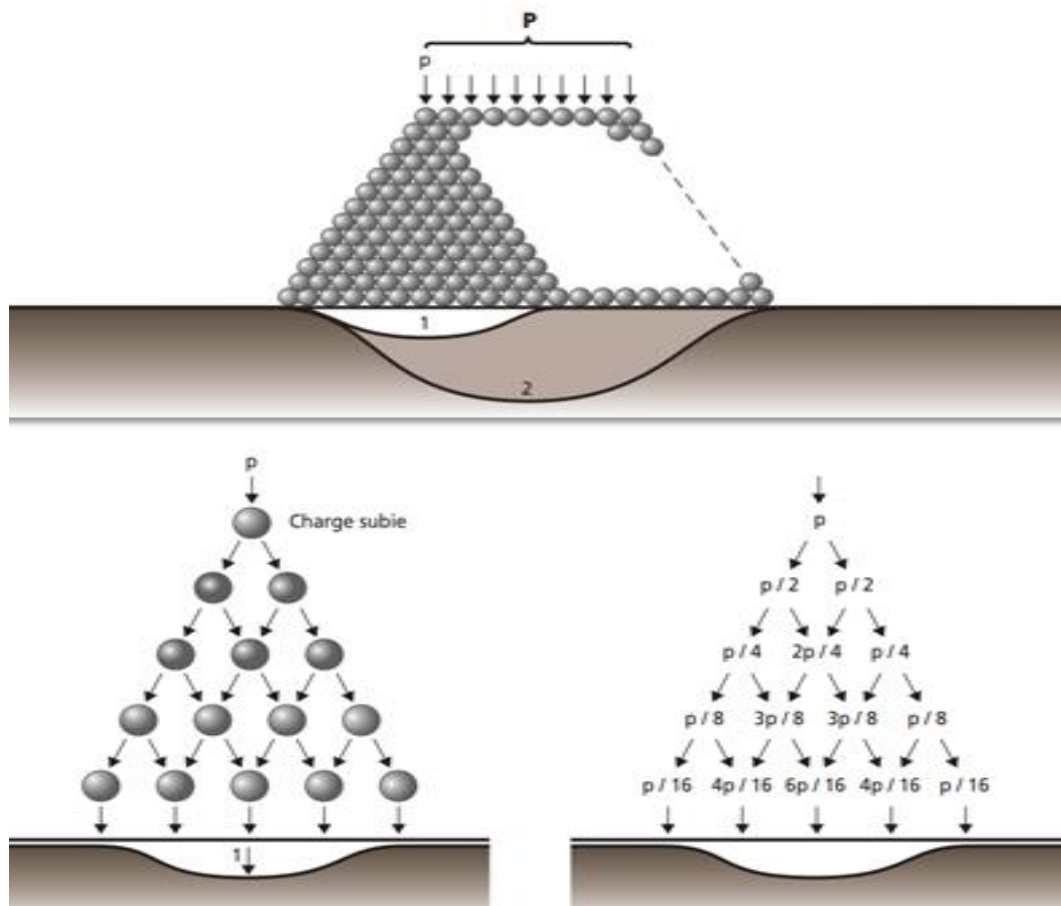


Figure I.7. Schéma de fonctionnement d'une chaussée constituée d'une couche non liée reposant sur le sol naturel

Considérons une charge p sur une bille. Celle-ci va transmettre $p/2$ à chacune des deux billes de la couche sous-jacente. Sur les trois billes de la troisième rangée, il y aura successivement : $p/4$, $2p/4$, $p/4$. Sur les quatre billes de la quatrième rangée, il y aura : $p/8$, $3p/8$, $3p/8$, $p/8$ et ainsi de suite [5].

On voit qu'à la n ième rangée, il y a une répartition en cloche qui correspond à un étalement de la charge p (Figure I.7).

Mais, à l'interface de la couche granulaire-sol, on peut constater que la somme des charges réparties est égale à la charge p [5].

Sous l'action d'une charge, une couche granulaire non liée travaille principalement en compression. La pression la plus élevée se situe à la verticale de la charge.

Sous l'effet de passages répétés de charges, la couche granulaire se comporte comme un sol :

- elle a une déflexion ;
- elle a donc une déformation résiduelle qui augmente en fonction des passages répétés des charges et finit par provoquer de l'orniérage.

I.5. Interposition d'une couche granulaire traitée au ciment entre le sol et la roue

Considérons une couche granulaire traitée au ciment, donc liée, et reposant sur le sol. Si on applique une charge P à cette couche, la transmission de la charge au sol ne se fait pas de la même façon que dans le cas d'une couche granulaire non liée [5].

L'existence des liaisons entre les grains et leur multiplicité modifie la transmission de la charge. La couche liée forme ainsi une dalle qui peut être très rigide, dont le module est constant et indépendant de la température et de la durée d'application de la charge. L'effet de répartition de la charge sur le sol support est alors très important. Les contraintes de compression qui sont transmises au sol sont, dans ce cas, relativement faibles [29].

Mais, l'amortissement très élevé des contraintes verticales dues aux charges est compensé par l'apparition, au sein de la couche traitée, de contraintes de compression et surtout de traction à la partie inférieure (Figure I.8).

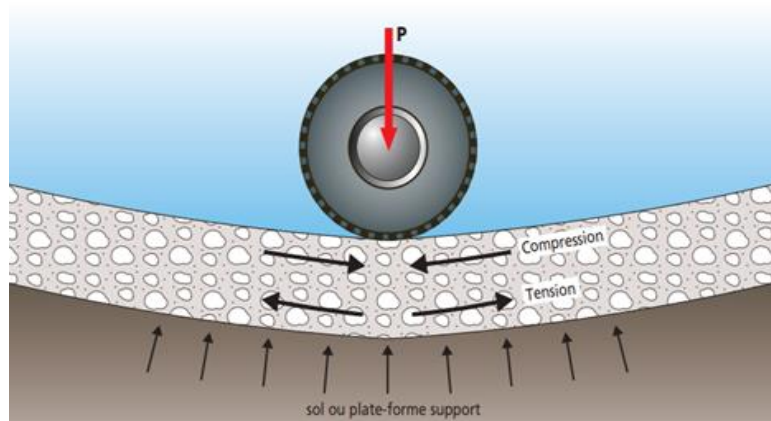


Figure I.8. Schéma de fonctionnement d'une chaussée constituée d'une couche traitée au ciment reposant sur le sol naturel

Sous l'action d'une charge, une couche traitée au ciment, donc liée, induit les phénomènes suivants :

- répartition uniforme de la charge sur le sol support. Donc, contraintes de compression sur le sol relativement faibles ;
- apparition de deux types de contrainte au sein de la couche liée :
 - une contrainte de compression dont la valeur est très inférieure à la résistance en compression du matériau ;
 - une contrainte de traction par flexion, dont la valeur peut être élevée, qui se manifeste à la base de la couche traitée.

À chaque passage de la charge, la couche traitée travaille à la traction par flexion au niveau de la fibre inférieure ; si on répète l'opération un grand nombre de fois, cette couche se

fatigue et finit par se fissurer même si les efforts engendrés ne dépassent pas, à chaque fois, la contrainte admissible du matériau. C'est ce qu'on appelle la fatigue sous efforts répétés [29].

Il convient donc :

- de déterminer la contrainte à la traction de la couche traitée et s'assurer qu'elle est inférieure à la contrainte de traction admissible du matériau ;
- d'apprécier le comportement à la fatigue de la couche traitée.

I.6. Interposition d'une dalle en béton de ciment entre le sol et la roue

Une dalle en béton se différencie en particulier d'une couche traitée par sa forte teneur en ciment. Son comportement, sous l'action d'une charge P , est comparable à celui d'une couche granulaire traitée au ciment mais dont les caractéristiques mécaniques seraient beaucoup plus élevées [5]. Ceci consiste à :

- déterminer la contrainte du béton à la traction par flexion et s'assurer qu'elle est inférieure à la contrainte de traction admissible du béton ;
- apprécier le comportement à la fatigue de la dalle.

I.7. Interposition d'une couche granulaire traitée au bitume entre le sol et la roue

Une couche granulaire traitée au bitume présente l'inconvénient d'avoir un module variable en fonction de la température et de la durée d'application de la charge.

Alors qu'une couche traitée au ciment évolue comme une dalle en béton, une couche granulaire traitée au bitume présente, préalablement à la fissuration par fatigue, du fluage conduisant à des ornières provoquées par le passage répété des charges ; son comportement dépend beaucoup du climat et de la déformabilité des couches inférieures [29].

I.8. Conclusion

Ce que nous avons analysé dans les paragraphes précédents, a permis de souligner la nécessité d'interposer, entre le véhicule et le sol, un écran qui aura pour but de répartir les charges sur une plus grande surface et de réduire ainsi les pressions transmises au sol jusqu'à une valeur admissible. La chaussée constitue cet écran.

La diffusion des pressions diffère par sa nature et son intensité selon que l'on ait affaire à une couche granulaire non traitée, à une couche granulaire traitée (au ciment ou au bitume) ou à une dalle en béton de ciment. Toutefois, cette diffusion n'est obtenue qu'avec une épaisseur convenable de matériaux adéquats. Ces matériaux constituent la structure de la chaussée.

Pour une meilleure compréhension du mode de fonctionnement des chaussées. Les caractéristiques générales des chaussées sont présentées dans la chapitre II, suivant.

Chapitre II

Caractéristiques générales des chaussées

II.1. Introduction.....	10
II.2. Le trafic.....	10
II.2.1. Définition	10
II.2.2.Détermination du type de réseau	11
II.2.2.1. Hiérarchisation du réseau routier national.....	11
II.2.2.2. Choix du niveau de réseau principal.....	11
II.2.3. Détermination des classes de trafic.....	12
II.2.3.1. Définition du poids lourd	12
II.2.3.2. Répartition transversale du trafic.....	13
II.2.3.3. Détermination de la classe de trafic (TPL _i).....	13
II.3. Catégorie fonctionnelles de la route	13
II.4. Les caractéristiques géométriques.....	14
II.4.1. Profil en travers	14
II.4.2. Profil en long.....	15
II.4.3. Tracé en plan.....	15
II.4.4. Routes à deux voies de circulation	15
II.4.5. Routes à une voie de circulation.....	15
II.5. Constitution des chaussées : les différentes couches.....	16
II.5.1. Formation des chaussées.....	16
II.5.2. La couche de surface	17
II.5.3. La couche de forme	17
II.5.4. Les sous-couches.....	18

II.6. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées.....	18
II.6.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée	18
II.6.2. Les matériaux à éléments fins	19
II.6.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron	19
II.6.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques.....	19
II.7. Les différentes structures de chaussées	20
II.7.1. Les chaussées souples.....	20
II.7.2. Les chaussées semi-rigides	20
II.7.3. Les chaussées rigides	21
II.8. Conclusion	22

II.1. Introduction

Toute surface spécialement aménagée, sur le sol ou sur un ouvrage, pour le stationnement ou la circulation des personnes et des véhicules est appelée chaussée. L'objectif premier des chaussées est d'assurer une viabilité permanente, c'est-à-dire en tout temps.

C'est pour cela que l'étude de trafic est un élément essentiel qui doit être préalable à tout projet de réalisation d'infrastructures routières. Elle permet de déterminer le type d'aménagement qui convient ; et les caractéristiques à lui donner : du nombre de voies à l'épaisseur des différentes couches de matériaux qui constituent la chaussée. Il paraît utile de faire la distinction entre les différentes natures des structures de chaussée. Ceci contribue à les classer d'un point de vue constructif, en catégorie.

II.2. Le trafic

II.2.1. Définition

Le trafic constitue un élément essentiel du dimensionnement des chaussées. Il correspond à un nombre de passages de véhicules sur une période déterminée. Le poids des véhicules est transmis à la chaussée, sous forme de pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques. Pour une automobile, cette pression est de l'ordre de 0,1 MPa (soit 1 Kg/cm²). Mais, elle est de l'ordre de 0,7 MPa sous une roue de camion (Figure II.1) [8].

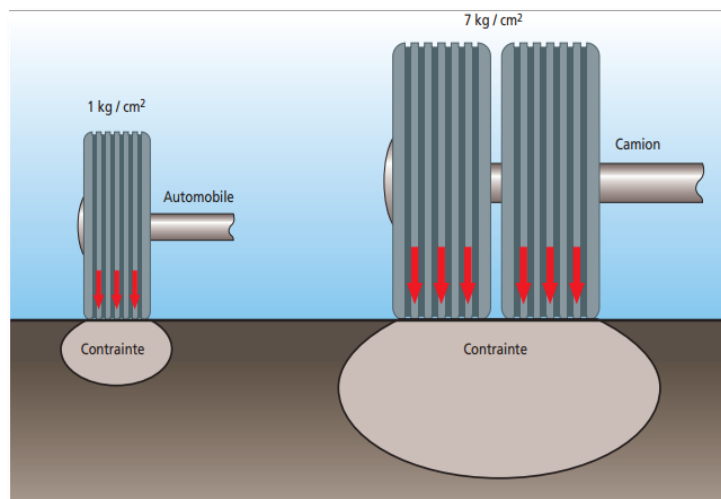


Figure II.1. Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de la chaussée d'un véhicule léger et d'un poids lourd

Les matériaux situés sous les roues subissent des efforts très différents lorsque passe une voiture ou lorsque passe un camion. Seul ce dernier est pris en compte pour déterminer les classes de trafic.

La méthode de dimensionnement ne prend en compte que les poids lourds définis dans la norme NF P 98-082 dont le poids total autorisé en charge (PTAC) est supérieur ou égal à 35kN (3,5 tonnes).

II.2.2.Détermination du type de réseau

II.2.2.1. Hiérarchisation du réseau routier national

Le dimensionnement des structures de chaussée fait appel au choix de la politique de gestion du réseau routier. Cette politique est définie par le maître de l'ouvrage en fonction de la hiérarchisation de son réseau routier. Concrètement, ceci se traduit par un classement en type de réseaux routiers regroupant des routes de mêmes catégories du point de vue trafic et considérations socio-économiques [7].

Le réseau routier Algérien est l'un des plus importants du Maghreb et d'Afrique, d'une longueur de 108 302 km ; qui est en plein développement grâce au programme de modernisation des transports routier et ferroviaire. Les services du Ministère des Travaux Publics ont abouti la décomposition de ce réseau comme suit :

- **le réseau principal noté RP** : Il se compose des routes reliant : les Chefs-lieux de wilayat ; les ports, les aéroports et les postes frontaliers ; les principales agglomérations et importantes zones industrielles. Ce réseau principal se décompose en deux niveaux :
 - le réseau principal de niveau 1 (RP1) ;
 - le réseau principal de niveau 2 (RP2).

Le linéaire total du réseau principal (RP) est de l'ordre de 76 028 Km.

- **le réseau secondaire noté RS** : Il se compose du reste des routes qui ne sont pas classées en RP, son linéaire total est de l'ordre de 32 274 Km.

II.2.2.2. Choix du niveau de réseau principal

On différencie, vis-à-vis du dimensionnement, deux catégories de réseaux de chaussées, l'une est relative au réseau principal de niveau 1 et l'autre au réseau principal de niveau 2. Le projeteur, après avoir déterminé la catégorie du niveau de réseau principal (en fonction de données telles que le trafic et l'intérêt socio-économique de la route à construire), se rapportera aux fiches structures correspondantes.[7] . On aura donc à faire le choix entre deux niveaux de réseaux principaux, à savoir :

- **réseau principal de niveau 1 (RP1)** : qui comporte des :
 - liaisons supportant un trafic supérieur à 1500 véhicules /jour ;

- liaisons reliant deux chef-lieu de wilaya ;
- liaisons présentant un intérêt économique et /ou stratégique.

Il s'agit essentiellement d'un réseau composé de routes nationales (RN).

- **réseau principal de niveau 2 (RP2)** : qui est constitué de liaisons supportant un trafic inférieur à 1500 véhicules/jours.

Ce réseau est composé de routes nationales (RN), de chemins de wilaya (CW) et de liaisons reliant l'Algérie aux pays riverains.



Figure II.2. Route Nationale



Figure II.3. Chemin Wilaya

II.2.3. Détermination des classes de trafic

La classe de trafic (TPL_i) est donnée en nombre de poids lourds par jour et par sens sur la voie la plus chargée, à l'année de mise en service [35].

Les matériaux situés sous les roues subissent des efforts très différents lorsque passe une voiture ou lorsque passe un camion. Seul ce dernier est pris en compte pour déterminer les classes de trafic [25].

II.2.3.1. Définition du poids lourd

Un poids lourd (PL) est un véhicule de plus de 35kN (3,5tonnes) de poids total autorisé en charge (PTAC).

Ces véhicules sont facilement identifiables visuellement sur la route, car ils regroupent tous les véhicules comportant deux essieux et plus, et dont l'essieu arrière est un jumelage.

Cette définition pratique, devrait donc remplacer la précédente considérant un poids lourd PL comme un véhicule de charge utile (C_u) supérieure ou égale à 5 tonnes [7].

II.2.3.2. Répartition transversale du trafic

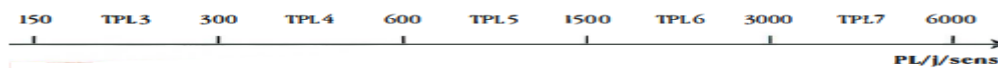
En l'absence d'informations précises sur la répartition des poids lourds sur les différentes voies de circulation [7], on adoptera les valeurs suivantes :

- chaussées unidirectionnelles à 2 voies : 90% du trafic PL sur la voie lente de droite ;
- chaussées unidirectionnelles à 3 voies : 80 % du trafic PL sur la voie lente de droite ;
- chaussées bidirectionnelles à 2 voies : 50% du trafic PL ;
- chaussées bidirectionnelles à 3 voies : 50% du trafic PL.

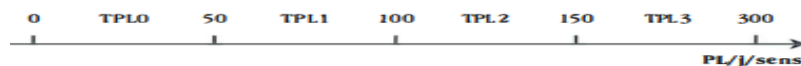
II.2.3.3. Détermination de la classe de trafic (TPL_i)

Les classes de trafic (TPL_i) sont données pour chaque niveau de réseau principal (RP1 et RP2), en nombre de PL par jour et par sens à 1 année de mise en service. [36]

- Classes TPL_i pour RP1



- Classes TPL_i pour RP2



II.3. Catégories fonctionnelles de la route

L'ensemble des itinéraires de l'Algérie peut être classé en cinq catégories fonctionnelles, correspondant aux finalités économiques et administratives assignées par la politique d'aménagement sur le territoire [8], les catégories sont définies dans le tableau suivant :

Tableau II.1. Catégories de routes

Catégorie	Définition
1	Liaison entre les grands centres économiques et les centres d'industrie lourde considérés deux à deux, et liaisons assurant le rabattement des centres d'industries et transformation vers le réseau de base ci-dessus.
2	Liaisons des pôles d'industries de transformation entre eux, et liaisons de raccordement des pôles d'industries légères diversifiées avec le réseau précédent.
3	Liaisons des chefs-lieux et daïra et des chefs-lieux de wilaya, non desservi par le réseau précédent, avec le réseau de catégorie 1 et 2.
4	Liaisons de tous les centres de vie qui ne sont pas reliés au réseau de catégorie 1-2 et 3 avec le chef-lieu de daïra, dont ils dépendent, et avec le réseau précédent.
5	Routes et pistes non comprises dans les catégories précédentes

II.4. Les caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques d'une route sont illustrées par le profil en travers, le profil en long et le tracé en plan [14].

II.4.1. Profil en travers

Il illustre essentiellement la largeur de la chaussée et celle des accotements. Il indique aussi les pentes transversales (Figure II.4).

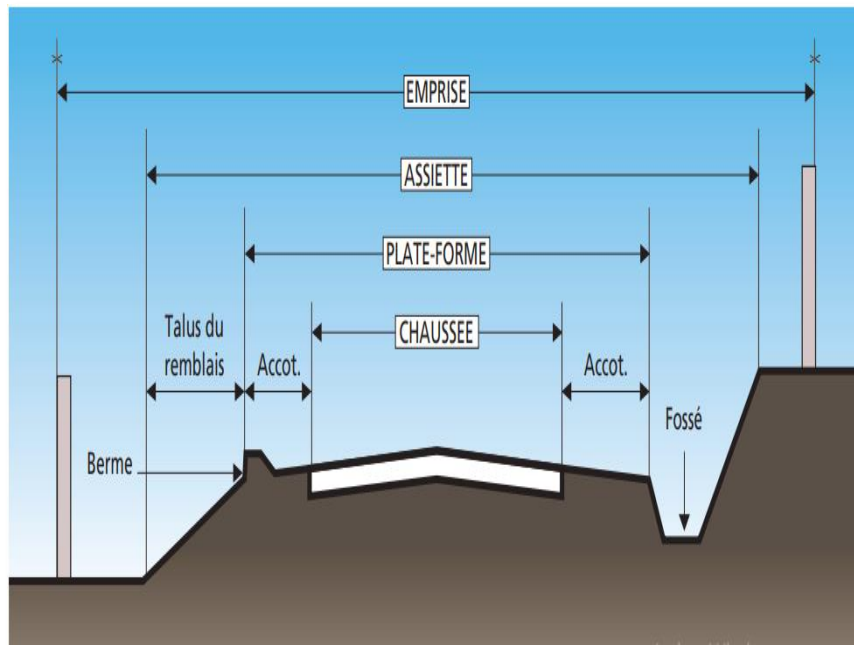


Figure II.4. Profil en travers type d'une route

- **L'emprise** : partie du terrain qui appartient à la collectivité et affectée à la route ainsi qu'à ses dépendances.
- **L'assiette** : surface du terrain réellement occupée par la route.
- **Plate-forme** : surface de la route qui comprend la chaussée et les accotements.
- **Chaussée** : surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.
- **Accotements** : zones latérales de la plate-forme qui bordent extérieurement la chaussée.
- **Berme** : largeur de sécurité non revêtue.
- **Fossé** : tranchée creusée dans le terrain.

II.4.2. Profil en long

Il indique la valeur des pentes et des rampes, ainsi que les rayons des sommets des côtes et des points bas. Il suit le plan vertical passant par l'axe du tracé.

II.4.3. Tracé en plan

Il met en évidence les longueurs des sections rectilignes et la valeur des rayons de courbure dans les virages. C'est une projection de la route sur le plan horizontal.

II.4.4. Routes à deux voies de circulation

Les caractéristiques géométriques respectent les critères liés à la sécurité et au confort des usagers. Les caractéristiques géométriques extrêmes des routes à deux voies de circulation sont données ci-après [5] :

- largeur de la chaussée : 5,50 à 6,00mètres ;
- dévers : 2 à 3 % ;
- rayon de courbure d'un point bas : 700 mètres (min.) ;
- rayon de courbure d'un point haut: 500 mètres (min.) ;
- pentes et rampes: 8 à 10 % (maxi.) ;
- rayon de courbure (en plan): 30 mètres (min.).



Figure II.5. Route à deux voies

II.4.5. Routes à une voie de circulation

Les caractéristiques géométriques respectent les données suivantes :

- le profil en long épouse au mieux le profil du terrain naturel.
- le profil en travers présente en général une pente transversale unique orientée de façon à permettre l'écoulement des eaux [19].

Les caractéristiques géométriques extrêmes des routes à une voie de circulation sont données ci-après :

- largeur de la chaussée : de 3 à 5 mètres ;
 - dévers : de 2 à 3 % ;
- rayon de courbure d'un point bas : 100 mètres (min.) ;
- rayon de courbure d'un point haut: 30 mètres (min.) ;
- rayon de courbure (en plan): 15 mètres (min.) ;
- pentes maxi profil en long : 15 % (maxi) [5].



Figure II.6. Route à une voie

II.5. Constitution des chaussées : les différentes couches

II.5.1. Formation des chaussées

Rappelons que le rôle d'une chaussée est de reporter sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation.

Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes [5].

En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol (Figure II.7) :

- Couche de forme
- Couche de fondation : la construction de cette couche ne pose pas de problème particulier. La plupart des matériaux routiers conviennent.

- Couche de base : la construction de cette couche doit faire l'objet d'une attention toute spéciale : le matériau (traité ou non traité) utilisé dans cette couche doit pouvoir résister aux contraintes résultant du trafic.
- Couche de surface : couche de roulement et couche de liaison.

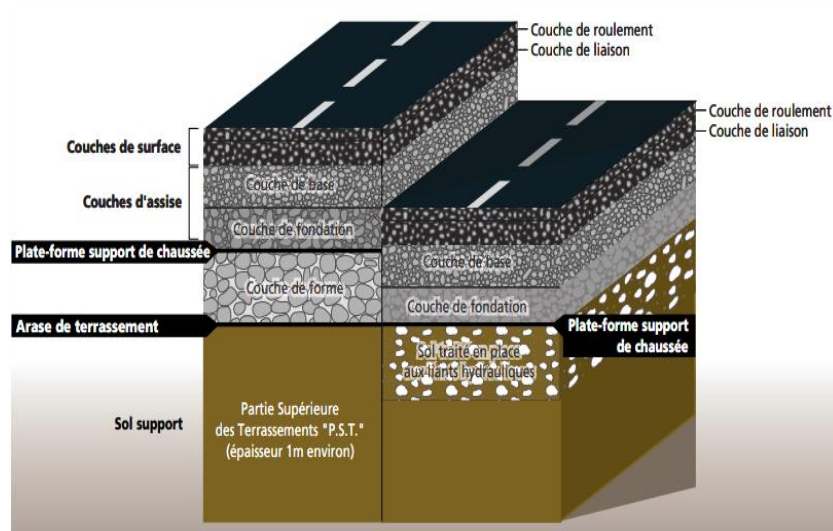


Figure II.7. Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée

II.5.2. La couche de surface

La couche de base est recouverte par une couche de surface pour :

- a) résister aux efforts horizontaux des pneumatiques

En effet, les pneumatiques exercent sur la chaussée des efforts horizontaux résultant de :

- la transmission de l'effort moteur (accélération) ;
- la mise en rotation des roues non motrices ;
- la transmission de l'effort de freinage.

- b) s'opposer à la pénétration de l'eau

Il est important d'empêcher l'eau de pénétrer dans les couches de la chaussée.

Les conséquences sont connues :

- elle délite les granulats ;
- elle ramollit les sols fins, faisant chuter leur portance [21].

II.5.3. La couche de forme

On peut rencontrer dans un même projet des sols de caractéristiques très variables. Afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol, on est amené à interposer, entre le sol support et les couches de chaussée, un élément de transition qui peut être constitué soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques. Il est appelé couche de forme [46].

II.5.4. Les sous-couches

➤ Sous couche anti-contaminante

Si les matériaux de terrain naturel, des remblais ou même de la couche de formes est très fins (argiles ; limon,..) il est susceptible de remonter dans la couche supérieures, la contamination par les particules fines [20].

➤ Sous-couche drainante

Comme on n'est jamais à l'abri de l'infiltration de l'eau dans la chaussée, il convient alors une sous couche drainante, constitué par des matériaux très perméables, assure le drainage de la chaussée.

➤ Sous couche anticapillaire

Empêche la remontée des eaux sous l'action des forces capillaire dans les terrains en présence de nappes aquifères [20].

II.6. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées

Les chaussées sont constituées généralement, soit par des dalles en béton de ciment (chaussées rigides), soit par des matériaux pierreux, graveleux ou sableux employés avec ou sans addition de produits noirs ou de liants hydrauliques (chaussées souples ou semi-rigides). [22], [28].

II.6.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée

Les matériaux pierreux, graveleux ou sableux utilisés dans la construction des routes se divisent en deux grandes classes, qui correspondent à des techniques d'emploi bien différentes dans leur principe :

➤ Les matériaux à granulométrie serrée "ouverte", comportant une forte proportion de vides. Ils sont généralement fournis par le concassage de pierres dures en carrière. Ils sont utilisés comme gravillons de revêtement superficiel.

➤ Les matériaux à granulométrie étalée "pleine", destinés à être compactés, et résistant par compacité et cohésion (sols et chaussées stabilisées, bétons bitumineux ou enrobés denses). Ces matériaux proviennent le plus souvent de gisement de matériaux grenus naturels, améliorés le cas échéant par concassage et triage, ils peuvent aussi provenir du concassage de pierres de dureté moyenne.

Il est essentiel de remarquer que la résistance d'un matériau pierreux dépend de deux éléments, d'une part de la dureté de la roche, d'autre part du mode de concassage, qui influence plus spécialement sur la forme des matériaux. Les matériaux de forme plate ou allongée sont plus fragiles que ceux voisins de la forme cubique.

II.6.2. Les matériaux à éléments fins

Ces matériaux, de plus en plus utilisés, peuvent provenir :

- Soit du concassage de matériaux de carrière, le produit de concassage étant utilisé "tout venant", c'est-à-dire sans criblage ou avec un criblage très réduit corrigeant la courbe granulométrique dans la mesure nécessaire pour que le matériau soit compactable.
- Soit de "sol" de caractéristiques convenables, notamment en ce qui concerne la granulométrie et la teneur en fines. Les sources principales sont les "graves " , "sables " ou "graviers" d'origine glaciaire ou fluviale , le lavage , l'illuviation et les colmatages successifs de ces matériaux par l'action des courants conduisent à une granulométrie généralement continue et assez satisfaisante.

II.6.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron

Le bitume et le goudron sont utilisés très largement dans la construction des chaussées souples, en raison de leurs propriétés physiques qui les rendent spécialement propres à cet usage [36].

Ces produits sont très visqueux aux températures ordinaires, mais soit par chauffage, soit par une préparation spéciale (émulsion), ils peuvent être employés sous forme fluide : ils redeviennent rapidement visqueux et présentent alors les qualités essentielles suivantes :

- La cohésivité, c'est-à-dire la propriété de se déformer sans arrachement ni fissuration interne, en donnant des films étanches et plastiques.
- L'adhésivité, c'est-à-dire la propriété de coller aux agrégats minéraux.

II.6.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques

À côté des matériaux traditionnels (pierres, sables, ciments, goudrons, bitumes) sont apparus dans la construction des chaussées, depuis quelques années, des matériaux fabriqués, destinés à des utilisations spécifiques.

Les géotextiles, matériaux en fibres de polyesters, peuvent être tissés ou non tissés. Elles peuvent être soit perméables, soit imperméables (géomembranes), livrés en rouleaux pesant 100 à 400 g/m², ils peuvent assurer dans les fondations de chaussées, des fonctions de renforcement (armatures), de séparation (anti-contaminants), de filtration et de drainage. Enfin, en vue d'obtenir en surface une rugosité exceptionnelle, on utilise des granulats artificiels présentant une haute résistance à l'abrasion (bauxite calcinée, céramique moulée, etc.)

Les différents matériaux constitutifs des diverses couches d'une chaussées doivent présenter

des caractéristiques mécaniques leur permettant de résister aux différentes sollicitations que subit la chaussée durant sa vie de service. Pour un dimensionnement rationnel des chaussées, il est nécessaire de prendre en compte les facteurs qui influent significativement sur le comportement d'une chaussée en service.

II.7. Les différentes structures de chaussées

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les trois différents types de structures suivants :

- chaussée souples ;
- chaussées semi-rigides ;
- chaussées rigides.

II.7.1. Les chaussées souples

C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent, sont traitées aux liants hydrocarbonés.

La couche de fondation et/ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée [13].

Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la structure type est illustrée sur la figure II.8.

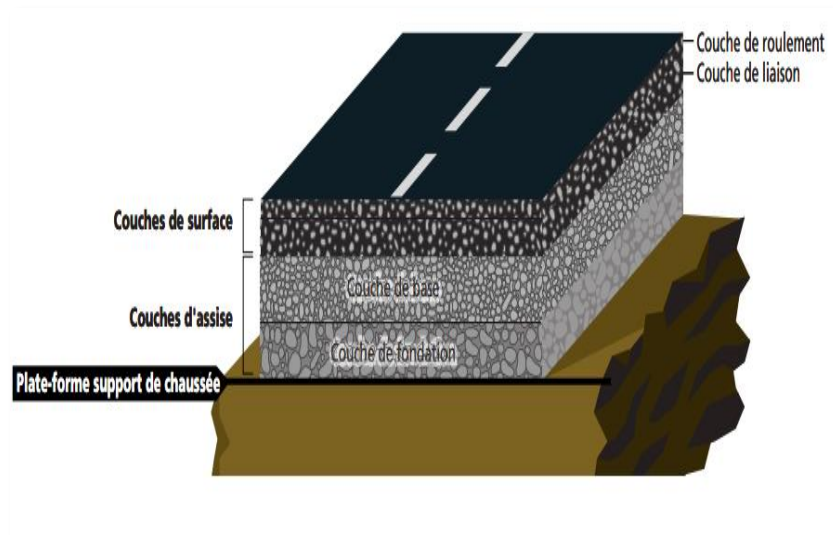


Figure II.8. Structure type d'une chaussée souple

II.7.2. Les chaussées semi-rigides

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation) [13].

Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la structure-type est illustrée sur la figure II.9.

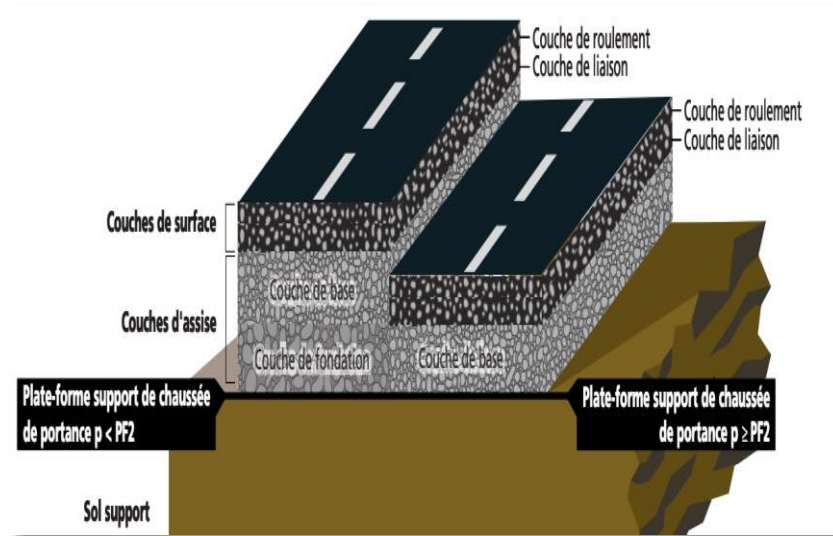


Figure II.9. Structure type d'une chaussée semi-rigide

II.7.3. Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide [13].

En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol support, les couches suivantes (Figure II.10) :

- une couche de forme ;
- une couche de fondation ;
- une couche de roulement en béton de ciment.

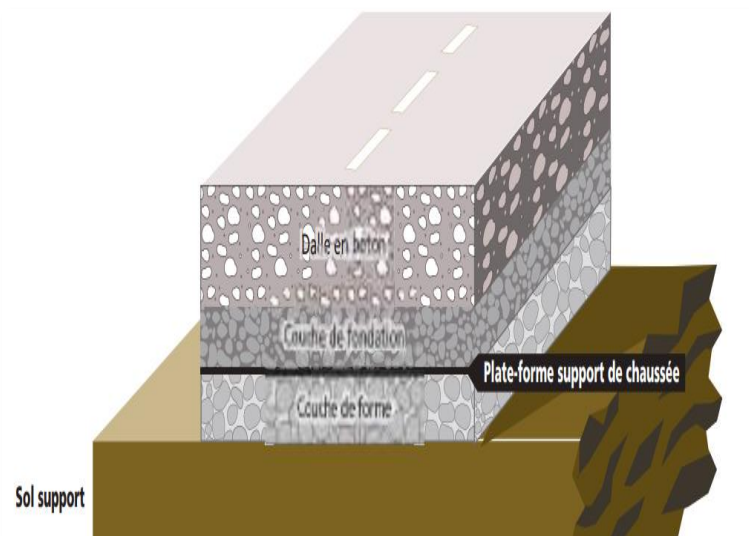


Figure II.10. Structure-type d'une chaussée à trafic > 50 PL/j/sens

Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base sont confondues. Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic ($\text{trafic} \leq 50 \text{ PL/j/sens}$), la couche de fondation n'est pas nécessaire. La dalle en Béton de Ciment peut ainsi être réalisée directement sur l'arase terrassement (avec une couche de réglage éventuelle) ou sur la plate-forme support de chaussée (Figure II.11) [19].

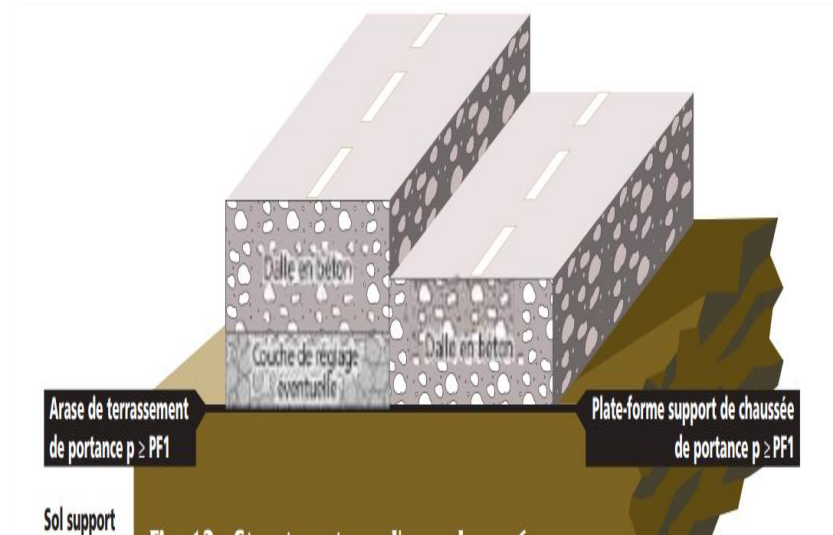


Figure II.11. Structure-type d'une chaussée à trafic $\leq 50 \text{ PL/j/sens}$

II.8. Conclusion

Les différents matériaux constitutifs des couches d'une chaussée doivent présenter des caractéristiques mécaniques, leur permettant de résister aux différentes sollicitations durant sa vie de service. Pour un dimensionnement rationnel des chaussées, il est nécessaire de prendre en compte les facteurs qui influent significativement sur le comportement d'une chaussée en service.

Chapitre III

Critères de choix des structures de chaussées

III.1. Introduction	23
III.2. Choix d'une structure de chaussée	23
III.2.1. Durée de vie	24
III.2.2. Risque de calcul	25
III.2.3. Sol support	26
III.2.3.1. Détermination de la classe de portance de sol-support de chaussée	26
III.2.3.2. Portance des sols terrassés	26
III.2.3.3. Présentation des classes de portance des sols	27
III.2.3.4. Classes de sols supports par niveau de réseau principal (R _{Pi})	27
III.2.3.5. Calcul des déformations admissibles sur le sol support ($\xi_{z.ad}$)	27
III.2.4. Climat et Environnement	28
III.2.5. Trafic	30
III.2.6. Classement géotechnique des sols naturels	34
III.2.7. Matériaux de chaussée	34
III.2.8. Type d'hiver et Indice de gel	34
III.2.9. Cout global	35
III.3. Les choix de stratégie d'investissement et d'entretien	35
III.3.1. Choix d'une durée de référence pour la comparaison des stratégies	36
III.3.2. Les différentes stratégies investissement-entretien en relation avec le choix du niveau de service	36
III.3.3. Éléments économiques pour le choix de la stratégie	39
III.3.4. Implication sur le choix techniques de chaussée	40
III.4. Étude technico-économique d'optimisation pour les choix de dimensionnement	41
III.4.1. Étude d'une possibilité d'intégration de la couche de forme dans la structure de chaussée	41
III.4.2. Choix des techniques de chaussée	42
III.4.3. Prise en compte de la qualité obtenue sur chantier et des dispositions constructives dans le dimensionnement	43
III.5. Conclusion	43

III.1. Introduction

Une chaussée est conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de sécurité et de confort pour les usagers, et assurer sa fonction sur une période de service minimale fixée au stade d'élaboration du projet.

Sa réalisation est l'aboutissement d'une élaboration longue et complexe, nécessitant un enchaînement de choix. Tout d'abord le choix du tracé qui est essentiellement politique et économique. Il devra assurer certaines liaisons et permettre les échanges.

Il en résultera un choix de facteur allant de la durée de vie, du risque de calcul, de la nature du sol support, du climat et de l'environnement jusqu'au trafic de véhicules que la route devra pouvoir supporter.

En fonction de ce trafic et des caractéristiques des sols rencontrés, des matériaux de chaussée ainsi que le cout global du projet : plusieurs solutions techniques pourront être proposées pour la structure de la chaussée. Cette analyse multicritère permettra de déterminer la solution la mieux adaptée.

La rigueur dans les choix techniques, de bonne gestion et de respect de l'environnement, font que le bilan est établi sur de plus en plus de projets routiers et constitue l'élément de décision majeur du décideur.

Le choix qui en découle se porte en général, vers la solution qui minimise les impacts sur l'environnement et le coût global de l'opération avec un écart de prix significatif. À défaut, on privilégie normalement les solutions permettant d'assurer, dès la construction de la route, un service de longue durée n'entraînant qu'un entretien peu fréquent et léger, de manière à satisfaire l'utilisateur.

III.2. Choix d'une structure de chaussée

Pour chaque projet routier, il est nécessaire de procéder à une analyse multicritère détaillée et comparative des diverses solutions afin d'établir les atouts de chacune d'entre elles [8], [25], [36], [39]. Pour que cette comparaison soit judicieuse, les calculs doivent intégrer notamment les facteurs suivants :

- la durée de vie ;
- le risque de calcul ;
- le sol support ;
- le climat et l'environnement ;
- le trafic ;
- le classement géotechnique des sols naturels ;

- les matériaux de chaussée ;
- le type d'hiver et l'indice de gel ;
- le cout global.

D'autres paramètres difficiles à quantifier, peuvent évidemment avoir une influence dans le choix de la technique de construction, comme le coût social, la permanence du service rendu à l'utilisateur, l'utilisation de matériaux locaux ou de production nationale, l'emploi de la main-d'œuvre locale, l'incitation économique régionale, etc. [5]

III.2.1. Durée de vie

Un bilan par analyse de cycle de vie doit être effectué pour chaque technique envisagée. La méthodologie employée consiste à quantifier les matériaux et composants, puis les substances puisées et émises dans l'environnement, en considérant des inventaires issus de différentes bases de données et enfin des indicateurs environnementaux parmi ceux les plus couramment employés en analyse de cycle de vie.

Les indicateurs environnementaux sont calculés pour :

- la fabrication des matériaux de base (ciment, granulats, bitume, goudrons et armatures) ;
- le transport des matériaux en phase de construction (transport des matériaux de base vers les centrales, transport des mélanges de la centrale vers le chantier) ;
- la fabrication des mélanges bitumineux et des bétons ;
- les opérations de mise en œuvre sur chantier ;
- l'entretien (y compris le transport des matériaux et des déchets).

La durée de vie est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maître de l'ouvrage. Elle correspond à un investissement initial moyen à élever et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré [8]. Les durées de vie fixées par niveau de réseau principal (RP1, RP2) et par matériaux types sont synthétisées dans le tableau III.1, suivant :

Tableau III.1. Durées de vie adaptées

Niveau de réseau principal	Matériaux types	Structures types	Durée de vie (année)
RP1	MTB (matériaux traités au bitume)	GB/GB, GB/GNT, GB/TUF, GB/SG	20
	MTLH (matériaux traités aux liants hydrauliques)	GL/GL	20
		BCg	25
RP2	MNT (matériaux non traités)	GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG	15
	MTB (matériaux traités au bitume)	SB/SG	15
GB : grave bitume, GL : grave laitier ; BCg : béton de ciment goudonné, SB : sable bitume, GNT : grave non traitée, SG : sable gypseux, AG : arène granitique, TUF : encroûtement calcaire.			

III.2.2. Risque de calcul

Compte tenu du caractère probabiliste relatif au dimensionnement des chaussées dû à l'importance de la dispersion et du caractère aléatoire des essais de fatigue, l'objectif qui est retenu est que la probabilité d'apparition de dégradations avant une période donnée de x années soit inférieure à une valeur fixée. Cette probabilité de rupture est appelée le «risque de calcul» et la période de x années la «durée de vie» ou durée du dimensionnement [39].

- Définition du risque

Un risque ($r\%$) sur une période de (x) années pris pour le dimensionnement de la chaussée, est la probabilité pour qu'apparaissent au cours de ces (x) années des dégradations structurelles qui impliqueraient des travaux de renforcement de la chaussée.

Les niveaux de risque choisis sont en fait en étroite relation avec les options retenues par le maître de l'ouvrage en matière de niveau de service et de stratégie d'investissement et d'entretien.

Les risques de calcul ($r\%$) adoptés dans le dimensionnement des structures, qui sont fonction du trafic et du niveau de réseau principal [8], sont donnés dans les tableaux III.2 et III.3 :

Tableau III.2. Risques adoptés pour le réseau RP1

	Classe de trafic (TPLi) (PI/J/ sens)	TPL ₃	TPL ₄	TPL ₅	TPL ₆	TPL ₇
Risque (%)	GB/GB, GB/GNT	20	15	10	5	2
	GL/GL	15	10	5	2	2
	BCg/GC	12	10	5	2	2

Tableau III.3. Risques adoptés pour le réseau RP2

	Classe de trafic (TPLi) (PI/J/ sens)	TPL ₀	TPL ₁	TPL ₂	TPL ₃
Risque (%)	GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, SB/SG	25		20	

III.2.3. Sol support

III.2.3.1. Détermination de la classe de portance de sol-support de chaussée

Les structures de chaussées sont construites sur le sol-support ; généralement constitué de sol tassé, ou en cas de besoin (mauvaise portance) surmonté d'une couche de forme. La portance de sol-support est fonction de celle du sol tassé (déblai ou remblai), et éventuellement de l'apport de la couche de forme. Elle est considérée sous deux aspects :

- **à court terme** (pendant les travaux), le sol-support doit remplir l'un des deux critères de constructibilité (compactage, trafic de chantier) :

- déflexion sous essieu à 13 tonnes < 2 mm
- module à la plaque EV2 > 50 MPa.

- **à long terme** (chaussée en service) ; cette portance sera prise en considération dans le dimensionnement des structures de chaussées.

III.2.3.2. Portance des sols tassés

- Cas des sols sensibles à l'eau

L'étude géotechnique est obligatoire, car elle permet d'identifier les sols et d'étudier la variation de la portance grâce à l'essai de poinçonnement CBR. L'essai CBR à prendre en compte sera fonction de la zone climatique considérée [12] ; à savoir :

CBR imbibé à 4 jours pour les zones climatiques I et II : la valeur de l'indice CBR à retenir correspond à 100% de la densité à l'optimum.

CBR immédiat pour les zones climatiques III et IV : la valeur de l'indice CBR sera déterminée à 95 % de l'optimum [8].

- Cas des sols insensibles à l'eau

Dans ce cas : les sables et graves propres, les sols grossiers contenant plus de 25% d'éléments supérieurs à 20 mm, la portance sera déterminée à partir des essais de chargement à la plaque, ou des mesures de déflexion à condition que l'état hydrique au moment de l'essai soit représentatif (c'est-à-dire : $W_{nat} > W_{OPM}$) [12].

III.2.3.3. Présentation des classes de portance des sols

Le tableau regroupe les classes de portance des sols par ordre croissant de S4 à S0. Cette classification sera utilisée pour les sol-supports de chaussée [15].

Tableau III.4. Classes de portance des sols Si

Portance (Si)	S4	S3	S2	S1	S0
CBR	<5	5-10	10-25	25-40	>40

Tableau III.5. Classes de portance à long terme du sol support

Classes de portance (Sj)	S4	S3	S2	S1	S0
Modules (MPa)	15-25	25-50	50-125	125-200	>200

III.2.3.4. Classes de sols supports par niveau de réseau principal (RPi)

Il existe une relation entre la qualité du sol support de chaussée et le bon comportement des chaussées.

Pour cette raison, et pour chaque niveau de réseau principal (RP1 et RP2), les classes de sol support considérées sont les suivantes [8] :

- pour le réseau principal RP1 : S0, S1, S2 ;
- pour le réseau principal RP2 : S0, S1, S2, S3.

III.2.3.5. Calcul des déformations admissibles sur le sol support ($\xi_{z,ad}$)

La déformation verticale ξ_z devra être limitée à une valeur admissible $\xi_{z,ad}$ qui est donnée par une relation empirique déduite à partir d'une étude statistique de comportement des chaussées algériennes.

Pour chaque classe de trafic (TCE_i), il correspond une valeur de $\xi_{z,ad}$.

La vérification $\xi_z < \xi_{z,ad}$ sera surtout à faire dans le cas des chaussées à matériaux non traités, car c'est le critère prépondérant dans le calcul de dimensionnement.

Dans le cas des chaussées traitées au bitume et aux liants hydrauliques, la pression sur le sol support sera tellement faible que le critère $\xi_z < \xi_{z,ad}$ sera pratiquement toujours vérifié [3].

III.2.4. Climat et Environnement

Le climat et l'environnement influent considérablement sur la bonne tenue de la chaussée en termes de résistance aux contraintes et aux déformations.

Les précipitations liées aux conditions de drainage conditionnent la teneur en eau du sol support et donc sa portance ainsi que les possibilités de réemploi des matériaux de déblai en remblai [34].

Les effets de la température sont relativement complexes car la variation de la température s'effectue à vitesse très variable, du fait des différences entre cycles journaliers, d'une part et cycles saisonniers, d'autre part.

Selon le vieillissement du matériau, la température a deux effets mécaniques principaux :

- changement du module des matériaux ;
- création de champs de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température [10].

Les données directement utilisées dans le calcul de dimensionnement des chaussées se rapportent :

- à l'état hydrique du sol support ;
- aux cycles saisonniers de température.
- État hydriques du sol-support

L'état hydrique du sol est pris en compte à travers la portance du sol support. Cette portance est estimée à partir d'un essai de poinçonnement CBR dont les conditions d'imbibition (immédiat ou à 4 jours) sont liées à la zone climatique considérée [8].

Les différentes zones climatiques de l'Algérie sont mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau III.6. Zones climatiques de pluviométrie

Zone climatique	Pluviomètre (mm/an)	Climat	Région
I	>600	Très humide	Nord
II	350-600	Humide	Nord, Hauts-plateaux
III	100-350	Semi- aride	Hauts-plateaux
IV	< 100	Aride	Sud

- Cycles saisonniers de température

Les cycles saisonniers de température qui influent sur les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux (GB, BB, SB) sont pris en compte à travers la notion de température équivalente.

- Définition de la température équivalente

Le calcul de dimensionnement est fait pour une température constante dite température équivalente (θ_{eq}).

Celle-ci est telle que la somme des dommages subis par la chaussée pendant une année, pour une distribution de température donnée, soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante (θ_{eq}) [8].

Les valeurs de température équivalentes (θ_{eq}) retenues pour le calcul du dimensionnement sont données dans le tableau III.7 :

Tableau III.7. Choix des températures équivalentes

Température équivalente (θ_{eq}) (°C)	Zone climatique		
	I et II	III	IV
	20	25	30

- Environnement de la route

Trois classes d'environnement ont été proposées dans le rapport b20 sur les couts d'aménagement et d'entretien.

Le tableau ci-dessous représente la classification des environnements selon le b40 et qui est le croisement des deux paramètres qui sont : la dénivelée moyenne et la sinuosité :

Tableau III.8. Classification des environnements

sinuosité \ Relief	Faible	Moyenne	Forte
Plat	E1	E2	
Vallonné	E2	E2	E3
Montagneux		E3	E3

III.2.5. Trafic

Un essieu chargé de 130kN est, en moyenne, 4 à 5 fois plus agressif qu'un essieu chargé à 100kN. À l'opposé, les véhicules légers ont un effet négligeable sur les chaussées. Ils provoquent seulement une usure de la couche de roulement et éventuellement une pollution de celle-ci. La connaissance du trafic poids lourd (véhicule dont la charge utile est supérieure ou égale à 5 tonnes), constitue un des éléments essentiels pour un bon dimensionnement de la structure de la chaussée.

Ce trafic s'exprime généralement par deux paramètres :

-**le trafic journalier moyen annuel (TJMA)** à la mise en service qui permet de choisir les matériaux nécessaires pour la construction de la chaussée ;

-**le nombre cumulé d'essieux de référence** passant sur la chaussée tout au long de sa durée de vie et qui sert au calcul de dimensionnement proprement dit [38].

- Classes de trafic (TPL_i)

La classe de trafic (TPL_i) est déterminée à partir du trafic PL/j/sens compté en moyenne journalière annuelle (MJA), sur la voie la plus chargée, à l'année de mise en service. Le niveau de réseau (RP1 ou RP2) donne les classes de trafic adoptées [8].

- Calcul du trafic cumulé de PL (TC_i)

Le TC_i est le trafic cumulé de PL sur la période considérée pour le dimensionnement (durée de vie). Il est donné par la formule suivante :

$$TC_i = TPL_i \times 365 \times \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (III.1)$$

Où : i : taux d'accroissement géométrique, (prit égal à 0,04 dans le calcul de dimensionnement), ce taux de 4 % résulte d'une enquête nationale de trafic réalisée dans le cadre de l'étude du schéma directeur routier national.

n : durée de vie considérée [8].

- Calcul du trafic cumulé équivalent (TCE_i)

Le TCE_i est le trafic à prendre en compte dans le calcul du dimensionnement, il correspond au nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

NB : L'essieu de référence standard en Algérie est l'essieu isolé à roues jumelées de 130 kN (13 tonnes). C'est l'essieu maximum légal [8].

Le calcul de TCE_i qui fait intervenir l'agressivité (A) des PL, est donnée par la formule :

$$TCE_i = TC_i \times A = TPL_i \times 365 \times \frac{(1+i)^n - 1}{i} \times A \quad (III.2)$$

Cette formule peut être simplifiée comme suit :

$$TCE_i = TPL_i \times C \times A \times 10^3 \quad (\text{III.3})$$

$$C = 365 \times \frac{(1+i)}{i} \times 10^{-3} \quad (\text{III.4})$$

avec :

A : est le coefficient d'agressivité des PL par rapport à l'essieu de référence de 13 tonnes

C : est le facteur de cumul

À titre indicatif, le tableau ci-dessous donne les valeurs de C en fonction de i et n :

Tableau III.9. Valeurs du facteur de cumul C

Année (n) I (%)	10	15	20	25
2	4,0	6,3	8,9	11,7
4	4,4	7,3	10,9	15,2
7	5,0	9,2	15,0	23,1
10	5,8	11,6	20,9	35,9

Les coefficients d'agressivité A ont été calculés conformément à la norme NFP98-082, à partir des histogrammes de charges obtenus lors de différentes campagnes nationales de pesages des poids lourds. Les résultats de calculs sont donnés dans le tableau ci-après [8]:

Tableau III.10. Valeurs du coefficient d'agressivité A

Niveau de réseau principal	types de matériaux et structures	valeurs de A
RP1	Chaussées à matériaux traités au bitume : GB/GB, GB/Tuf, GB/SG...	0,6
	Chaussées à matériaux traités aux liants hydrauliques : GL/GL, BCg/GC	1
RP2	Chaussées à matériaux non traités : GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG	0,6
	Chaussées à matériaux traités au bitume : SB/SG	0,4
RP1 et RP2	Sol support (Calcul de $\xi_{z,ad}$)	0,6

- Projection future du trafic

La formule qui donne le trafic journalier moyen annuel à l'année horizon est [39] :

$$TJMA_n = TJMA_0 (1+\tau)^n \quad (III.5)$$

avec :

$TJMA_n$: Le trafic à l'année horizon.

$TJMA_0$: Le trafic à l'année de référence

τ : est le taux de croissance (%).

n : Année horizon.

- Calcul de trafic effectif

C'est le trafic traduit en unité de véhicules particulier (UVP), en fonction de type de route et de l'environnement.

Pour cela on utilise des coefficients d'équivalence pour convertir les PL en UVP [37].

Le trafic effectif est donné par la relation suivante :

$$T_{eff} = [(1-z) + p.z] TJMA \quad (III.6)$$

avec : T_{eff} : Trafic effectif à l'année horizon en (uvp).

z : pourcentage de poids lourd (%).

p : coefficient d'équivalence pour le poids lourds, il dépend de la nature de la route

Tableau III.11. Coefficient d'équivalence p.

Environnement	E1	E2	E3
Route à bonne caractéristique	2-3	4-6	8-12
Route étroite ou la visibilité réduite.	3-6	6-12	16-24

- Débit point horaire normale

Exprimé en unité de véhicule particulier (uvp) et donné par la formule suivante [39]:

$$q = \left(\frac{1}{n} \right) T_{eff} \quad (III.7)$$

avec : q : Débit de pointe horaire.

n : Nombre d'heure, (en général $n = 8$ heures).

T_{eff} : Trafic effectif

- Débit horaire admissible

Le débit horaire maximal accepté par voie est déterminé par application de la formule :

$$Q_{adm} = K_1 \cdot K_2 \cdot C \quad (III.8)$$

Tableau III.12. Valeur de K_1

Environnement	E1	E2	E3
K_1	0.75	0.85	0.90 à 0.95

Tableau III.13. Valeurs de K_2

Environnement	$V_b=40\text{km/h}$	$V_b=60\text{km/h}$	$V_b=80\text{km/h}$	$V_b=100\text{km/h}$	$V_b=120\text{km/h}$
E1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E2	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
E3	0.91	0.95	0.97	0.96	0.96

Tableau III.14. Limites de capacité.

Catégorie de route		Débit journalier	Débit horaire uvp/h		
			14 %	12 %	10%
Chaussée séparée	2×3 voies	65000	9100	7800	6500
	2×2 voies	45000	6300	5400	4500
Bidirectionnelle	7 m	15000	2100	1800	1500
Bidirectionnelle	6 m	1750	1500	1250	1750
Bidirectionnelle	5 m	1400	1200	1000	1400

Chaussée bidirectionnelle : on compare le débit de pointe horaire Q à (Q_{adm}) pour les divers types on prend le profil permettant : $Q \leq (Q_{adm})$.

Chaussée unidirectionnelle : le nombre de voies $N = S \times Q / Q_{adm}$. Tel que :

S : coefficient de dissymétrie, en général $\approx 2/3$.

Q_{adm} : débit admissible par voie.

III.2.6. Classement géotechnique des sols naturels

Les sols naturels sont constitués d'éléments granulaires pouvant se séparer par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. La classe géotechnique d'un sol en place est déterminée sur la base d'essais de laboratoire pratiqués sur des échantillons représentatifs de ce dernier effectué dans des conditions standards. Le Guide Technique Routier (GTR) définit quatre grandes classes géotechniques de sols naturels. Ces classes se distinguent par leurs propriétés physiques et mécaniques [18]. Celles-ci sont :

Classe A : Cette classe regroupe les sols fins. Elle est subdivisée en quatre sous-classes :

A1, A2, A3 et A4

Classe B : Cette classe regroupe les sols sableux et graveleux contenant des fines. Elle est subdivisée en six sous-classes : B1, B2, B3, B4, B5 et B6

Classe C : Cette classe regroupe les sols comportant des fines et des gros éléments. Elle est subdivisée en deux sous-classes : C1 et C2. Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B.

Classe D : Cette classe regroupe les sols insensibles à l'eau. Elle est subdivisée en les sous-classes : D1, D2 et D3.

III.2.7. Matériaux de chaussée

Les matériaux de chaussée peuvent être normalisés ou non conformes. Pour les matériaux normalisés, les valeurs de résistance mécanique et de déformabilité retenues, tirées d'études en laboratoire, sont déduites des valeurs moyennes obtenues sur la formule de base établie conformément aux dispositions des normes définissant les méthodologies d'étude. En l'absence d'étude spécifique, le document de dimensionnement se réfère en général aux valeurs seuils minimales fixées par les normes [36].

Quant aux matériaux de chaussée non conformes sur certains aspects aux normes, ou non couverts par une norme, seule une étude de laboratoire particulière, complétée le cas échéant par des planches expérimentales, peut permettre de préciser leur domaine d'emploi.

III.2.8. Type d'hiver et Indice de gel

L'appréciation de la tenue de la chaussée est établie par une vérification menée séparément et après étude de la tenue mécanique sous trafic en poids lourds.

Pour effectuer cette vérification, il est indispensable de retenir certaines définitions tirées de la norme NF P 98-080-1, en l'occurrence [16],[17]:

-L'hiver de référence : C'est l'hiver contre les effets duquel on désire protéger une chaussée pour une région donnée.

- **l'hiver rigoureux exceptionnel** : C'est l'hiver le plus sévère rencontré dans la période pour laquelle on dispose de statistiques complètes. Il correspond au plus fort indice de gel relevé.

- **l'indice de gel** : Cet indice caractérise la sévérité de l'hiver de référence. Il est exprimé en degrés Celsius par jour (C°.J). L'indice de gel correspond, pour un lieu et une période donnés, à la valeur absolue de la somme des températures moyennes journalières négatives.

- **l'indice de gel admissible** : C'est la limite en deçà de laquelle les phénomènes de perte de portance et de gonflement sont suffisamment modérés pour que des désordres ne puissent pas apparaître, ce qui évite d'introduire des restrictions de circulation.

III.2.9. Coût global

Pour que la comparaison soit valable, il convient que les structures de chaussées, adoptées en fonction de la portance du sol et du trafic, soient équivalentes au sens mécanique du terme, c'est-à-dire capables de supporter sans dégradation les sollicitations du trafic et les conditions climatiques pendant une même période de service [5].

Dans ce cas, le choix de la technique de construction pourrait être conditionné par le prix.

Ainsi, pour pouvoir réaliser une comparaison économique entre différentes structures possibles, il est nécessaire de prendre en compte les coûts de construction, mais aussi les coûts d'entretien et de renforcement nécessaires pour que les structures assurent leur fonction pendant la même période de comparaison. C'est le sujet de la partie suivante.

III.3. Les choix de stratégie d'investissement et d'entretien

Choisir une stratégie d'investissement et d'entretien, c'est définir les moyens pour maintenir dans le temps le niveau de service qui a été fixé comme objectif sur une partie homogène du réseau routier. Par "moyens", il faut entendre les coûts de construction (investissement initial ou de réhabilitation dans le cas de chaussées existantes dégradées) et les coûts d'entretien ultérieurs [35].

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

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

Le chiffrage se fait en termes de bilan actualisé, mais d'autres considérations peuvent intervenir pour tenir compte d'autres avantages [35].

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

III.3.1. Choix d'une durée de référence pour la comparaison des stratégies

La durée de référence doit être prise suffisamment longue :

- pour faire apparaître des différences de comportement (et donc d'entretien) entre des chaussées conçues pour des durées et des risques de calcul différents ;
- pour que des interventions d'entretien structurel soient nécessaires sur les chaussées dont l'évolution des dégradations est la plus lente [29].

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

En pratique, sur le réseau routier national, pour une durée de calcul de l'investissement initial de 20 ans associée à un risque faible, les comparaisons économiques entre types de structures sont menées sur une durée de 30 ans (40 ans sur autoroutes). Si l'on souhaite comparer différentes stratégies d'investissement conduisant à un même risque de ruine au bout, par exemple, de 20 ou 30 ans, il faudra retenir une période de référence plus longue de l'ordre de 40 à 50 ans (pour un taux d'actualisation de l'ordre de 7%) [35].

III.3.2. Les différentes stratégies investissement-entretien en relation avec le choix du niveau de service

L'approche probabiliste du dimensionnement conduit à choisir un couple de valeurs risque-durée initiale de calcul. Pour expliciter la comparaison de différentes stratégies d'investissement, il est utile de figer l'un des deux paramètres :

- soit on fixe la durée de calcul et on compare les dimensionnements obtenus pour des risques différents, par exemple comparaison à 20 ans entre 2 et 10 % de risque ;
- soit on fixe le risque de calcul et on compare les dimensionnements obtenus pour différentes durées, par exemple comparaison à 10 ou 20 ans pour 5 % de risque [36].

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

On examine successivement les cas :

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

Les éléments développés à propos de la construction de chaussées neuves s'appliquent aussi pour l'essentiel aux travaux de réhabilitation [35].

- Investissement initial élevé

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

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

Les valeurs de risque de calculs retenus à 20 ans, pour les chaussées du réseau routier national, lors de l'actualisation du Catalogue des structures de chaussées neuves, sont récapitulées dans le tableau III.15, suivant [35].

Tableau III.15. Risque de calcul retenu à 20 ans

Trafic	T0	T1	T2	T3
Grave-bitume	2%	5%	12%	25%
Grave hydraulique	2.5%	5%	7.5%	12%

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

- Investissement initial faible

A l'inverse, les chaussées conçues pour des durées courtes (de l'ordre de 10 à 15 ans) et des risques élevés verront leurs caractéristiques mécaniques évoluer rapidement, même si le niveau de service initial (sécurité, confort) est bon du fait de la qualité de réalisation et des caractéristiques choisies pour la couche de surface. Il va de soi que le risque d'indisponibilité de la route à l'égard des aléas climatiques peut être élevé [35].

A la limite, on peut imaginer de :

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

La politique d'entretien adaptée à ce type de chaussée est une stratégie d'intervention curative.

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

- Aménagement progressif

Entre les deux stratégies extrêmes qui viennent d'être décrites existent des situations intermédiaires comme les stratégies dites d'aménagement progressif. Dans ce cas, l'épaisseur du corps de chaussée est accrue par des rechargements successifs destinés à adapter la

structure à l'évolution du trafic et de son agressivité, et selon l'épuisement du capital de résistance en fatigue [35].

La stratégie correspondante peut être décrite ainsi :

- la structure initiale est conçue pour un risque de calcul modéré, voire faible, comme dans une stratégie à investissement initial élevé, mais pour une durée plus courte (par exemple 5 % au bout de 10 ans au lieu de 20 ans) de sorte qu'elle ne nécessite pas d'entretien structurel général pendant cette période ;

- en fonction du trafic cumulé et des aléas climatiques subis, la chaussée reçoit (par exemple à 8 ans puis à 15 ans) des rechargements successifs de sorte que son endommagement soit ralenti et atteigne (au bout de 20 ans dans l'exemple) celui d'une chaussée conçue pour une stratégie à investissement élevé et entretien préventif.

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

- le risque de calcul au bout de la durée de calcul initiale doit en général rester modéré. On ne peut qu'estimer une valeur de l'ordre de 10 à 15 % pourrait au maximum. Au-delà, des dégradations affectant le confort et la sécurité apparaîtraient probablement avant le terme de la durée initiale ;

- la plate-forme support de chaussée doit être conçue pour assurer dès la première étape une protection suffisante vis-à-vis du gel-dégel. La réduction de l'épaisseur des couches de base et de roulement doit alors être compensée au niveau de la couche de forme ;

- l'évolution des chaussées doit être régulièrement surveillée afin de réaliser en temps opportun les interventions d'entretien et de rechargement. Le point sensible de la solution d'aménagement progressif est en effet la plus grande vulnérabilité à tout retard dans la mise en place des couches d'entretien, l'accélération des dégradations compromettant alors le gain économique escompté initialement.

III.3.3. Éléments économiques pour le choix de la stratégie

Les stratégies d'aménagement progressif peuvent s'avérer intéressantes pour des routes à trafic moyen et/ou à forte croissance, dans des régions à climat généralement peu rigoureux. L'intérêt économique de cette approche croît par ailleurs avec l'élévation du taux d'actualisation. A signaler enfin que des études technico-économiques ont montré que les stratégies d'aménagement progressif s'avéraient globalement plus consommatrices en matériaux et en énergie que la solution de construction en une seule phase. Ce point peut trouver quelque importance dans un contexte de restriction des ressources en granulats et/ou de renchérissement du coût des produits pétroliers. Pour les parties du réseau à faible trafic ou

d'intérêt économique secondaire, l'éventail de choix peut être élargi aux stratégies d'investissement initial faible et entretien curatif. Généralement, ce choix ne correspond cependant pas à un optimum économique (sauf cas de très faibles trafics) mais découle de contraintes budgétaires fortes.

III.3.4. Implication sur le choix techniques de chaussée

Après avoir, à l'issue d'études économiques comparatives, défini la stratégie d'investissement et d'entretien permettant d'atteindre les objectifs de niveau de service visés, il reste à choisir la ou les solutions techniques adaptées. Les techniques disponibles ne sont, en effet, pas toutes équivalentes sur le plan de l'évolution du niveau de service ; la considération de leur mode de fonctionnement fournit déjà une première grille d'analyse [35], [36], [37].

- **Les structures en béton** étant sensibles au sous-dimensionnement et ne pouvant être entretenues avec des tapis minces, doivent être construites pour une longue durée.

- **Dans le cas des structures à assise traitée aux liants hydrauliques**, le risque d'endommagement croît très vite avec une réduction de l'épaisseur de la chaussée. L'épaisseur de la couche d'enrobés qui joue un rôle essentiel d'étanchéité et de protection de la partie supérieure de l'assise ne peut être réduite de façon sensible sans compromettre rapidement la résistance de l'ensemble. Ce type de structure est mal adapté à un aménagement progressif.

- **Avec les structures mixtes**, une réduction de l'épaisseur de grave-bitume de la structure initiale doit être compensée par un accroissement de celle de la couche de grave traitée aux liants hydrauliques, ce qui amène à un gain faible sur l'épaisseur de la chaussée. La réduction de l'épaisseur de grave-bitume augmentant la vitesse de remontée des fissures doit conduire à une certaine prudence. Ces structures s'accommodent ainsi mal d'une construction progressive.

Leurs caractéristiques mécaniques et une évolution structurelle lente (en particulier en matière d'uni) les rendent adaptées aux stratégies à investissement initial élevé accompagnées d'un entretien préventif.

- Pour les chaussées bitumineuses épaisses et à structure inverse, divers scénarios de construction sont envisageables.

- **Les chaussées souples granulaires** peuvent présenter un bon niveau initial de confort et de sécurité, mais l'uni tend le plus souvent à se dégrader rapidement, ce qui est peu compatible avec le maintien d'un niveau de service élevé en termes de sécurité et confort. Ceci tend à réserver ces structures à des routes d'intérêt secondaire dans le cadre d'une stratégie d'investissement initial assez faible (durée courte) accompagnée d'un entretien plutôt de type curatif.

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

III.4. Étude technico-économique d'optimisation pour les choix de dimensionnement

Avec la couche de forme, les chaussées représentent environ 30% du coût d'une route ou d'une autoroute neuve et induisent 50% des dépenses de travaux d'entretien [35]. Cette proportion justifie la recherche d'une optimisation de l'ensemble de ces dépenses : coûts de construction et d'entretien. La recherche d'une solution "optimale" passe par la considération de quatre aspects principaux :

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

Cette étude est faite de préférence en préambule à l'avant-projet détaillé chaussées (ou à "l'avant-projet autoroutier") parallèlement aux études géotechniques en raison de l'incidence pratique des choix touchant à la couche de forme [37].

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

III.4. 1. Étude d'une possibilité d'intégration de la couche de forme dans la structure de chaussée

Dans de nombreuses régions, les matériaux naturels susceptibles de constituer en l'état la couche de forme ne sont pas disponibles ou coûteraient trop cher à être transportés. On a donc de plus en plus recours au traitement aux liants hydrauliques des matériaux du tracé [20].

Pour des chaussées à faible trafic, avec certains matériaux comme des limons, un traitement en place à la chaux et ou ciment peut permettre de réaliser l'assise de chaussée. L'amélioration des performances mécaniques, que permet le traitement aux liants hydrauliques, rejoint pour les grands chantiers, comme ceux des autoroutes, la nécessité de

s'affranchir au maximum des aléas météorologiques, de supporter un trafic de chantier intense et d'assurer la pérennité de la qualité du support.

La couche de forme traitée, ainsi conçue pour les objectifs de court terme, s'avère en général de qualité et d'épaisseur suffisante pour inciter à la prendre en compte dans le dimensionnement des chaussées. A partir de la solution minimale définie pour couvrir les objectifs à court terme, on peut alors chercher si une amélioration des caractéristiques à long terme de la couche de forme (traitement en centrale, augmentation du dosage en liant, accroissement d'épaisseur, meilleur réglage) permettrait de réaliser des économies significatives sur les couches de chaussée [20].

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

III.4.2. Choix des techniques de chaussée

Les qualités que l'on recherche pour les matériaux de chaussée sont codifiées dans un ensemble de normes et de directives. Les diverses techniques de chaussée, utilisant des matériaux aux propriétés mécaniques très différentes, ne peuvent être strictement équivalentes du point de vue de l'évolution dans le temps du niveau de service. Sous l'angle économique, ce point sera apprécié à travers le chiffrage du coût global construction et entretien.[35]

La raréfaction et le renchérissement des matériaux nobles, ainsi que les contraintes croissantes venant de la préservation de l'environnement, conduisent de plus en plus à chercher et à utiliser, pour les couches d'assise, les matériaux disponibles sur le tracé ou à proximité. Il s'agira souvent de matériaux dont certaines caractéristiques ne répondent pas aux exigences des normes ou directives. Pour s'assurer de leur bon comportement et de leur emploi possible, il faut mettre en œuvre suffisamment en amont un programme d'étude et d'expérimentation pour contrôler certaines performances (stabilité, résistance, gélivité...) [29].

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

III.4.3. Prise en compte de la qualité obtenue sur chantier et des dispositions constructives dans le dimensionnement

Une meilleure maîtrise de la qualité de réalisation, à travers notamment une réduction des dispersions d'épaisseur, permet des gains sensibles au plan économique puisque les méthodes de dimensionnement en tiennent compte.

Cette meilleure maîtrise des épaisseurs s'obtient grâce à des ateliers de mise en œuvre et des contrôles adaptés. Cela se traduit en pratique par des tolérances en nivellement plus resserrées et par des contrôles de profil (altimétrie et uni) en commençant dès les couches profondes (couche de forme) [35],[37].

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

III.5. Conclusion

Plusieurs paramètres d'entrée sont nécessaires pour le dimensionnement des structures de chaussées. La répercussion économique du choix d'un type déterminé de chaussée, dépend non seulement du coût de construction ; mais aussi des coûts d'entretien et de renforcement répartis sur la période de service adoptée pour l'ouvrage.

D'autres paramètres peuvent avoir une influence dans le choix de la technique de construction mais qui sont difficiles à quantifier, comme le coût social et le coût de la sécurité.

Les caractéristiques géométriques des chaussées doivent correspondre à la meilleure solution du point de vue économique et satisfaire certaines conditions minimales. Dans le chapitre IV, nous présentons plus de détails.

Chapitre IV

Caractéristiques géométriques des routes

IV.1. Introduction	44
IV.2. Paramètres fondamentaux des projets routiers	44
IV.2.1. La visibilité.....	44
IV.2.1.1. Estimation des vitesses pratiquées	45
IV.2.1.2. Exigences en matière de visibilité.....	47
IV.2.1.3. Distances de visibilité offertes par le tracé	48
IV.2.2. Caractéristiques géométriques des véhicules.....	51
IV.2.3. Dynamique des véhicules.....	52
IV.2.3.1. Coefficients de frottement longitudinal f_l et transversal f_t	52
IV.2.3.2. Accélérations et décélérations longitudinales	53
IV.2.4. Dévers de la chaussée.....	53
IV.2.5. Débit de pointe horaire	53
IV.2.6. Vitesse de référence	54
IV.2.6.1. Notion de vitesse.....	54
IV.2.6.2 choix des vitesses de projet.....	56
IV.3. Tracé en plan	57
IV.3.1. Alignements.....	57
IV.3.2. Arcs de cercle	58
IV.3.2.1. Stabilité en courbe.....	58
IV.3.2.2. Sur largeur	62
IV.3.3 Courbes de raccordement	63
IV.3.3.1 Rôle et nécessité des courbes de raccordement.....	63
IV.3.3.2. Types de courbes de raccordement	65
IV.3.3.3. Clothoïde	68

IV.3.3.4. Choix de la clothoïde- clothoïde minimum	69
IV.3.4. Représentation schématique	75
IV.4. Profil en long	76
IV.4.1. Déclivités.....	77
IV.4.2. Voie supplémentaire pour un véhicule lent	80
IV.4.2.1. Trafic dans les rampes	80
VI.4.2.2. Longueur limite des rampes.....	80
IV.4.2.3. Voie lente.....	81
IV.4.2.4. Voie de dépassement	82
IV.4.3. Raccordements verticaux.....	82
IV.4.3.1. Raccordements convexes.....	83
IV.4.3.1.1. Condition de confort.....	83
IV.4.3.1.2. Condition de visibilité	83
IV.4.3.2. Raccordements concaves	84
IV.5 Conclusion.....	85

IV.1. Introduction

La surface de roulement d'une route est une conception de l'espace, définie géométriquement par trois groupes d'éléments qui sont, le :

- tracé en plan ;
- profil en long ;
- profil en travers.

Les caractéristiques géométriques de ces éléments doivent correspondre à la meilleure solution du point de vue économique et satisfaire certaines conditions minimales données par :

- la nature, plus particulièrement la topographie et la géologie ;
- le trafic futur prévu.

Les problèmes relatifs à la topographie proprement dite, c'est à dire ceux que la nature impose, conduiront à la recherche essentielle d'un tracé correspondant aux terrassements minimale [6].

Quant au critère« trafic», les conditions à remplir doivent permettre :

- aux véhicules rapides de circuler à grande vitesse, soit à la vitesse maximale de base suivant le type de route considéré ;
- aux véhicules longs de s'inscrire dans les virages ;
- aux véhicules lourds de gravir les rampes.

Ces trois conditions sont valables pour le cas d'un faible trafic, où les véhicules ne se gênent guère entre eux. Lorsque la circulation est intense, les mouvements des véhicules sont interdépendants, ce qui conduit à des exigences nouvelles dans le but d'assurer l'écoulement du débit maximum prévu dans des conditions acceptables.

IV.2. Paramètres fondamentaux des projets routiers

Un choix des paramètres fondamentaux doit être fait pour permettre de satisfaire certains critères.

IV.2.1. La visibilité

Dans un souci de sécurité mais également de confort, la conception géométrique des routes doit permettre d'assurer des conditions de visibilité satisfaisantes tant au droit des points singuliers qu'en section courante. Une des tâches du concepteur routier est de rechercher un juste équilibre entre les besoins en visibilité et les contraintes spécifiques au projet. Ces exigences dépendent de la vitesse pratiquée, du temps de réaction et de la distance nécessaire à la manœuvre visée [43].

IV.2.1.1. Estimation des vitesses pratiquées

À côté de la vitesse maximale autorisée, il est nécessaire de connaître la vitesse réellement pratiquée. On utilise la notion de V_{85} : vitesse au-dessous de laquelle roulent 85% des usagers (ce qui permet d'exclure les vitesses considérées comme atypiques et extrêmes). Si cette valeur peut être mesurée sur les itinéraires existants, elle ne peut être qu'estimée pour les projets neufs. Au droit des points singuliers, elle est déterminée en fonction du nombre et des caractéristiques des voies ainsi que du minimum obtenu par le calcul avec le rayon ou la pente de la route [45].

Sauf pour les autoroutes, la vitesse V_{85} est fonction du nombre de voies et du rayon R (m) :

$$\text{- Cas de 2 voies (5m) : } V_{85} = \frac{92}{1 + \frac{346}{R^{1.5}}} \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{- Cas de 3 voies et 2 voies (6 et 7 m) : } V_{85} = \frac{102}{1 + \frac{346}{R^{1.5}}} \quad (\text{IV.2})$$

$$\text{- Cas de 2 x 2 voies : } V_{85} = \frac{120}{1 + \frac{346}{R^{1.5}}} \quad (\text{IV.3})$$

Aussi pour les autoroutes, la vitesse V_{85} est également fonction du nombre de voies et de la rampe p (%) (> 250m) :

$$\text{- Cas de 2 voies (5m) : } V_{85} = 92 - 0,31p^2 \quad (\text{IV.4})$$

$$\text{- Cas de 3 voies et 2 voies (6 et 7 m) : } V_{85} = 102 - 0,31p^2 \quad (\text{IV.5})$$

$$\text{- Cas de 2 x 2 voies : } V_{85} = 120 - 0,31p^2 \quad (\text{IV.6})$$

Cette vitesse sert notamment aux calculs, de :

- la distance d'arrêt ;
- la distance d'évitement
- *La distance d'arrêt* : C'est la distance conventionnelle théorique nécessaire à un véhicule pour s'arrêter compte tenu de sa vitesse, calculée comme la somme de la distance de freinage et de la distance parcourue pendant le temps de perception réaction [44], [45].
- *La distance de perception réaction* : c'est la distance parcourue à vitesse constante v pendant le temps de perception réaction. Ce temps est constitué du temps physiologique de perception-réaction (1,3 à 1,5 s) et le temps mort mécanique d'entrée en action des freins (0,5s). Pour le calcul, on adopte généralement la valeur de 2 s pour ce temps de perception réaction quelle que soit la vitesse même s'il est admis qu'en situation d'attention soutenue (vitesse supérieure à 100 km/h ou trafic soutenu à vitesse importante) ce temps peut être réduit à 1,8s.

Toutefois, une modification de 0,2 s joue peu sur la distance d'arrêt (par ex : 5m à 90km/h) et les différentes études étrangères tendent à situer cette valeur entre 2 et 2,5 s.

- *La distance de freinage* : c'est la distance conventionnelle nécessaire à un véhicule pour passer de sa vitesse initiale à 0. Elle ne correspond pas aux données des constructeurs automobiles et est fonction de la vitesse initiale, de la déclivité et du coefficient de frottement longitudinal (valeur comprise entre 0 et 1). Ce dernier, de par ses hypothèses de calcul, offre des marges de sécurité importantes pour la majeure partie des situations.

$$D_f = \frac{V^2}{2g(c_{fl} \pm p)} \quad (IV.7)$$

avec :

V : vitesse en mètres par seconde

g : 9,81 m/s² (accélération de la pesanteur)

c_{fl} : coefficient de frottement longitudinal

p : déclivité du profil en long (en m/m)

- *La distance d'arrêt* : En courbe, il convient de prendre en compte l'accroissement de la distance d'arrêt. En effet, le freinage doit être moins énergique en courbe et il est donc admis de majorer de 25% la distance de freinage pour les virages de rayon inférieur à 5V (Km/h).

La distance d'arrêt est donnée par la relation suivante :

$$D_a = 2V + c_{fl} \quad (IV.8)$$

- *La distance d'évitement* : C'est la distance nécessaire pour effectuer une manœuvre d'évitement par déport latéral en cas d'obstacle fixe imprévu sur la chaussée. Cette distance peut être utilisée lorsqu'il n'est pas possible d'assurer une distance de visibilité supérieure ou égale à la distance d'arrêt. Pour assurer l'évitement de véhicules, il convient d'assurer un dégagement latéral revêtu de largeur compatible. Elle a pu être estimée à partir de divers travaux et simulations et correspond à la distance parcourue à vitesse constante pendant une durée estimée entre 3,5 et 4,5 secondes (Rapport "visibilité" [43]) qui intègre :

- le temps nécessaire pour effectuer la manœuvre d'évitement proprement dite (entre 2,5 et 3 secondes)
- le temps de perception réaction (1,5 secondes sur autoroute et 1s sur route principale) les valeurs inférieures à celles retenues pour l'arrêt s'expliquent par une réaction plus rapide pour une manœuvre au volant qu'à la pédale).

Sur la base de ces notions et du niveau de service souhaité, le concepteur devra déterminer si les conditions de visibilité offertes par le tracé sont compatibles avec la réalisation des manœuvres citées et notamment au droit des points singuliers [44].

IV.2.1.2. Exigences en matière de visibilité

L'œil du conducteur est réputé situé à 1 m de haut, à 2 m du bord droit de la chaussée (pour véhicules légers), à 4 m en retrait du bord de la chaussée de la voie principale pour les carrefours équipés de STOP. Ceci donne des conditions plus défavorables que pour les piétons et les cyclistes en général plus hauts et plus proches de la rive en carrefour [45].

La visibilité se décline selon les enjeux :

- *pour voir la route (la visibilité sur virage)* : La distance nécessaire peut être estimée à la distance parcourue en 3 secondes à la vitesse V_{85} (m/s) et mesurée entre le point d'observation : l'œil du conducteur (hauteur 1m, 2 m du bord droit de la chaussée) et le point observé (hauteur 0 m sur l'axe de la chaussée au début de la partie circulaire du virage) [32].
- *pour s'arrêter (la visibilité sur obstacle)* : C'est la visibilité nécessaire au conducteur (hauteur 1m, 2m du bord de la chaussée) pour percevoir et s'arrêter avant un obstacle fixe sur la chaussée. En fonction du type de route, il appartient au concepteur de déterminer la hauteur de l'obstacle à prendre en compte. Généralement c'est la hauteur du feu arrière le plus favorable d'un véhicule arrêté sur la chaussée qui est prise en compte (minimum réglementaire : 0,35m) mais pour des cas spécifiques tels que les zones à chute de pierres, cette hauteur peut être ramenée à 0,15m. Sur routes à deux fois deux voies dénivelées, dans la mesure où le risque principal porte sur la présence d'un véhicule arrêté sur la chaussée, l'ICTAAL a retenu la hauteur des feux arrières des véhicules, et, à partir d'une étude spécifique sur les véhicules circulant sur ce type de réseau a retenu une hauteur de 0,60m au lieu des 0,35m habituels [44], [45].
- *pour redémarrer à un carrefour ou d'un accès riverain exemple d'un carrefour plan (avec "STOP")* : L'objectif est de donner au conducteur de la route non prioritaire le temps nécessaire pour effectuer sa manœuvre avant l'arrivée d'un véhicule sur la route principale. Pour ce faire, une distance correspondant à 8 s à la vitesse V_{85} sur la route principale est nécessaire (6 s est un minimum impératif). Le point d'observation est l'œil du conducteur à l'arrêt sur la voie secondaire ($h = 1\text{ m}$ et à 4 m en retrait par rapport au bord de la chaussée principale) et le point observé un véhicule circulant sur la voie de gauche par rapport au sens de circulation ($h = 1\text{ m}$ et sur l'axe de la voie concernée) [45].
- *pour réaliser une manœuvre de sortie d'une voie à chaussée séparée avec échangeur* : Pour les routes à chaussée séparées avec échanges dénivelés, l'usager qui désire quitter la voie

principale doit pouvoir disposer d'une distance qui lui permette de percevoir et identifier la sortie, de décider de sa manœuvre, éventuellement se rabattre sur la file de droite et enfin déboîter à droite vers le biseau de sortie. Cette distance de manœuvre de sortie est définie comme la distance parcourue à vitesse constante V_{85} (en m/s) pendant le temps nécessaire pour opérer, soit 6 secondes.

- *pour dépasser en toute sécurité (la visibilité pour un dépassement)*: Pour les routes bidirectionnelles, quel que soit le niveau de vitesse, une distance de 500m de visibilité permet généralement d'assurer des dépassements sûrs dans la majorité des cas. Le point d'observation est situé à 1 m de hauteur sur l'axe de la chaussée et le point observé est situé à 1m situé sur l'axe de la chaussée pour une trois voies ou sur l'axe de la voie de sens inverse pour une deux voies. Des dépassements peuvent être toutefois réalisés sur des tracés plus contraints avec des distances de visibilité inférieures mais ne peuvent être garantis en toute circonstance. Une manœuvre courante de dépassement dure de 11 à 12 secondes, et dans ce cas, la distance de visibilité nécessaire pour le dépassement peut être évaluée à $d_d \text{ (m)} = 6 V \text{ (km/h)}$. Pour les véhicules disposant d'une réserve de puissance plus importante, la durée du dépassement peut être ramenée à 7 à 8 secondes et donne une distance de visibilité minimale de $d_d \text{ (m)} = 4 V \text{ (km/h)}$ [33], [45].

IV.2.1.3. Distances de visibilité offertes par le tracé

Les distances sont évaluées en fonction des caractéristiques géométriques du tracé tant en profil en long, tracé en plan et profil en travers en tenant compte des masques latéraux (construction, boisements, etc...) [43], [45].

- **Tracé en plan**

Distance de visibilité en virage :

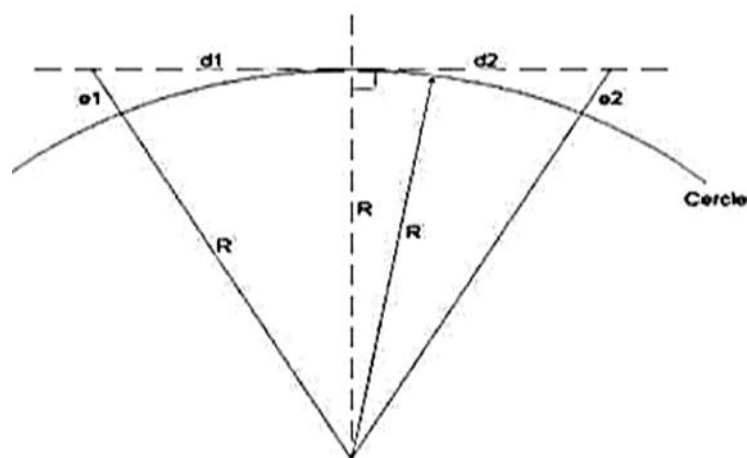


Figure IV.1. Distance de visibilité en virage

Selon la figure IV.1, on a :

$$(R + e_1)^2 = d_1^2 + R^2 \quad (\text{IV.9})$$

et : $(R + e_2)^2 = d_2^2 + R^2 \quad (\text{IV.10})$

La distance de visibilité : $d = d_1 + d_2 \quad (\text{IV.11})$

Si : $d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$ et $e_1 = e_2 = e$

$$\left(\frac{d}{2}\right)^2 + R^2 = (R+e)^2$$

$$\Rightarrow \frac{d^2}{4} + R^2 = R^2 + 2 R.e + e^2$$

$$\Rightarrow \frac{d^2}{4} = 2 R.e + e^2$$

e^2 est négligeable devant $R.e$:

$$d^2 = 8 R.e \quad (\text{IV.12})$$

Le calcul est le même pour une courbe à gauche dans le cas des voies à chaussées séparées en intégrant l'éventuel masque que pourrait constituer le dispositif de retenue.

Application de la formule au conducteur

Cette formule est un moyen de vérification rapide. L'œil du conducteur est réputé à une hauteur de 1m et à 2m du bord de la chaussée. La hauteur n'intervient pas ici.

$$e = 2 + l_a \quad (\text{IV.13})$$

l_a : largeur de l'accotement (largeur de libre entre le bord de chaussée et le masque latéral)

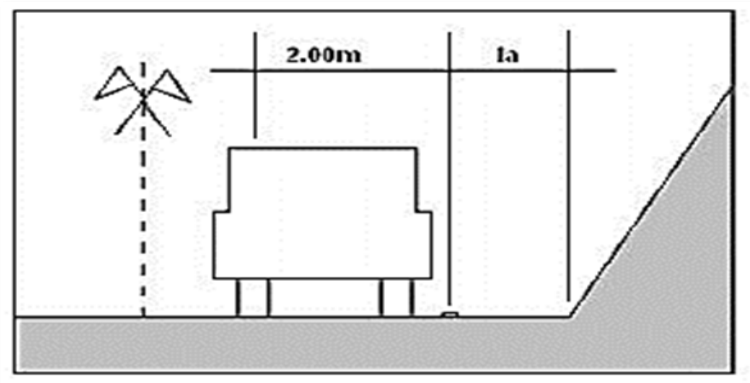


Figure IV.2. position de l'œil du conducteur et calcul théorique du dégagement latéral

Le calcul théorique suppose un profil en U : par exemple, un dégagement latéral de deux mètres suppose un masque vertical à 2 m du bord droit de la chaussée et de ce fait, la visibilité réelle est généralement supérieure.

En négligeant les cas où la développée des virages est si ‘conséquente que la route est hors champ, on peut donc calculer la distance de visibilité en fonction du dégagement latéral et constater que chaque mètre supplémentaire de dégagement latéral dégage une dizaine de mètres de visibilité.

- **Profil en long**

La distance de visibilité en angle saillant : La visibilité dépend de la hauteur de l’œil h_o et de la hauteur visée h_v .

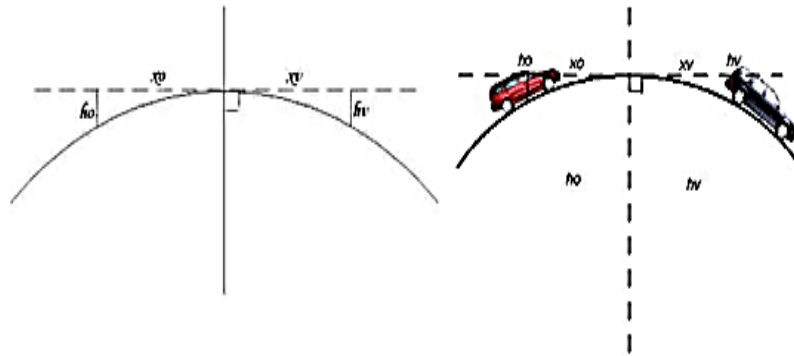


Figure IV.3. Distance de visibilité en angle saillant

La formule employée est dérivée de celle de la parabole :

$$\begin{cases} h_o = x_o^2/2R \\ h_v = x_v^2/2R \end{cases} \quad \begin{cases} x_o = \sqrt{2Rh_o} \\ x_v = \sqrt{2Rh_v} \end{cases}$$

$$\text{Distance de visibilité} = x_o + x_v = \sqrt{2R} (\sqrt{h_o} + \sqrt{h_v}) \quad (\text{IV.14})$$

Le tableau VI.1, présente la visibilité en fonction de la hauteur visée.

Tableau IV.1. La visibilité en fonction de la hauteur visée [45].

visibilité	Hauteur visée	visée description
sur virage	0,00 m	sur l'axe : marquage au sol
sur obstacle	0,35 m	sur l'axe de la chaussée concernée : feux arrières de véhicules
	0,60 m	feux arrière de la plupart des véhicules (étude spécifique réalisée sur autoroute)
de dépassement	1,00 m	hauteur conventionnelle prise pour véhicule en sens opposé

IV.2.2. Caractéristiques géométriques des véhicules

Selon le type de véhicules, les caractéristiques géométriques des véhicules changent. La figure IV.4 ainsi que le tableau IV.2, montrent les différentes géométries :

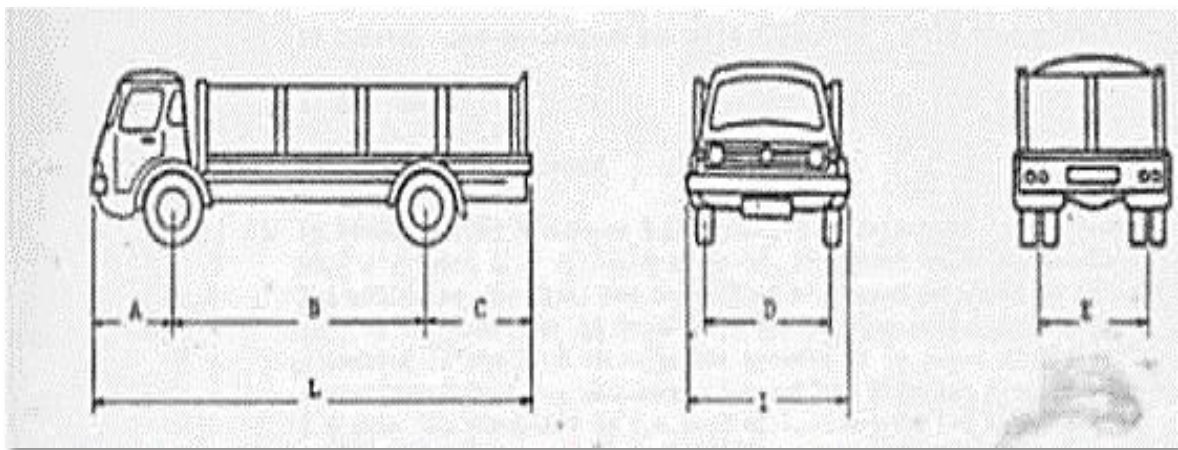


Figure IV.4. Caractéristiques géométriques des véhicules

Tableau IV.2. Caractéristiques géométriques des véhicules

Type du véhicule	Longueur	Largeur	Porte-à-faux avant	Empattement	Porte-à-faux Arrière	Voie avant	Voie arrière
	L	1	A	B	C	D	E
Voiture particulière	5,00	1,80	1,00	3,10	0,90	1,40	1,40
Camion routier	10,00	2,50	1,50	5,50	3,00	1,90	1,90
Tracteur + remorque	5.40	2,50	1,45	2,70	1,25	1,90	1,90
	12.40	2,50		8,15	2,65	1,90	1,90
Semi-remorque	15,00	2,50	1,45	-	2,65	1,90	1,90

IV.2.3. Dynamique des véhicules

IV.2.3.1. Coefficients de frottement longitudinal f_l et transversal f_t

Les valeurs admissibles des coefficients de frottement longitudinal f_l et transversal f_t , en fonction des vitesses et catégorie de route sont, données dans le tableau suivant :

Tableau IV.3. Valeurs des coefficients f_t et f_l (B40)

Catégorie	Vitesse en Km/h Coef. de frottement	120	100	80	60	40
1 - 2	Longitudinal f_l	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45
	Transversal f_t	0,10	0,11	0,13	0,16	0,20
3-4-5	Longitudinal f_l	0,36	0,40	0,43	0,46	0,49
	Transversal f_t	0,11	0,125	0,15	0,18	0,22

IV.2.3.2. Accélérations et décélérations longitudinales

Les valeurs admissibles de l'accélération et de la décélération consciente lors d'une manœuvre de conduite ou d'un changement de voie (véhicules légers), sont données dans le tableau s IV, suivant :

Tableau IV.4. valeurs de l'accélération – décélération (B40)

Catégorie	Vitesse en Km/h	120	100	80	60	40
	Accélération					
1 -2	Accélération (m/s ²)	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8
	Décélération (m/s ²)	-1,5	-1,5	-1,6	-1,7	-1,8
3-4-5	Accélération (m/s ²)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	Décélération (m/s ²)	-1,6	-1,7	-1,8	-1,9	-2,0

IV.2.4. Dévers de la chaussée

Tableau IV.5. valeurs du dévers (B40).

Catégorie	1	2	3	4	5
	Dévers				
Dévers minimal $d_{\min}$	2,5 %		3%		
Dévers maximal $d_{\max}$	7%		8%		9%

IV.2.5. Débit de pointe horaire

- Débit horaire admissible :

Il est donné par l'expression suivante :

$$d = k . c \quad (IV.15)$$

avec :

d : débit horaire maximal accepté par voie, compte tenu du niveau de service visé

c : capacité effective par voie, en u.v.p. qu'un profil en travers peut écouler en régime stable.

k : coefficient résulte de la valeur seuil de d/c à partir de laquelle il convient d'envisager un élargissement de chaussée. Ce coefficient dépend de l'environnement, de la largeur initiale de chaussée et de la valeur du temps.

- *Débit de pointe horaire normale* :

Il est exprimé par l'expression suivante :

$$Q = \frac{1}{n} TMJA \quad (IV.16)$$

avec :

Q : débit de pointe horaire normale (en u.v.p) prévu à l'année horizon, en rase campagne.

Le choix du niveau de ce débit est lié au nombre d'heures de congestion acceptées dans l'année.

TMJA : trafic moyen journalier annuel de l'année horizon

En règle générale, l'année horizon sera la dixième année d'exploitation de la route. Sauf études spécifiques, le coefficient $\frac{1}{n}$ permettant de calculer le débit de pointe horaire normale sera pris égal à 0,12, quelle que soit la catégorie de la route ($\frac{1}{n} = 12\%$)

IV.2.6. Vitesse de référence

IV.2.6.1. Notion de vitesse

Les caractéristiques des véhicules automobiles modernes permettent des vitesses élevées, dont la limite technique se situe peut-être vers 200-250 km/h aujourd'hui [42].

Construire des routes correspondant à des vitesses de pointe aussi élevée serait une entreprise extrêmement onéreuse, même dans un pays « plat », pour ne satisfaire qu'un faible pourcentage d'utilisateurs.

D'ailleurs la majorité des usagers pratiquent une vitesse rationnelle passablement inférieure aux possibilités qu'offrent les voitures particulières. L'expérience montre que la vitesse la plus fréquemment pratiquée se situe entre 90 et 110 km/h.

S'inspirant de ces chiffres et leur ajoutant une marge, le constructeur de routes se fixe une vitesse dite « de base » V_b .

Cette vitesse de base est une vitesse théorique, qui sert à déterminer les valeurs extrêmes des caractéristiques géométriques et autres intervenant dans l'élaboration du tracé d'une route [45].

Ces caractéristiques ou éléments sont :

- rayon minimum des sinuosités $R_{\min}$;
- déclivité maximum $i_{\max}$;
- distance de visibilité minimum $d_{\min}$.

La vitesse de base est dite constante, car on peut l'utiliser sur tout l'itinéraire pour lequel elle a été choisie, avec l'assurance qu'en tout point de celui-ci on a la sécurité et le confort requis.

Remarquons d'emblée que cela ne signifie pas que des vitesses plus élevées que la vitesse de base ne puissent pas être pratiquées sur certains tronçons de cet itinéraire, dont le tracé a pu être projeté d'une façon moins rigoureuse, en présence d'une topographie plus facile.

Par contre, partout où la topographie a exigé l'emploi de caractéristiques géométriques extrêmes pour réduire le coût de la construction, la vitesse de base ne peut pas être dépassée sans que l'usager empiète sur la sécurité.

La même vitesse de base doit être maintenue sur un itinéraire déterminé de caractère constant le plus long possible, plusieurs dizaines de km, plusieurs centaines dans les grands pays. Le choix de V_b dépend de :

- type de route ;
- l'importance et genre de trafic (volume, structure) ;
- topographie, soit degré de difficulté du terrain ;
- conditions économiques d'exécution et d'exploitation.

Lorsqu'il s'agit d'une autoroute par exemple, c'est le caractère de la topographie qui est largement prépondérant pour le choix de V_b (km/h).

La valeur de V_b choisie doit être ratifiée par l'autorité compétente.

Tableau IV.6. Gamme de vitesses de base pratiquées dans certains pays.

Pays	Type de route	Valeurs des vitesses de base
Suisse	Routes à grand débit	80 -120
	Routes principales	60 -120
	Routes collectrices	50-80
France	Autoroutes de liaison	140
	Idem, topographie très accidentée	100
	Grandes routes, topographie très facile	120
	Routes ordinaires, topographie peu accidentée	100
	Routes ordinaires, topographie accidentée	80
	Routes ordinaires, topographie vallonnée	65
Italie	Milan - Bologne	150
	Bologne - Florence (Apennins)	100
	Florence - Rome	120
E-U (AASHO)	Routes de plaine	115
	Idem, en topographie accidentée	95
	Routes de montagne	95
Algérie	Route en agglomération	40-50
	Route hors agglomération	80-100
	autoroute	100-120

Alors que tous les pays font état de la topographie pour le choix de V_b , la Suisse semble ne tenir compte que de l'importance de la route, c'est-à-dire du type de route, mais il faut remarquer que la topographie est implicitement contenue dans la variation des valeurs de V_b . Comme on l'a vu plus haut, chaque type de route dispose d'une gamme de vitesses de base, parmi lesquelles celle qui sera choisie le sera en fonction de la topographie.

D'autre part, une même vitesse de base, considérée parallèlement dans un pays et dans un autre pays n'implique pas nécessairement les mêmes caractéristiques géométriques, car le calcul de celles-ci fait intervenir des hypothèses qui ne sont pas normalisées sur le plan international. C'est ainsi qu'une autoroute française de $V_b = 140$ km/h a les mêmes caractéristiques géométriques qu'une autoroute suisse avec $V_b = 120$ km/h.

IV.2.6.2 Choix des vitesses de projet

On les déterminera par le canal du rayon de courbure des sinuosités que l'on peut logiquement introduire dans le tracé, au fur et à mesure que la topographie varie. Le rayon des

cercles des virages est en effet l'élément géométrique le plus lié à la vitesse, à cause de l'effet de la force centrifuge. La déclivité est aussi un élément lié à la vitesse, dont on peut tenir compte pour choisir V_b .

- Vitesse de base des véhicules légers V_{vl} et des poids lourds V_{pl} adoptées en Algérie :

Les vitesses de base V_{vl} et V_{pl} permettant de définir les caractéristiques minimales d'aménagement sont, consignées dans le tableau suivant :

Tableau IV.7. Valeurs des vitesses de base (Normes B 40).

Catégorie Environnement		1	2	3	4	5
E1	V_{vl}	120	120	120	100	80
	V_{pl}	40	40	35	30	
E2	V_{vl}	100	100	100	80	60
	V_{pl}	35	35	30	25	
E3	V_{vl}	80	80	80	60	40
	V_{pl}	30	30	25	20	

Le choix de V_b est finalement un compromis entre le niveau de service satisfaisant et une limitation des investissements ; la vitesse pratiquée est donc en général $> V_b$.

IV.3. Tracé en plan

IV.3.1. Alignements

Bien qu'en principe la droite soit l'élément géométrique le plus simple, son emploi dans le tracé des routes modernes est restreint. La longueur minimum est celle qui correspond à un chemin parcouru durant un temps (t) d'adaptation [42].

$$L_{\min} = V \cdot t \quad (\text{IV.17})$$

avec : $t = 5 \text{ s}$ Soit : $L_{\min} = 5 \times \frac{V_b}{3.6} \quad (\text{IV.18})$

V_b : vitesse de base en Km / h.

V : vitesse véhicule (m/s)

La longueur maximum est celle qui correspond au chemin parcouru pendant 1 minute à la vitesse V .

avec : $t = 60 \text{ s}$ $L_{\max} = 60 \cdot V \quad (\text{IV.19})$

Soit :
$$L_{\max} = 60 \times \frac{V_b}{3,6} \quad (\text{IV.20})$$

IV.3.2. Arcs de cercle

Trois éléments interviennent pour limiter les courbures :

- la stabilité des véhicules en courbe ;
- la visibilité en courbe ;
- l'inscription des véhicules longs dans les courbes de rayon faible [6] .

IV.3.2.1. Stabilité en courbe

Dans un virage de rayon R , le véhicule subit l'effet de la force centrifuge qui tend à provoquer une instabilité du système.

Afin de réduire l'effet de la force centrifuge, on incline la chaussée transversalement vers l'intérieur de la courbe (éviter le phénomène de dérapage) d'une pente dite dévers exprimée par sa tangente [45].

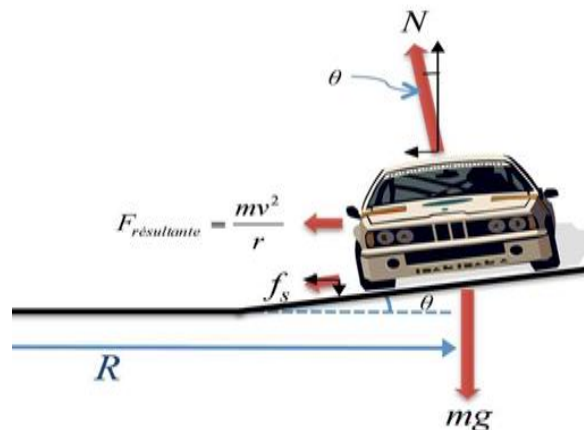


Figure IV.5. Forces agissantes sur un véhicule

Soit : F : résultante des réactions tangentielles F_1 et F_2 .

La force centrifuge F' doit être équilibrée par F (adhérence transversale)

$$\theta \text{ petit} \Rightarrow \sin \theta = \tan \theta = d$$

$$\cos \theta = 1$$

à l'équilibre :

$$P \cdot \sin \theta + f_s \geq F' \cos \theta \quad \Rightarrow \quad P \cdot \sin \theta + P \cdot f_s \geq F' \cos \theta$$

$$\Rightarrow mg(d + f_s) \geq m \frac{v^2}{R} \quad \Rightarrow \quad R = \frac{v^2}{g(f_s + d)}$$

avec : $v = \frac{V}{3,6}$ et : $g = 10 \text{ m/s}^2$

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 (f_s + d)} \quad (\text{IV.21})$$

✓ **Exemple :**

Route catégorie 1 ou 2 avec $V = 80 \text{ Km/h}$ et $f_s = 0,13$

$$R_{\min} = \frac{V^2}{127 (f_s + d)}$$

$$R_{\min} = \frac{80^2}{127 (0,13 + 0,7)} = 251,96 \approx 250 \text{ m}$$

NB :

• (d) ne doit pas être trop grand (risque de glissement à faible vitesse par temps pluvieux ou par verglas).

• (d) ne doit pas être trop faible pour assurer un bon écoulement des eaux.

Ainsi pour chaque V, on définit une série de couples (R, d) :

* au dévers maximum ($d_{\max}$) correspond au rayon minimum absolu RH_m [45].

$$\text{avec : } d_{\max} = \begin{cases} 7 \% & \text{catégorie 1 - 2} \\ 8 \% & \text{catégorie 3 - 4} \\ 9 \% & \text{catégorie 5.} \end{cases}$$

NB : Aucun rayon $< RH_m$.

◦ Le rayon minimum normal RH_N doit permettre à des véhicules dépassant V_b de 20 Km/h de rouler en sécurité.

Le dévers associé $d_N = d_{\max} - 2 \%$ catégorie 1 à 4
 $d_N = 6\%$ catégorie 5.

Tableau IV.8. Valeurs du dévers.

Catégorie	Environnement	Dévers (%)	
		Max	associé
1-2	1-2-3	7	5
3-4	3	7	5
3-4	1-2	8	6
5	1-2-3	9	6

C'est donc le RH_m de la catégorie supérieure de vitesse :

$$RH_N (V_b) = RH_m (V_b + 20) \quad (\text{IV.22})$$

◦ Au dévers minimum ($d_{\min}$) correspond le rayon au dévers minimal RH'' (RH_d)

$$RH_d = \frac{V_b}{127.2 d_{\min}} \quad (IV.23)$$

avec : $d_{\min} = 2,5\%$: catégorie 1 – 2
 $= 3\%$: catégorie 3 - 4 – 5

Si le rayon est très grand, la route conserve son profil en toit et le dévers est alors négatif pour l'un des sens de circulation. Le rayon minimal qui permet cette disposition est le rayon minimal non déversé RH' (RH_{nd}) [45].

$$RH_{nd} = \frac{V_b^2}{127. 0,035} \quad \text{catégorie 1-2} \quad (IV.24)$$

$$RH_{nd} = \frac{V_b^2}{127(f'' - 0,035)} \quad \text{catégorie 3-4-5.} \quad (IV.25)$$

avec : $f'' = 0,07$: catégorie 3

$f'' = 0,075$: catégorie 4-5.

Le tableau suivant donne les valeurs des différents rayons définis selon les normes (B40).

Tableau IV.9. Rayons en plan et dévers associés.

Rayon	Symbole (%)	Env. 1			Env.2			Env.3		
Catégorie 1 - 2	Vr	120	100	80	100	80	60	80	60	40
- mini absolu	RH_m (7%)	650	450	250	450	250	125	250	125	50
- mini normal	RH_N (5%)	1000	650	450	650	450	250	450	250	125
- au d_{min}	RH_d (2.5%)	2200	1600	1000	1600	1000	550	1000	550	250
- non déversé	RH_{nd} (-25%)	3200	2200	1400	2200	1400	800	1400	800	350
Catégorie 3	Vr	120	100	80	100	80	60	80	60	40
- mini absolu	Rh_m	600 (8%)	375 (8%)	220 (8%)	375 (8%)	220 (8%)	115 (8%)	230 (7%)	115 (7%)	40 (7%)
- mini normal	RH_N	850 (6%)	600 (6%)	375 (6%)	600 (6%)	375 (6%)	220 (6%)	400 (5%)	230 (5%)	115 (5%)
- au d_{min}	RH_d (3%)	1900 (3%)	1300 (3%)	800 (3%)	1300 (3%)	800 (3%)	450 (3%)	800 (3%)	450 (3%)	200 (3%)
- non déversé	RH_{nd} (-3%)	2800 (-3%)	2000 (-3%)	1200 (-3%)	2000 (-3%)	1200 (-3%)	700 (-3%)	1200 (-3%)	700 (-3%)	300 (-3%)
Catégorie 4	Vr	100	80	60	80	60	40	60	40	
- mini absolu	RH_m	375 (8%)	220 (8%)	115 (8%)	220 (8%)	115 (8%)	40 (7%)	115 (8%)	40 (7%)	
- mini normal	RH_N	600 (6%)	375 (6%)	220 (6%)	375 (6%)	220 (6%)	115 (5%)	230 (6%)	115 (5%)	
- au d_{min}	RH_d	1300 (3%)	800 (3%)	450 (3%)	800 (3%)	450 (3%)	200 (3%)	450 (3%)	200 (3%)	
- non déversé	RH_{nd}	1250 (-3%)	1100 (-3%)	650 (-3%)	1100 (-3%)	650 (-3%)	280 (-3%)	650 (-3%)	280 (-3%)	
Catégorie 5	Vr	80	60	40	60	40		40		
- mini absolu	RH_m	210	105	40	105	40		40		
- mini normal	RH_N	350	210	105	210	105		105		
- au d_{min}	RH_d	800	450	200	450	200		200		
- non déversé	RH_{nd}	1100	650	280	650	280		280		

IV.3.2.2. Sur largeur

Un long véhicule à deux essieux, circulant dans un virage, balaye en plan une bande de chaussée plus large que celle qui correspond à la largeur de son propre gabarit. Pour éviter qu'une partie de sa carrosserie n'empiète sur la voie adjacente, on donne à la voie parcourue par ce véhicule une sur largeur par rapport à sa largeur normale en alignement [42].

Ce problème, dit de « l'inscription des véhicules » dans les virages, s'adresse aux sinuosités de faibles rayons, généralement inférieur ou égale à 200 m.

Le calcul de la sur largeur nécessaire se fait pour le véhicule lui-même et le résultat obtenu s'applique en sur largeur à chacune des deux voies de la route, de façon que la marge de sécurité latérale de véhicule à véhicule, respectivement de véhicule à bord de chaussée, soit équivalente à celle des tronçons en alignement

Le calcul de (s) se fait pour simplifier au moyen du rayon de l'axe de la route qui est peu différent du rayon extérieur R_e du véhicule.

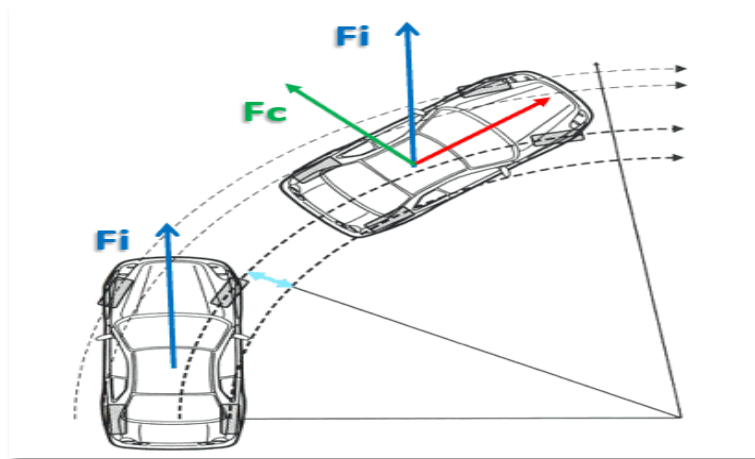
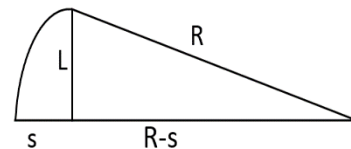


Figure IV.6. Inscription des véhicules dans les virages.

$$R^2 = (R-s)^2 + L^2$$

avec : $s^2 \approx 0$



$$s = \frac{L^2}{2R} \quad (IV.26)$$

Le calcul et la construction des sur largeurs sont effectués séparément pour chaque voie de circulation, dans le cas des véhicules différents, le véhicule le plus encombrant circulant à l'intérieur de la courbe.

✓ **Exemple :**

$$L=12 \text{ m}, R=40 \text{ m} \quad \Rightarrow \quad S = 1,80\text{m} \quad \Rightarrow \quad L_t = 2,50 + 1,80 = 4,30 \text{ m}$$

IV.3.3 Courbes de raccordement

Ce tracé en plan qui, en première approximation, se compose d'une succession de droites et d'arcs de cercles accuse aux points de tangence une discontinuité de courbure qui n'est plus compatible avec les grandes vitesses pratiquées aujourd'hui [45].

Définition de la courbure :

$$k = \frac{1}{R} = C.L \quad (\text{IV.27})$$

R : rayon de l'axe du virage.

Un tracé rationnel de route moderne comportera donc nécessairement des alignements, des virages en arcs de cercle et, entre ces deux éléments, des tronçons de raccordement de courbure progressive, passant de la courbure 0 ($R = \text{infini}$) à l'extrémité de l'alignement à la courbure $\frac{1}{R}$ au début du cercle du virage.

Pour les sinuosités de rayons supérieurs à : 1000 m pour les routes principales, 3000 m pour les autoroutes, les conditions dynamiques et de confort ne demandent plus de courbe de raccordement ; mais il est toutefois recommandé de les maintenir pour des raisons d'ordre optique et esthétique [21].

On étudiera surtout dans la suite les courbes de raccordement à variation continue de courbe, mais il est parfaitement possible de concevoir le raccordement d'une droite à un cercle de rayon R au moyen d'un autre cercle de rayon de 2R par exemple ou deux autres cercles de rayon respectifs 4R, puis 2R .

IV.3.3.1 Rôle et nécessité des courbes de raccordement

L'emploi des CR se justifie par les quatre conditions suivantes :

- ♦ stabilité transversale du véhicule ;
- ♦ confort des passagers du véhicule ;
- ♦ transition de la forme de la chaussée ;
- ♦ tracé élégant, souple, fluide, optiquement et esthétiquement satisfaisant.

Cette dernière condition contient une part de subjectivité. On ne retiendra dans la suite que l'exigence technique d'un bon « tracé optique » satisfaisant avant tout le conducteur et les passagers d'un véhicule.

- **Condition de stabilité**

S'il n'y a pas de courbe de raccordement entre l'alignement et le cercle du virage, la force centrifuge fait brusquement son apparition au point de tangence. L'accélération $\frac{V_b^2}{R}$ tend subitement à faire dévier le véhicule de sa trajectoire normale. Le conducteur éprouve un sentiment d'insécurité et réagit d'instinct en braquant son volant généralement plus qu'il ne faudrait. Il a tendance d'exagérer et de prendre le virage à la corde.

La trajectoire réelle du véhicule n'est alors plus un cercle, mais une autre courbe de rayon certainement progressif. On a donc intérêt pour la sécurité de donner au tracé une forme aussi proche que possible de cette trajectoire réelle.

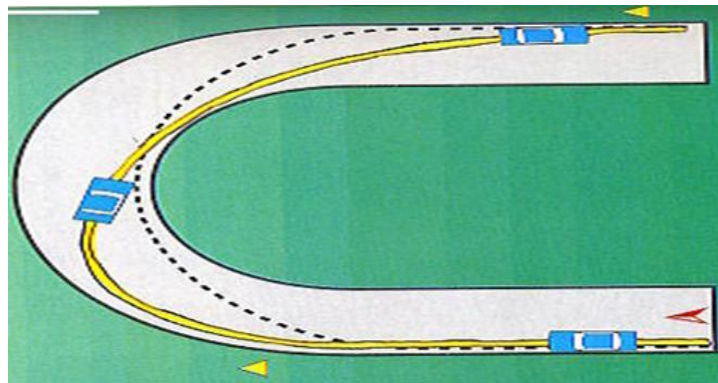


Figure IV.7. Trajectoire réelle du véhicule

- **Condition de confort**

En passant sans transition d'un alignement à un cercle, les passagers d'un véhicule éprouvent une sensation brutale désagréable de déportement vers l'extérieur de la courbe. Quant au conducteur, son comportement vient d'être analysé.

Ce n'est pas l'accélération variable qui est essentiellement désagréable, mais sa variation trop rapide. Il s'agit d'un terme en m/s^2 . L'expérience a fourni une certaine valeur maximum de cette variation au-delà de laquelle les usagers sont désagréablement sollicités.

Le remède à cela consiste à donner au véhicule un parcours assez long entre la fin de l'alignement et le début du cercle, afin que la variation de l'accélération radiale soit acceptable. C'est donc tout au long de la courbe de raccordement que s'opérera cette variation, dont la valeur critique déterminera la longueur de la courbe de raccordement

- **Transition de la forme superficielle de la chaussée**

Un dévers constant doit régner sur toute la partie circulaire du virage ; sur l'alignement il est zéro. Donc, si le cercle succédait sans transition à l'alignement, on serait amené à

développer le dévers déjà sur l'alignement, ce qui n'est pas admissible. Il est donc nécessaire de disposer d'un tronçon intermédiaire entre l'alignement et le cercle. Ce tronçon ne peut logiquement qu'être la courbe de raccordement.

- **Décalage du cercle du virage**

Dans le tracé approximatif le cercle du virage est tangent à la droite de l'alignement. Pour pouvoir intercaler une courbe de raccordement, il est indispensable de déplacer ce cercle vers l'intérieur du virage. Ce décalage ou ripage ΔR du cercle est l'élément essentiel de l'opération, beaucoup plus que la forme de la courbe de raccordement que l'on choisira.

Plus ΔR sera grand, plus longue sera la courbe de raccordement.

Pour élaborer un tracé moderne, on dispose maintenant de 3 éléments, liés entre eux :

R = rayon du virage (dont le minimum dépend de la vitesse de base).

ΔR = décalage du cercle.

L = longueur de la courbe de raccordement.

Deux seuls de ces éléments suffisent pour définir la courbe de raccordement. Connaissant par exemple R et ΔR , on peut tracer approximativement une courbe de raccordement.

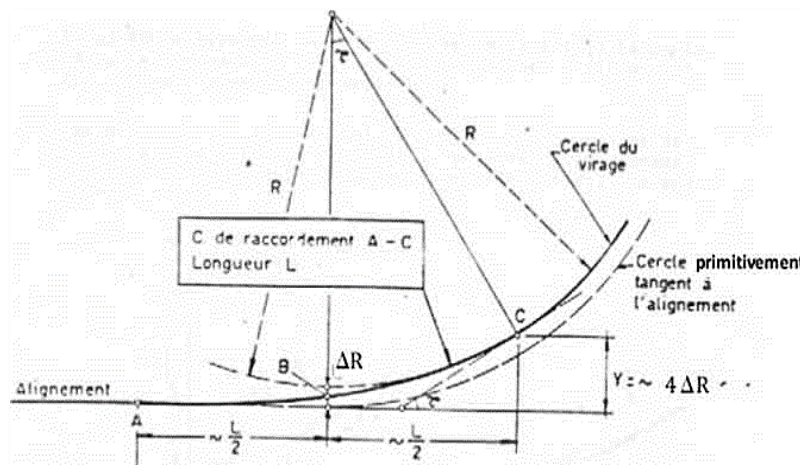


Figure IV.8. Décalage du cercle

Données : R et ΔR

Courbe de raccordement tracée par A-B-C $B \approx \frac{1}{2} \Delta R$ et $Y \approx 4 \Delta R$

IV.3.3.2. Types de courbes de raccordement

Parmi les courbes mathématiques connues qui satisfont à la condition désirée d'une variation continue de la courbe, on a retenu les trois courbes suivantes, dont le piquetage sur le terrain est commode :

- ♦ parabole cubique ;
- ♦ lemniscate ;
- ♦ clothoïde.

- *Parabole cubique* : Sa courbure est proportionnelle l'abscisse mesurée à partir du point d'inflexion sur la tangente en ce point. Sa courbure augmente jusqu'à un maximum (angle de tangente 24° ou angle polaire 9°), puis elle diminue, c'est à dire le rayon augmente de nouveau. Cette courbe est d'un emploi limité, vu le maximum de sa courbure vite atteint ; ne convient qu'à des raccordements de très grands rayons ; utilisée dans le tracé des chemins de fer.

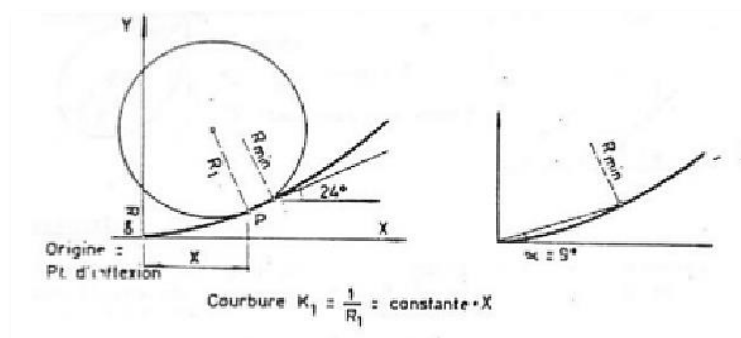


Figure IV.9. Courbe de raccordement Parabole cubique

- *Lemniscate* : Sa courbure est proportionnelle à la longueur du rayon vecteur, mesurée à partir du point d'inflexion ou centre de symétrie. Maximum de courbure sur la bissectrice des axes de coordonnées, pour un angle de tangente 135° ou un angle polaire de 45° .

Autre définition : lieu géométrique des points dont le produit de leurs distances à deux points fixes (foyers) est constant.

Courbe utile pour certains problèmes de tracé de route (par exemple trèfle d'autoroute).

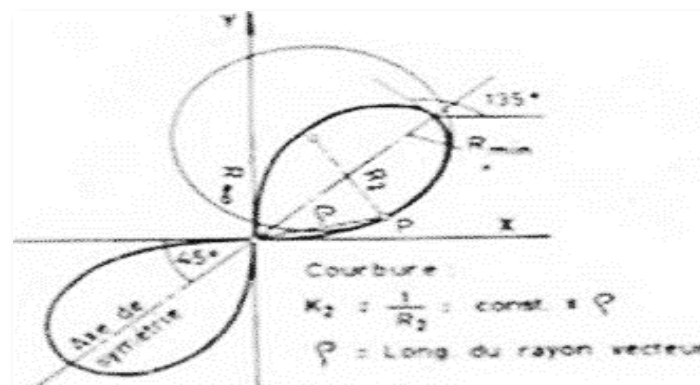


Figure IV.10. Courbe de raccordement lemniscate

- *Clothoïde* : Sa courbure est proportionnelle à l'abscisse curviligne (ou longueur de l'arc), mesurée à partir du point d'inflexion.

Variation de courbure continue, dans le même sens, entre la courbure 0 et la courbure infinie ($R = 0$).

Permet le raccordement de deux éléments géométriques du tracé faisant entre eux un angle quelconque.

Courbe idéale du point de vue dynamique. Le véhicule dont le conducteur maintient une vitesse constante (uniforme) et qui tourne son volant de direction à vitesse angulaire constante, décrit une véritable clothoïde. L'arc parcouru ou chemin parcouru L est linéairement proportionnel à la courbure K : $K = CL$ (C : constante)

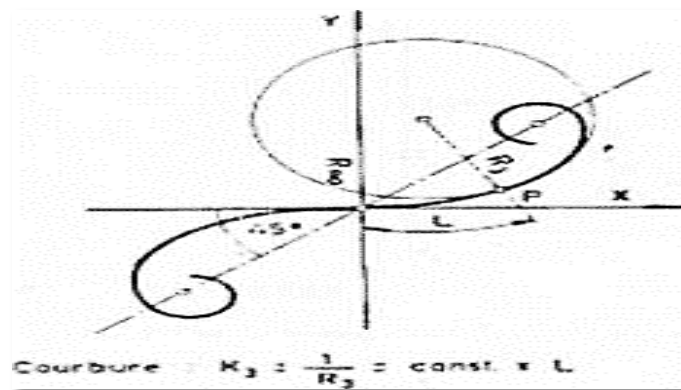


Figure IV.11. Courbe de raccordement clothoïde

• Choix entre ces 3 courbes de raccordements

En principe, on peut utiliser l'une ou l'autre de ces courbes de raccordement dans le tracé des routes. Reportées sur un même graphique, les trois courbes citées sont très semblables pour le tronçon voisin de l'origine des coordonnées ; le piquetage sur le terrain d'un tel tronçon ne donnerait que quelques cm de différence entre les trois courbes. La parabole cubique diffère peu de la clothoïde jusqu'à un angle de tangente de 15° , tandis que pour la lemniscate c'est jusqu'à 30° . On démontre, qu'on négligeant certains termes des développements en séries et pour des angles polaires faibles (jusqu'à 4 à 5°), les trois courbes peuvent être définies par la seule équation :

$$Y = \frac{X^3}{6RL} \quad (\text{IV.28})$$

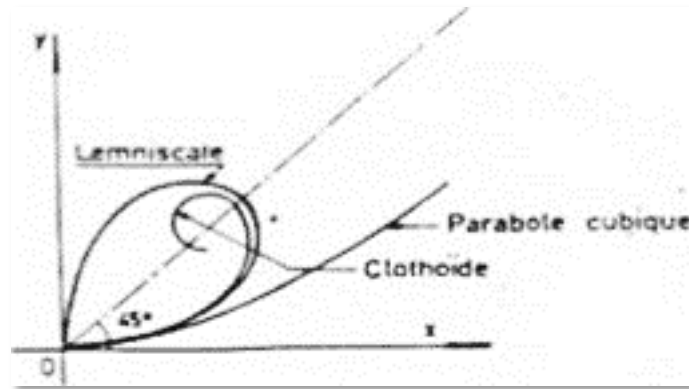


Figure IV.12. Comparaison des 3 types de courbe de raccordement

IV.3.3.3. Clothoïde

Étant théoriquement la courbe de raccordement idéale, la clothoïde est la seule courbe qui sera appliquée dans les projets de route.

La clothoïde est une spirale, dont le rayon de courbure décroît d'une façon continue dès l'origine (ou point d'inflexion) où il est infini jusqu'au point asymptotique où il est nul (sur la bissectrice des coordonnées).

Elle possède deux branches symétriques par rapport à l'origine.

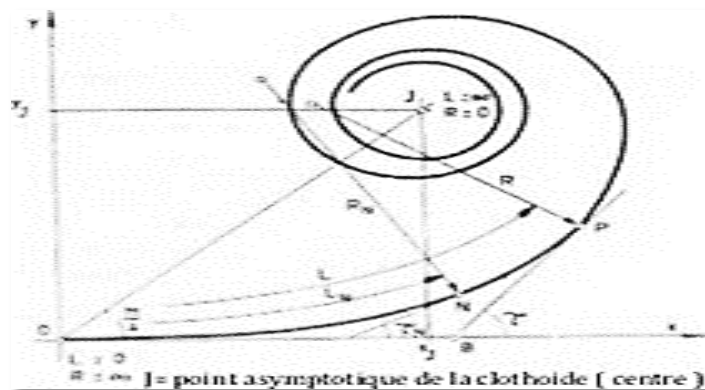


Figure IV.13. Courbure de la clothoïde

La courbure de la clothoïde est linéaire par rapport à la longueur de l'arc. Grâce à cela, si l'on relie par exemple deux cercles différents entre eux par un arc de clothoïde aux points de contact, non seulement les tangentes sont confondues, mais également les centres de courbures.

Parcourue à vitesse constante, la clothoïde maintient constante la variation de l'accélération transversale, ce qui est très avantageux pour le confort des usagers. La variation constante de la courbure de la clothoïde correspond pour le conducteur à une rotation constante de son volant (valable pour $R < 1000$ m ; pour de plus grands rayons, la trajectoire est de toute façon polygonale).

La clothoïde, si elle est bien choisie, satisfait également aux exigences d'esthétique et de confort optique (perspective)

- **Expression mathématique de la clothoïde**

Courbure K linéairement proportionnelle à la longueur curviligne L.

$$\Rightarrow K=C.L ; K=\frac{1}{R}=L.R \Rightarrow \frac{1}{R}=C.L$$

Pour l'homogénéité de la formule, on pose : $\frac{1}{C}=A^2$

Équation fondamentale :

$$LR = A^2 \quad (IV.29)$$

En un point P considéré de la clothoïde :

R : rayon de courbure en ce point (rayon de cercle osculateur)

L : longueur le long de la courbe entre l'origine et P.

A : paramètre

$$\text{À l'origine : } L=0 \Rightarrow R=\frac{A^2}{0}=\infty$$

Dès l'origine, L augmente, R diminue, on a une spirale. Le point J est un point asymptotique sur la bissectrice d'axes de coordonnées :

$$R=0 ; L=\infty$$

Chaque valeur du paramètre A définit une certaine clothoïde, autrement dit à chaque paramètre correspond une seule clothoïde. En faisant varier A, on obtient une famille de clothoïdes homothétiques, soit géométriquement semblables entre elles.

IV.3.3.4. Choix de la clothoïde- clothoïde minimum

Choisir une clothoïde revient à choisir son paramètre A. Des quatre conditions justifiant l'emploi des courbes de raccordement, c'est généralement la condition de confort qui est déterminante (pour $V_b < 80$ Km/h), autrement dit celle qui exige la plus longue courbe de raccordement.

Mais il y a lieu de vérifier en outre la condition dite : transition de la forme de la chaussée, appelée aussi : condition de « gauchissement ».

Enfin la quatrième condition du « tracé optique » passera dans certains cas avant les deux précédentes pour imposer les limites au paramètre A (grands rayons des autoroutes par exemple).

La clothoïde est définie par une seule donnée : - soit sa longueur L, - soit son paramètre A. Le choix d'une clothoïde doit respecter les conditions suivantes :

a) Condition optique

La clothoïde doit aider à la lisibilité de la route en annonçant le virage ; la rotation doit être $\geq 3^\circ$ pour être perceptible à l'œil.

$$T \geq \frac{1}{18} \text{ rad } (3^\circ) \Rightarrow \frac{L}{2R} \geq \frac{1}{18}$$

$$\Rightarrow L \geq \frac{R}{9}$$

$$\text{soit : } A \geq \frac{R}{3}$$

$$A_{\min} = \frac{R}{3} \quad (\text{IV.30})$$

$$A_{\max} = R \quad (\text{IV.31})$$

- Règles générales (B40) Normes techniques d'aménagement des routes

- ♦ Pour tout rayon < 1500 m, le ripage $\Delta r = 1$ m (éventuellement 0,5 m) :

$$L = \sqrt{(24 \cdot R \cdot \Delta R)} \quad (\text{IV.32})$$

- ♦ $1500 < R \leq 15\,000$ m :

$$L = \frac{R}{9} \quad (\text{IV.33})$$

- ♦ $R > 15\,000$ m Δr limité à 2,50 m soit :

$$L = 7.75\sqrt{r} \quad (\text{IV.34})$$

✓ Exemple :

Route $V=80$ km/h ; $R=250$ m ; $d=7\%$

$$\Rightarrow L = \sqrt{(24 \cdot 250 \cdot 0,5)} = 54,77 \text{ m}$$

b) Condition de confort dynamique

Dans un virage de rayon R et de dévers d , les roues du véhicule sont soumises à des forces de frottement transversal de résultante F .

Condition de Stabilité : $P \cdot d + F \geq 0$

$$\Rightarrow F \geq \frac{mv^2}{R} - mg \cdot \Delta d$$

$$\Rightarrow F \geq m \left(\frac{v^2}{R} - g \cdot \Delta d \right) \quad (\text{IV.35})$$

C'est l'introduction trop brutale de la force F qui est dangereuse pour la stabilité du véhicule et inconfortable pour l'utilisateur.

La condition de confort dynamique consiste donc à limiter pendant le temps de parcours Δt du raccordement, la variation, par unité de temps, de l'accélération transversale.

Cette variation est limitée à une fraction de l'accélération de pesanteur

$$K.g = \frac{g}{0,2 V_b} \quad (\text{IV.36})$$

c) Condition de gauchissement

Le raccordement doit assurer à la route un aspect satisfaisant dans les zones de variation de dévers. À cet effet on limite la pente relative du profil en long du bord de la chaussée déversée et de son axe, qui consiste à limiter pendant le temps de parcours du raccordement, la variation, par unité de temps, du dévers de la demi- chaussée extérieure au virage. Cette variation est limitée à 2% par seconde

$$L \geq \frac{1}{50} \Delta d.V \quad (\text{IV.37})$$

Δd : différence de dévers en %

V : en km/h limité à 100

L : Distance axe de rotation - bord de chaussée

✓ Exemple :

Route $V=80$ km/h , $R= 250$ m , $d=7\%$

$$L > \frac{3,5}{50} 9,5\% \times 80 = 53,2 \text{ m}$$

- *Formes de clothoïde appliquées au tracé en plan*

- **Cas élémentaire** : Clothoïde raccordant un alignement à un arc de cercle.

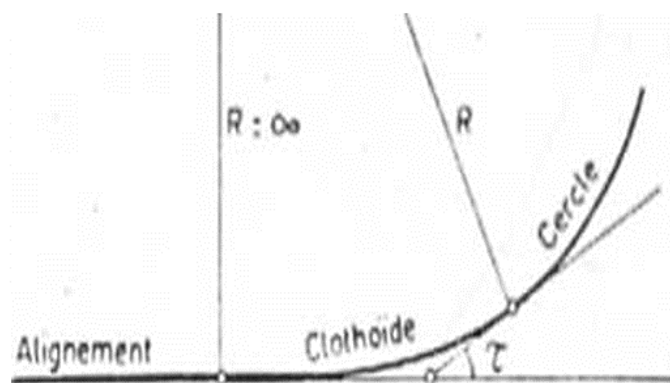


Figure IV.14. Raccordement d'un alignement à un rayon

Cas 1 : Deux alignements et un arc de cercle raccordé par deux branches de clothoïde

Données : - Changement de direction α

- Vitesse de base V_b

À choisir : - Rayon du cercle R (éventuellement $R_{\min}$ en fonction de V_b)

- Paramètre A en fonction de V_b

Calcul : - Longueur de la clothoïde :
$$L = \frac{A^2}{R} \quad (\text{IV.38})$$

- Décalage du cercle :
$$\Delta r = \frac{L^2}{24R} \quad (\text{IV.39})$$

- Ordonnée :
$$y = \frac{L^2}{6R} \quad (\text{IV.40})$$

Les paramètres des deux branches de clothoïde sont généralement identiques. S'ils étaient différents, ils devraient rester aussi voisins que possible, dans la proportion de 1 : 1,5.

Si l'angle α de changement de direction est inférieur à 70° , il y a lieu d'augmenter le rayon minimum donné par la vitesse de base.

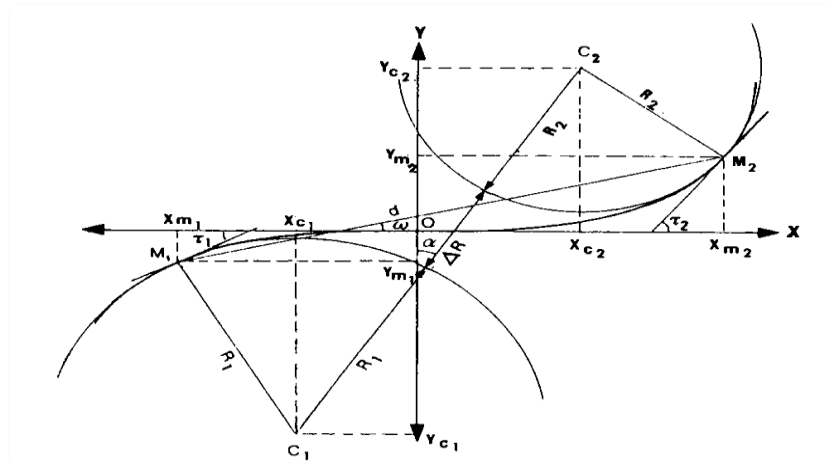


Figure IV.15 : Raccordement de deux alignements à un rayon

- Cas particuliers du précédent : Courbe à sommet

Si la longueur circulaire diminue, à la limite le cercle se réduit à un point = cercle osculateur de rayon R_o . Les deux branches de clothoïde se rejoignent, avec une tangente commune au point de jonction (sommet), situé sur la bissectrice de l'angle entre les deux alignements. On obtient une clothoïde à sommet ou clothoïde de transition.

Les deux branches peuvent avoir le même paramètre ou deux paramètres différents, voisins l'un de l'autre.

Le rayon R_o du cercle osculateur doit être au moins 1,4 fois plus grand que le rayon minimum dicté par la vitesse de base.

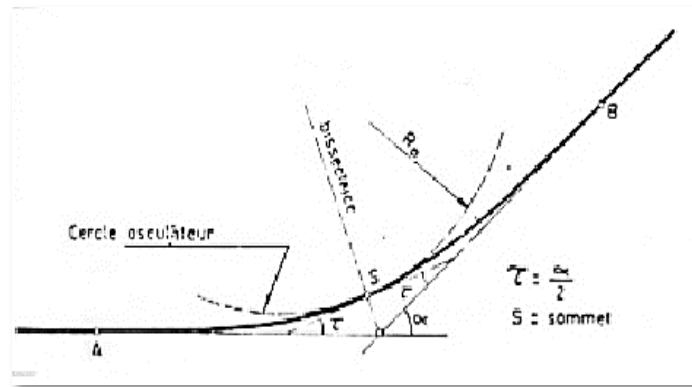


Figure IV.16. Raccordement de deux alignements par deux branches de clothoïde

Cas 2 : Courbe en S

On élimine tout alignement intermédiaire (raisons d'ordre dynamique et esthétique). On raccorde au moyen d'un seul arc de clothoïde avec un point d'inflexion.

Les deux branches de clothoïde pourraient avoir des paramètres différents et si c'était le cas ils devraient rester dans la proportion 1 : 1,5

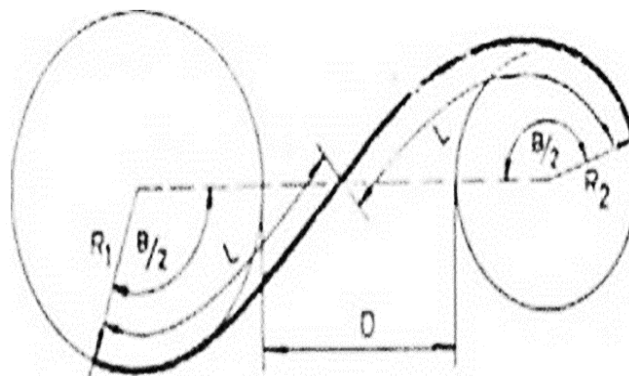


Figure IV.17. Raccordement de deux arcs de sens contraire par un seul arc de clothoïde

Cas 3 : Raccordement de deux arcs de cercle de même sens par une courbe en ovale

Cercles de rayons différents, de centres différents, l'un contenant l'autre. Cette disposition de tracé est à proscrire pour une raison d'ordre dynamique.

En cas de nécessité : $\frac{R_1}{3} < A < R_1$; $R_2 < R_1$

Données : R_1, R_2, D

Calcul : - Paramètre A

- Longueur arc $\sin \frac{B}{2}$

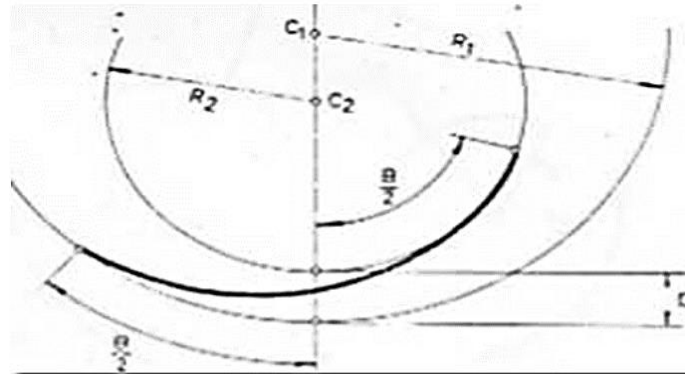


Figure IV.18. Raccordement de deux rayons (l'un intérieur à l'autre) par une courbe en ovale.

Cas 4 : Raccordement de deux arcs de cercle de même sens, les cercles étant extérieurs l'un à l'autre ou sécants : courbe en C

Il est nécessaire d'utiliser un cercle auxiliaire de rayon R_3 contenant les deux autres cercles, après quoi on applique deux fois le cas 3 précédent. Ce cas peut rendre service lorsque l'on veut éviter le désagrément d'avoir un court alignement entre deux arcs de cercle de même sens.

Données : R_1, R_2, D

Calcul : - Paramètre A - Longueur arc $\frac{B}{2}$

Condition : $\frac{R_3}{3} = A_1 = R_1$; $\frac{R_3}{3} = A_2 = R_2$

A_1 et A_2 restent dans la proportion 1:1,5

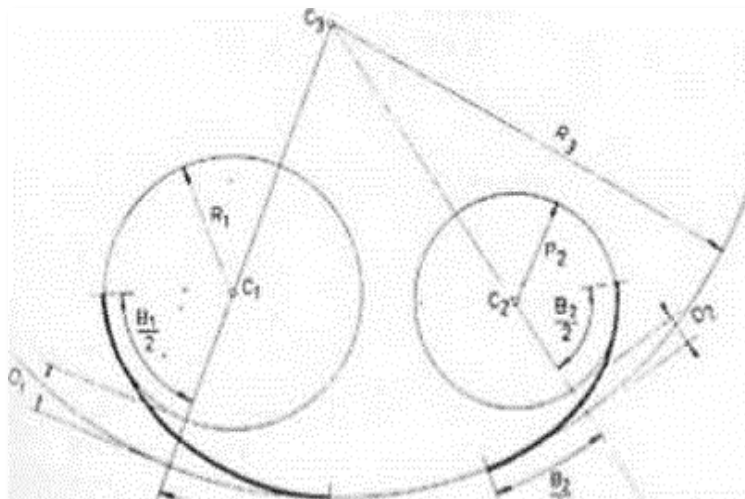


Figure IV.19. Raccordement de deux rayons (l'un extérieur à l'autre) par une courbe en C

IV.3.4. Représentation schématique des variations de courbure, forme de la chaussée, accélération transversale

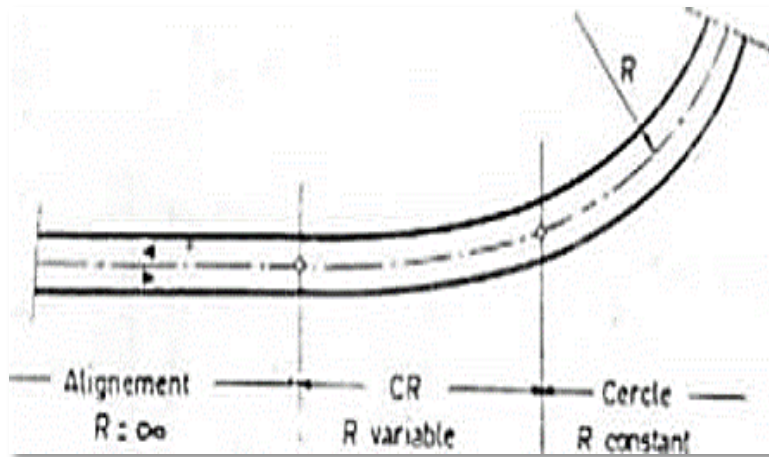


Figure IV.20.a. Représentation schématique de tracé en situation

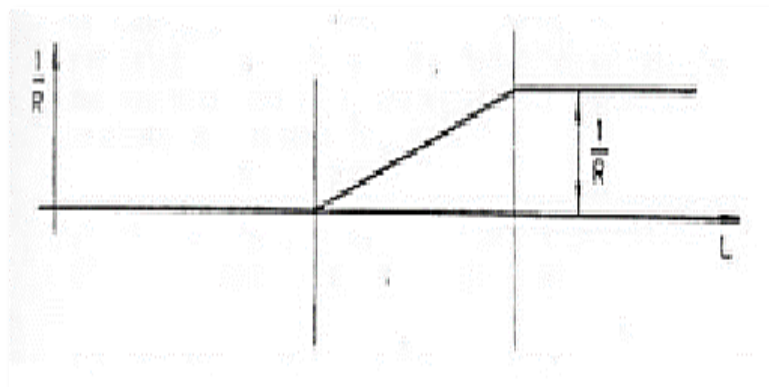


Figure IV.20.b. Représentation schématique de variation de la courbure

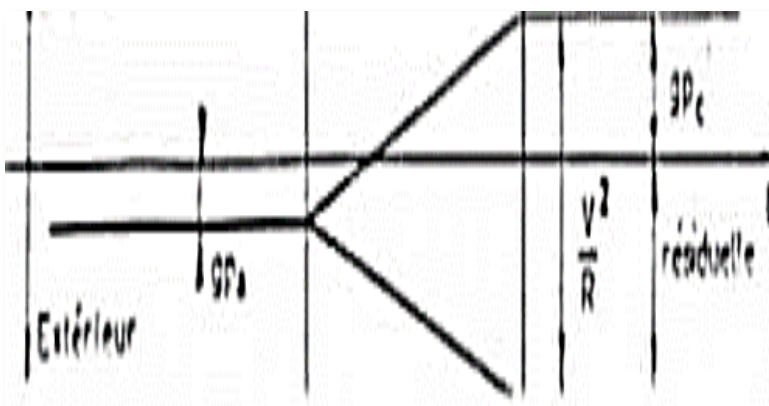


Figure IV.20.c. Représentation schématique de variation de la forme superficielle de la chaussée

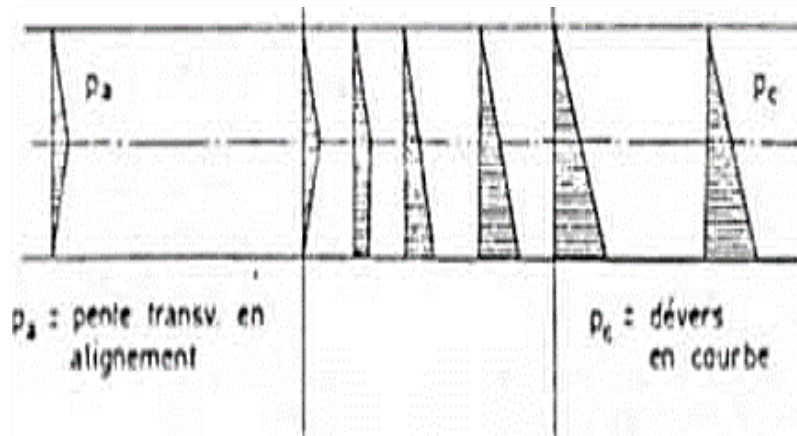


Figure IV.20 .d. Représentation schématique de variation de l'accélération transversale pour la voie extérieure (tourner à gauche).

IV.4. Profil en long

Le profil en long est une coupe verticale passant par l'axe de la route, développée et représentée sur un plan à une certaine échelle (n'est pas une projection horizontale).

Dans le cas des autoroutes, dont les deux chaussées unidirectionnelles sont séparées par un terre-plein central, le profil en long déterminant est une coupe par le milieu du terre-plein (axe de référence). Le niveau de l'autoroute en cet endroit est la moyenne entre les niveaux des bords intérieurs des chaussées. Si les deux chaussées ne sont pas symétriques, on considérera chacune d'elles indépendamment avec son propre profil en long, placé au milieu de chaque chaussée [23].

Une autre conception consiste à considérer le profil en long théorique au droit des bords intérieurs des chaussées unidirectionnelles.

L'échelle des longueurs (en abscisse) est en général celle du plan de situation, tandis que l'échelle des hauteurs (en ordonnées) est généralement 10 fois plus grande pour accuser les déclivités qui sans cela seraient presque imperceptibles. Le profil en long est donc une représentation déformée.

■ Éléments géométriques du profil en long

- Lignes droites (déclivités).
- Arcs de cercle tangents aux droites, constituant les raccordements verticaux (convexes et concaves).

Les droites ascendantes dans le sens du kilométrage sont appelées « Rampes », les descendantes « Pentes ». Rampes et pentes constituent les déclivités, exprimées en rampes avec signe +, pente avec signe -.

Changement de déclivité : m = différence de deux déclivités successives munies de leur signe.
 Les changements de déclivité sont en réalité très faibles.

Exemple : Rampe + 5% = angle 3° (sur horizontale)

Pente - 5% = angle 3°

$m = 10\%$ = angle 6°

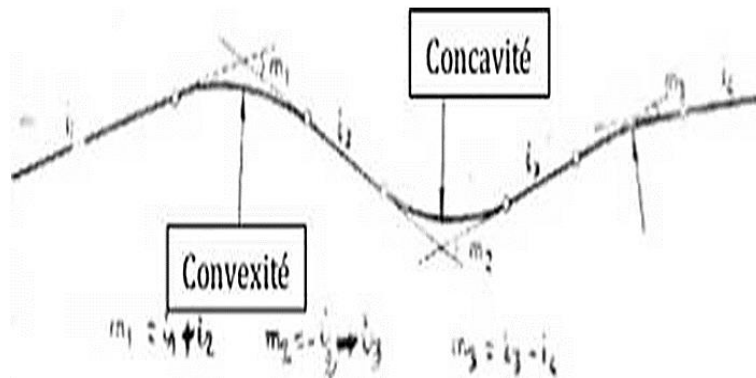


Figure IV.21. Éléments géométriques du profil en long

IV.4.1. Déclivités

- Déclivité minimum

Les tronçons de route absolument horizontaux, dits « en palier » sont si possibles à éviter, pour la raison de l'écoulement des eaux pluviales. La pente transversale seule de la chaussée ne suffit pas, il faut encore que l'eau accumulée latéralement s'évacue longitudinalement avec facilité par des fossés ou des canalisations ayant une pente suffisante.[45]

Déclivité minimum : $i_{\min} = 0,5 \%$, de préférence 1%

- Déclivité maximum

Du point de vue technique, la déclivité maximale dépend de l'adhérence entre pneus et chaussée, ainsi que la réduction des vitesses qu'elle provoque. Le problème de l'adhérence concerne tous les véhicules, tandis que pour la réduction des vitesses ce sont les camions (poids lourds) qui sont déterminants, car la plupart des VP ont une grande réserve de puissance.

Remarquons encore que les poids lourds modernes sont munis de dispositifs de freinage puissants, leur permettant de descendre des pentes importantes. La seule restriction est que ces pentes ne soient pas trop longues ; (maximale 1,5-2 km). Par conséquent, on peut se contenter de n'analyser que la question déterminante de la rampe maximum [45].

Dans le cas d'une route à deux voies, dont les deux sens de circulation sont sur la même chaussée, il est évident que l'on n'a pas à distinguer entre rampes et pentes, mais lorsque les

sens de circulation sont séparés, comme dans une autoroute, il peut y avoir intérêt à adopter des profils en long différents pour chacune des chaussées à sens unique, en adoucissant les rampes au détriment des pentes.

Il faut éviter dans la mesure du possible, sur un itinéraire, de consentir une déclivité locale exceptionnellement forte, qui constituerait une sorte de « bouchon » pour les poids lourds et réduirait considérablement la capacité de tout l'itinéraire.

Tableau IV.10. Valeur de la déclivité maximale (B40)

V_B(Km/h)	40	60	80	100	120	140
I_{max}(%)	8	7	6	5	4	4

- Rampe économique

Bien que les camions soient capables de gravir des rampes de l'ordre de 10 à 20 %, ils ne le font qu'à très faibles vitesses et moyennant une forte consommation de carburant.

L'augmentation excessive d'une rampe a les inconvénients suivants, plus ou moins dépendants les uns des autres :

- effort de traction considérablement accru ;
- consommation de carburant excessive ;
- faible vitesse ;
- coût élevé du transport ;
- gêne du trafic.

La rampe maximum admissible n'est donc plus une simple question technique, c'est un problème économique complexe.

On ne peut d'ailleurs pas considérer isolément une rampe, car l'énergie consommée dépend d'une quantité de facteurs (valeur de la rampe, sa longueur, possibilité de lancement du camion, gêne du trafic, profil en fin de rampe, remise en vitesse par gravité, etc..).

A chaque type de véhicule correspond une certaine rampe économique, qui dépend de l'effort de traction, de la résistance au roulement et notamment de la longueur de la rampe.

La question se pose en fait de la façon suivante : « de combien une rampe donnée renchérit-elle les frais de traction d'un véhicule donné ?

L'étude théorique de la rampe économique revient à rechercher un compromis entre le coût de la construction et les frais supplémentaires d'exploitation à long terme.

- *Déclivités pratiques maximum*

Elles résultent de la combinaison des facteurs suivants :

- conditions d'adhérence les plus défavorables ;
- comportement des PL (vitesse minimum) ;
- conditions économiques (coût des transports, coût de construction).

En ce qui concerne le comportement des poids lourd, les rampes à choisir doivent permettre aux PL de circuler à la vitesse minimum suivante :

Sur toutes les routes ordinaires : $V_{\min} = V_b/3$ (IV.41)

Exceptionnellement sur autoroutes à deux voies : $V_{\min} = V_b/2$ (IV.42)

- *Déclivités dans les sinuosités*

Dans les alignements, la déclivité choisie se rapporte à l'axe de la chaussée. Dans une courbe en plan, il est nécessaire de considérer que le développement de la trajectoire du véhicule qui circule du côté intérieur d'une courbe est, pour les faibles rayons, nettement plus court que celui de l'axe, d'où la rampe réelle plus forte que celle de l'axe, où est situé le profil en long. Il est donc indiqué de réduire la rampe du profil en long dans les sinuosités prononcées, ceci d'autant plus qu'en courbe des sollicitations supplémentaires absorbent une part de l'énergie de traction [45].

Comme règle générale, on fera en sorte qu'au droit de la courbe, le bord intérieur de la route ne dépasse pas la rampe de part et d'autre de la sinuosité (lacet des routes de montagne). Pour les véhicules en descente en outre, une réduction de pente dans un virage serré évitera peut-être de devoir freiner, ce qui réduit le risque de dérapage.

- *Déclivité de la ligne de plus grande pente*

En un point d'une chaussée en déclivité, on a deux genres d'inclinaisons :

d : pente transversale pour l'écoulement de l'eau, respectivement dévers en courbe.

i : déclivité longitudinale.

La résultante de ces deux inclinaisons est q, dirigée obliquement par rapport à l'axe de la chaussée et déterminant le sens réel de l'écoulement de l'eau.

$$q = \sqrt{(i_2 + d_2)} \quad (IV.43)$$

La valeur de q est à contrôler, car s'il est trop fort, il y a risque qu'un véhicule glisse dans cette direction (par verglas).

Pour toutes les routes : $q_{\max} = 10\%$

Si q est trop grand, réduire i d'abord et non pas d , de façon que l'eau s'écoule plutôt latéralement et que le véhicule dispose du dévers nécessaire.

IV.4.2. Voie supplémentaire pour un véhicule lent

IV.4.2.1. Trafic dans les rampes

On a vu précédemment que les rampes maximum sont à choisir de façon que la vitesse des poids lourds ne descende pas en dessous de certaines limites, afin d'éviter les conséquences suivantes :

- formation de colonnes de véhicules et perte de rendement ;
- manœuvre de dépassement dangereux ;
- inhomogénéité de l'écoulement du trafic.

Mais lorsqu'il s'agit de longues rampes nécessitées par la topographie, l'application de ce principe peut conduire à une trop faible valeur de la rampe. On tourne alors la difficulté en maintenant la rampe adéquate et en éliminant du trafic principal les poids lourds sur une voie lente [21].

Il y a donc deux problèmes à étudier :

- vérifier que la rampe n'est pas trop longue ;
- si elle l'est, prévoir une voie lente ou des voies de dépassement.

Pour chacun de ces problèmes, on a besoin de définir les vitesses suivantes :

V_b : Vitesse de base du projet

V_r : Vitesse de régime : vitesse la plus élevée que peut maintenir un véhicule sur une rampe constante de longueur illimitée. Dépend du véhicule (type et poids) et de la valeur de la rampe. Les camions sont ici déterminants.

V_a : Vitesse d'accès : celle que le véhicule possède lorsqu'il aborde la rampe. Dépend de la déclivité précédant la rampe à étudier.

V_{min} : Vitesse minimum en rampe : celle qui correspond à un débit encore acceptable (possibilité moyenne des camions chargés). Dépend de la classe de la route et de la topographie.

V_{cr} : Vitesse critique : celle au-dessous de laquelle les camions ne réduisent pas trop le trafic et doivent être éliminés des voies principales.

VI.4.2.2. Longueur limite des rampes

Le projet prévoyant une certaine longueur pour une rampe de déclivité connue, il s'agit de calculer la vitesse qu'atteindra un camion au sommet de cette rampe, en utilisant les diagrammes de décélération, tenir compte d'une vitesse d'accès au pied de la rampe.

Si la vitesse atteinte au haut de la rampe est inférieure à la vitesse minimum $V_{\min}$, la longueur de la rampe est acceptable. Si ce n'est pas le cas, la longueur est limitée par la distance jusqu'où $V_{\min}$ est atteinte. Au-delà de ce point, la rampe doit être réduite (par exemple par interposition d'un palier) ou alors une voie lente est à envisager.

IV.4.2.3. Voie lente

Voie supplémentaire amenée dans une rampe, adjacente aux voies principales, destinée aux véhicules lents (camions, cars, voiture avec remorque).

Elle sert à maintenir sur la voie principale une vitesse rationnelle V_{cr} .

On a intérêt à éliminer les véhicules lents assez tôt pour ne pas freiner le trafic, d'où l'adoption de V_{CR} plus grand que $V_{\min}$.

$$V_{CR} = V_{\min} + 10 \quad (\text{IV.44})$$

La position de la voie lente se détermine au moyen des diagrammes de décélération, respectivement, d'accélération des poids lourds, en tenant compte d'une vitesse d'accès au pied de la rampe. La voie lente commence à l'endroit où le camion qui ralentit atteint la vitesse critique et elle finit lorsque le camion a repris de la vitesse et va dépasser V_{cr} .

Aux deux extrémités, la voie lente est munie de biseaux, dont la longueur correspond au parcours en 3 secondes, à la vitesse V_{CR} , soit 30 - 40 m.

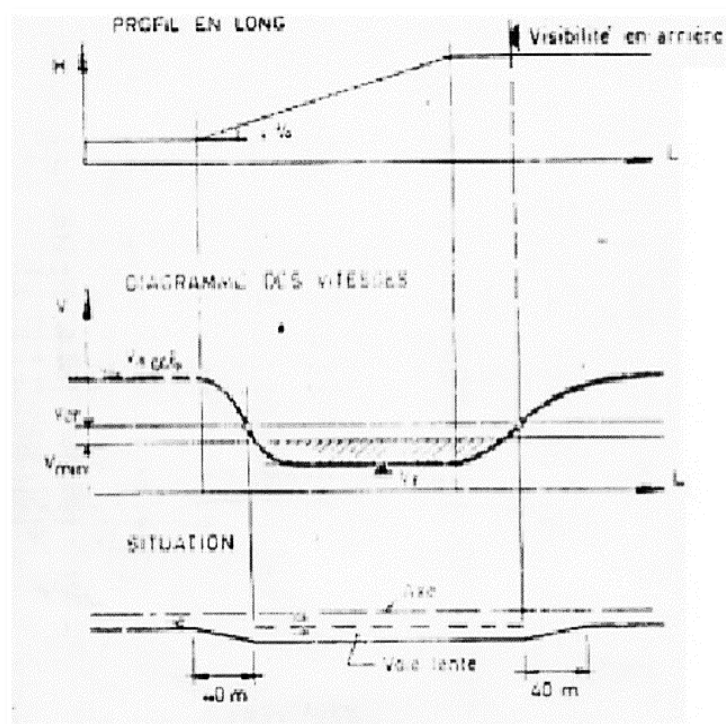


Figure IV.22. Aménagement d'une voie lente

L'emploi d'une voie lente dépend des facteurs suivants :

- valeur de la rampe ;
- longueur de la rampe ;
- proportion des PL ;
- volume du trafic ;
- visibilité pour dépasser ;
- possibilité de construction (terrain, financement).

Les voies lentes ne doivent pas être appliquées systématiquement ; éviter les voies lentes trop courtes, dangereuses au droit de la réintroduction des poids lourds dans le trafic principal (bonne visibilité vers l'arrière).

IV.4.2.4. Voie de dépassement

Les voies lentes se placent à l'extérieur de la chaussée normale. On peut les remplacer par des voies de dépassement placées entre les deux voies d'une route qui s'écarter sur un certain tronçon.

Pour les poids lourds, le passage sur la voie lente est obligatoire, tandis que le passage sur la voie de dépassement est libre, son usage est moins impératif, moins réglementé.

Les véhicules lents restent sur la voie droite, laissant la voie gauche libre pour les voitures qui veulent dépasser, en général avec dépassement interdit aux poids lourds.

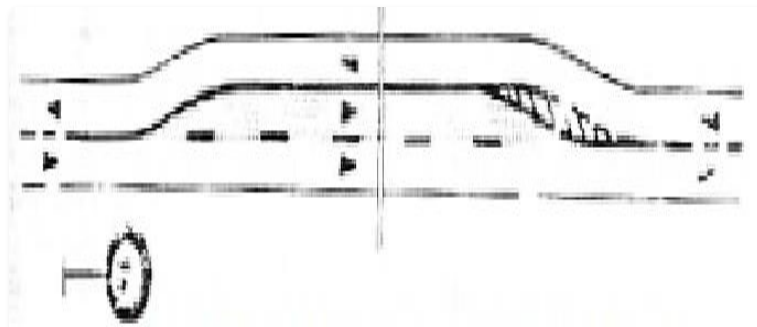


Figure IV.23. Aménagement d'une voie de dépassement

IV.4.3. Raccordements verticaux

Les changements de déclivités se font par l'intermédiaire d'un raccordement circulaire de grand rayon, tangent aux déclivités de part et d'autre.

L'emploi pour les raccordements verticaux d'une autre courbe que le cercle n'est pas exclu a priori. Il serait par exemple théoriquement convenable, pour éviter une discontinuité dans l'accélération verticale appliquée au véhicule, d'introduire progressivement la courbure du profil en long, comme on le fait en situation.

Mais pratiquement, comme de grands rayons verticaux sont imposés par la condition de visibilité et par l'esthétique, il n'y aurait que de minimes différences entre une clothoïde verticale par exemple et un arc de cercle vertical.

On distingue les raccordements verticaux convexes et concaves.

IV.4.3.1. Raccordements convexes

Leur rayon R_v doit satisfaire deux conditions :

- condition de confort ;
- condition de visibilité.

IV.4.3.1.1. Condition de confort

Lorsque le profil en long comporte une forte courbure convexe, le véhicule est soumis à une accélération verticale importante, qui modifie sa stabilité et gêne les usagers.

En faisant état d'une limite empirique encore supportable de cette accélération centripète, on calcule le rayon vertical correspondant ; l'accélération verticale :

$$\frac{V^2}{R_v} \text{ Limitée à : } \frac{g}{40} \quad (\text{catégorie 1 - 2})$$

$$\text{et à : } \frac{g}{30} \quad (\text{catégorie 3 - 4 - 5})$$

$$\frac{V^2}{R_v} < \frac{g}{40} \Rightarrow R_{v\min} = \frac{40 V^2}{g} \quad \text{avec} \quad v = \frac{V}{3.6} \quad \text{et} \quad g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$R_{v\min} = 0,3 V_b^2 \quad (\text{catégorie 1 - 2}) \quad (\text{IV.45})$$

$$R_{v\min} = 0,23 V_b^2 \quad (\text{catégorie 3 - 4 - 5}) \quad (\text{IV.46})$$

IV.4.3.1.2. Condition de visibilité

Un conducteur dont le rayon visuel ras le dos-d'âne doit voir, de l'autre côté, soit un obstacle, soit un véhicule, et cela assez tôt pour disposer d'une distance suffisante, soit pour s'arrêter, soit pour dépasser [44].

Connaissant la longueur de visibilité d , on calculera R_v minimum. Les déclivités de part et d'autre du dos- d'âne sont données par le projet.

d : distance de visibilité nécessaire

R_v : rayon du cercle de raccordement

h_a : hauteur de l'œil au-dessus de la chaussée = 1,10m

h_g : hauteur de l'obstacle = 0,10 - 0,20m (h_i)
= 1,20m (h_2)

$$d = d' + d'' \quad (IV.47)$$

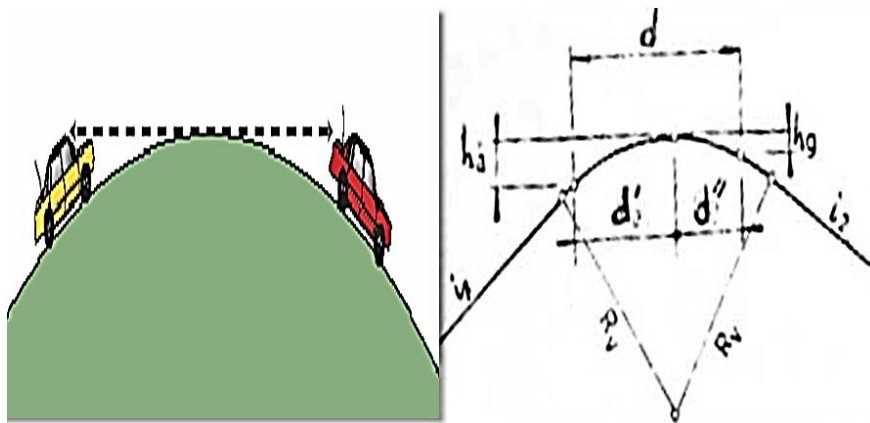


Figure IV.24. Visibilité en raccordement convexe

IV.4.3.2. Raccordements concaves

Ici pas de problème de confort et pas de condition de visibilité de jour ; en revanche : problème de visibilité de nuit pour les routes non éclairées.

Les phares du véhicule doivent éclairer un tronçon de longueur telle que le conducteur aperçoive un obstacle assez tôt pour disposer de la distance d'arrêt [44].

La distance de visibilité est ici toujours égale à la distance d'arrêt simple d , les véhicules venant en sens inverse étant bien visible de nuit.

d : distance de visibilité = distance d'arrêt d_n

R_v : rayon minimum du cercle de raccordement

h_a : hauteur des phares au-dessus de la chaussée 0,75m

ε : demi angle du pinceau lumineux (environ 1°)

m : changement de déclivité

$$m = i_1 - i_2 (\%) \quad (IV.48)$$

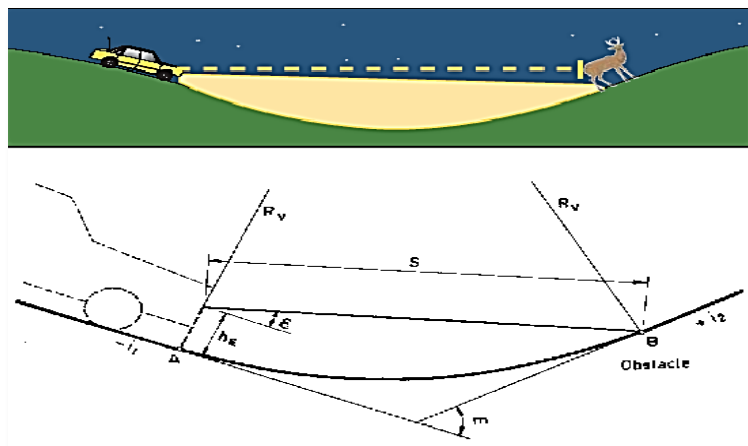


Figure IV.25. visibilité en raccordement concave

IV.5 Conclusion

Le respect de bonnes conditions de visibilité et la garantie d'une bonne lisibilité de l'itinéraire par l'usager imposent de veiller à une bonne coordination des éléments du tracé en plan et du profil en long. C'est la combinaison des deux éléments qui conditionnent l'image offerte réellement à l'usager et de ce fait est le paramètre déterminant vis-à-vis de son comportement.

À partir de ces éléments, il appartient au concepteur, dans le cadre général de la commande du maître d'ouvrage et des contraintes du projet (topographie, environnement, géotechnique, ouvrage d'art, coût), de chercher à satisfaire au mieux les exigences vu précédemment. Par ailleurs, afin d'appréhender le comportement mécanique des différentes couches constituant une chaussée souple, on s'intéresse dans le chapitre V suivant, à l'étude géotechnique, dont laquelle on présentera les différents essais utilisés dans la construction routière.

Chapitre V

Étude géotechnique

V.1. Introduction.....	86
V.2. Objectifs d’une étude géotechnique	86
V.3. Caractérisation du sol en place.....	86
V.3.1. Nécessité d’une classification spécifique.....	86
V.3.2. Classification des sols.....	87
V.3.2.1. Paramètres retenus pour la classification des sols	88
V.3.3. Classification des matériaux rocheux	89
V.3.4. Classification des sols organiques et sous-produits industriels.....	90
V.3.5. Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature	90
V.4. Moyens de reconnaissance	91
V.4.1. Étude des archives et documents existants	91
V.4.2. Visites sur le site et les essais in-situ.....	91
V.4.2.1. Reconnaissance in-situ.....	92
V.4.2.1.1. Le forages.....	92
V.4.2.1.2. Les méthodes géophysiques.....	93
V.4.2.2. Les essais in-situ.....	94
V.4.2.2.1. L’essai de plaque	94
V.4.2.2.2. L’essai préssiométrique	94
V.5. Essais de laboratoires	94
V.5.1. Essais d’identification.....	95
V.5.1.1. Caractéristiques physiques.....	95
V.5.1.2. Analyses granulométriques	96
V.5.1.3. Équivalent de sable.....	97
V.5.1.4. Limites d’Atterberg	98
V.5.1.5. Essai au bleu de méthylène (ou à la tache)	98
V.5.2. Essais Mécaniques.....	99

V.5.2.1. Essai Proctor	99
V.5.2.2. Essai C.B.R (California Bearing Ratio).....	101
V.5.2.3. Essai Los Angeles	103
V.5.2.4. Essai Micro Deval humide.....	103
V.5.2.5. Essai Marshall	104
V.5.2.6. Essais Duriez.....	105
V.6. Conditions d'utilisation des sols en remblais.....	106
V.7. Les Talus	106
V.7.1. Stabilité des pentes	106
V.7.2. Recommandation.....	106
V.8. Conclusion	107

V.1. Introduction

L'étude géotechnique est une science qui consiste à étudier les caractéristiques physiques et mécaniques des roches et des sols qui vont servir d'assise pour la structure de la chaussée. Pour cela, une mission de sondage doit être faite pour définir les caractéristiques du sol support, pour dimensionner la chaussée et éventuellement les fondations des ouvrages d'art prévus.

Cette étude doit d'abord permettre de localiser les différentes couches et donner les renseignements de chaque couche et les caractéristiques mécaniques et physiques du sol. L'exécution d'un projet routier nécessite une bonne connaissance des terrains traversés.

V.2. Objectifs d'une étude géotechnique

Afin d'appréhender le comportement du sol support / structure d'une chaussée, une campagne de reconnaissance géotechnique est élaborée conformément aux besoins du projet, et ce pour :

- dimensionner la structure de chaussée ;
- calculer les contraintes admissibles aux droits des fondations des ouvrages d'art et dalots ;
- étudier la stabilité des parois des talus de déblais et remblais importants, en préconisant par besoin les modalités de confortements ou de protections nécessaires à leur stabilité ;
- classer les matériaux issus des déblais, et des gites d'emprunts, selon le guide GTR, pour leur éventuelle réutilisation en remblai, couche de forme et structure de chaussée ; avec estimation de leur volumes [18].

V.3. Caractérisation du sol en place

V.3.1. Nécessité d'une classification spécifique

Les différents systèmes de classifications géotechniques des sols et des matériaux rocheux proposés jusqu'à présent ont été établis avec le souci de servir l'ingénieur dans l'ensemble des différents domaines du Génie Civil où ces matériaux sont concernés (ouvrages en terre, fondations, stabilité des pentes, assises de chaussée ou élaboration des granulats...).

Cette recherche d'universalité s'est avérée trop ambitieuse car la complexité des comportements des sols fait que les propriétés qui sont significatives pour un certain usage ne sont souvent plus les mêmes dès que l'on s'intéresse à un autre usage. Ceci conduit alors à rechercher des classifications spécifiques à chaque grand domaine d'utilisation de ces matériaux.

Tout sol ou matériau rocheux peut être rangé selon un système de classification dès lors que les valeurs des paramètres sur lesquels il s'appuie sont connues et que les essais permettant de les déterminer sont reconnus significatifs sur le sol ou le matériau rocheux considéré [40].

La classification des sols reste cependant axée sur les conditions de réutilisation et en particulier, ne rend pas compte des problèmes liés aux difficultés d'extraction.

V.3.2. Classification des sols

Les sols sont des matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables : des argiles aux blocs.

Les sols sont de nature et d'origine géologique diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires, sols résiduels ...

Les sols ayant une teneur en matières organiques supérieure à 3 %, sont classés à part en classe F avec les sous-produits industriels.

La classification des sols pour usages techniques de la construction permet de définir diverses classes de matériaux selon :

- leur classe granulaire ;
- leurs caractéristiques plastiques ;
- leurs composants organiques.

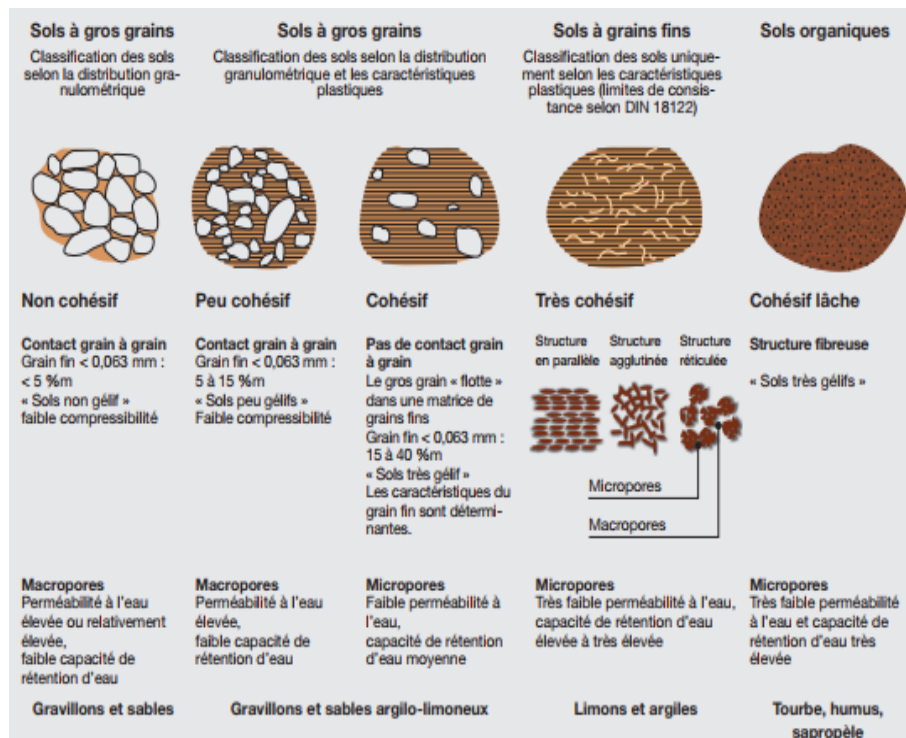


Figure V.1. Classification des sols

V.3.2.1. Paramètres retenus pour la classification des sols

Les paramètres retenus se rangent en trois catégories :

- paramètres de nature ;
- paramètres de comportement mécanique ;
- paramètres d'état.

Ils sont toujours déterminés sur la fraction 0/50 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels [30].

- *Paramètres de nature*

Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre (la granularité et l'argilosité).

- *Paramètres de comportement mécanique*

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui de ce fait peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières (traitement...).

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont : les coefficients Los Angeles (LA) (norme P 18-573) et micro-Deval en présence d'eau (MDE) (norme P 18-572), mesurés sur la fraction granulaire 10/14 (ou à défaut sur la fraction 6,3/10) et le coefficient de friabilité des sables (FS) mesuré sur la fraction 0/1 ou 0/2 mm (norme P 18-576).

- *Paramètres d'état*

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol mais fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique : son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

➤ *Différents états hydriques considérés*

Cinq états hydriques sont distingués dans la présente classification :

- L'état "très humide" (th) : C'est un état d'humidité très élevé ne permettant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques actuelles.

- L'état "humide" (h) : C'est un état d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, remblais de faible hauteur...) estimées comme normales dans les conditions technico-économiques courantes actuelles.

- L'état d'humidité "moyen" (m) : C'est l'état d'humidité optimum (minimum de contraintes pour la mise en œuvre).

- L'état "sec" (s) : C'est un état d'humidité faible mais autorisant encore une mise en œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, surcompactage...) estimées comme normales dans les conditions technico - économiques courantes actuelles.

- L'état très sec (ts) : C'est un état d'humidité très faible n'autorisant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques courantes actuelles.

V.3.3. Classification des matériaux rocheux

Bien qu'après son extraction, un déblai rocheux soit transformé en un matériau susceptible d'être considéré, au moins partiellement, comme un sol meuble, il faut au préalable être en mesure de prévoir, à partir de la roche en place, le comportement du matériau après abattage. Ce besoin a conduit à établir un classement des matériaux rocheux sur la base de leur nature géologique, de résultats d'essais (fragmentabilité, dégradabilité, masse volumique... pratiqués sur des prélèvements représentatifs) et de l'expérience que l'on possède de leur comportement au cours des différentes phases du terrassement [40].

Pour caractériser un massif rocheux en vue de son emploi en remblai ou en couche de forme, le géotechnicien est donc conduit à procéder en deux temps :

- la première étape consiste à identifier, au moins sommairement, la nature pétrographique de la roche en s'appuyant principalement sur la documentation et le raisonnement géologique. Cette identification apporte déjà des informations importantes d'ordre qualitatif sur les caractères généraux de la roche et son comportement prévisible ; toutefois, cette première identification est en général insuffisante pour renseigner le projeteur sur les possibilités réelles d'utilisation du matériau,

- la seconde étape vise à préciser comment le matériau va se comporter tout au long des phases successives : extraction, chargement, régalaage, compactage sous la circulation des engins lourds et sous la pluie, et s'il risque encore d'évoluer, une fois l'ouvrage en service, sous l'action des contraintes mécaniques, de l'eau ou du gel. Il s'agit là d'une opération complexe qui exige que le géotechnicien dispose d'une description précise du massif et qu'il ait une bonne connaissance des différentes techniques d'extraction et de mise en œuvre afin de pouvoir évaluer leurs effets sur le comportement du matériau .

Ce n'est qu'au terme de cette seconde étape qu'il peut communiquer au projeteur les données utiles à l'évaluation des possibilités d'emploi des matériaux issus d'un déblai rocheux : granularité obtenue, comportement sous trafic, caractère évolutif. Il faut toutefois admettre qu'une part d'incertitude existera toujours du fait que ces données résultent d'hypothèses dont la fiabilité dépend de nombreux facteurs (compétence et expérience du géotechnicien, complexité géologique du site, moyens et délais d'étude disponibles...).

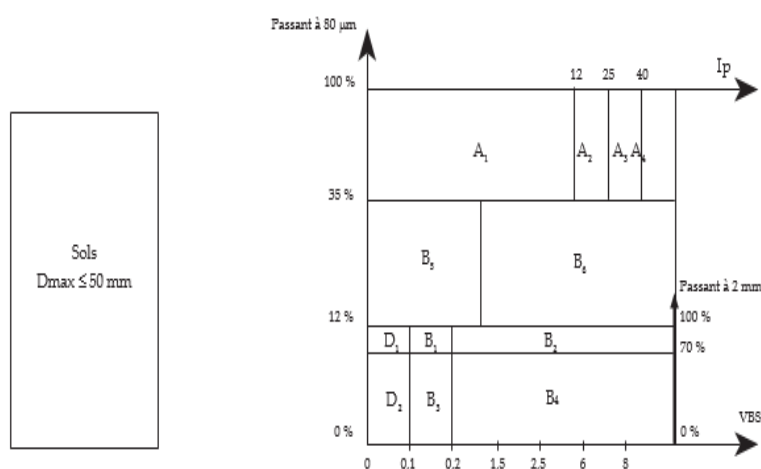
V.3.4. Classification des sols organiques et sous-produits industriels

Cette dernière catégorie concerne des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai et en couche de forme peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois très divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée.

La classification proposée a été établie à partir du recensement des principales familles de matériaux de cette catégorie, susceptibles d'être concernées par une utilisation en remblai ou en couche de forme. On a ainsi dénombré neuf familles (sous-classes F1 à F9). Chacune d'elles est caractérisée par le (ou les) paramètre(s) duquel (ou desquels) dépendent les possibilités d'emploi. Lorsque l'expérience actuelle est suffisante, des valeurs seuils de ces paramètres sont proposées, permettant d'établir des distinctions à l'intérieur d'une même famille [40].

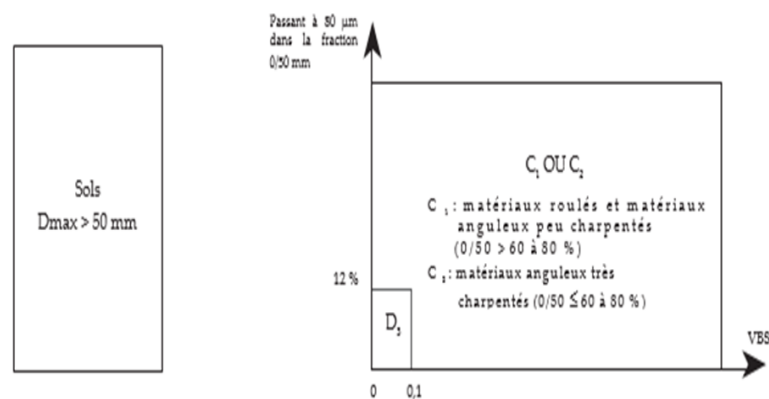
V.3.5. Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

Tableau V.1. Classification des matériaux



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R_1
			Calcaires	R_2
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pelites...	R_3
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...	R_4
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers...		R_5

Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels	F
------------------------	--	---



V.4. Moyens de reconnaissance

Les moyens de la reconnaissance d'un tracé routier sont essentiellement :

- l'étude des archives et documents existants ;
- le travail de terrain (visites de site et essais in situ) ;
- les essais de laboratoire.

V.4.1. Étude des archives et documents existants

Les études antérieures effectuées au voisinage du tracé sont source précieuse d'informations préliminaires sur la nature des terrains traversés.

Les cartes géologiques et géotechniques de la région, lorsqu'elles existent, peuvent aussi apporter des indications assez sommaires mais tout aussi précieuses pour avoir une première idée de la nature géologiques et géotechniques des formations existantes.

V.4.2. Visites sur le site et les essais in-situ

Les visites sur site permettent de vérifier et de préciser les informations déjà recueillies sur les documents existants. Cependant, la connaissance précise des caractéristiques des sols en présence nécessite des investigations in-situ permettant :

- de mesurer certaines caractéristiques en place ;
- et/ou prélever des échantillons pour les besoins d'essais de laboratoire.

V.4.2.1. Reconnaissance in-situ

La première reconnaissance visuelle, permet d'arrêter un premier programme de reconnaissance in-situ en fonction des sols rencontrés et des problèmes géotechniques pressentis.

Le programme peut comprendre une gamme assez variée d'investigation que l'on présentera brièvement dans ce qui suit :

V.4.2.1.1. Le forages

C'est le seul moyen précis pour reconnaître l'épaisseur et la nature des couches des sols en présence, on y prélève généralement des échantillons de sols remaniés ou intacts pour les besoins d'essais de laboratoire.

Les forages permettent aussi de reconnaître le niveau des nappes éventuelles et le suivi de leur niveau à l'aide de types piézométrique [3]. Ils peuvent être réalisés :

Manuellement : ce sont des puits creusés à la main ou à la pelle mécanique, la profondeur ne dépasse pas 3 à 4m. Ils permettent la reconnaissance visuelle directe des parois du puits et le prélèvement d'échantillons intacts et/ou remaniés.

À la tarière : la tarière est un outil hélicoïdal que l'on enfonce dans le sol et qui permet de remonter en surface les terrains traversés à l'état remanié. La profondeur de la reconnaissance est limitée à une dizaine de mètres et la nature de sols est identifiée visuellement.



Figure V.2. Tarière électrique

À la sondeuse : on peut atteindre plusieurs dizaines de mètres de profondeur en utilisant des tubes carottiers et couronnes diamantées. Les couches de sols sont identifiées visuellement, des échantillons intacts ou remaniés sont prélevés pour les essais de laboratoire.



Figure V.3. Sondeuse

V.4.2.1.2. Les méthodes géophysiques

Prospection sismique : le principe consiste à mesurer la vitesse de propagation des ondes primaires ou ondes P (les plus rapides) et à en déduire la nature du sol traversé [20]. Le tableau 5.2, présente les valeurs de vitesses d'onde P, en fonction de la nature du sol.

Tableau V.2. Valeurs de vitesses d'ondes P en fonction de la nature du sol

Nature du sol	Vitesse (m/s)
Argiles et limons	400-800
Sables et gravies	300-1200
Roches altérés	800-2500
Roches massives	200-6000

Ces méthodes permettent de déterminer de façon approximative l'épaisseur des différentes couches et leur nature, elles ne s'appliquent pas dans le cas de fortes teneurs en eau.

Prospection électrique : Cette méthode est basée sur la mesure de la résistance électrique d'un volume de sol entre deux électrodes placées en surface, elle permet de connaître les différentes couches de sols et leurs épaisseurs, et en général de contrôler l'homogénéité des terrains.

V.4.2.2. Les essais in-situ

V.4.2.2.1. L'essai de plaque

Ces essais permettront d'apprécier directement le module d'un sol par un essai sur le terrain, ils consistent à charger une plaque circulaire et à mesurer le déplacement vertical sous charge. On déduira ensuite un module de sol E en interprétant la valeur du déplacement mesuré à l'aide de la formule de Bossinesq qui relie (Z), le déplacement, la pression (q_0), le rayon de charge (a) et les caractéristiques du massif (E_2). Après plusieurs approches, on a abouti à l'approche suivante [20] : $E = 5 \text{ CBR}$.

V.4.2.2.2. L'essai préssiométrique

L'essai préssiométrique est un essai de chargement in situ effectué au sein même du terrain grâce à la réalisation préalable d'un forage. L'analyse des résultats permet d'obtenir, pour une profondeur donnée, les caractéristiques mécaniques du sol et d'effectuer les calculs de fondation [20].

Trois caractéristiques du sol sont notamment déduites :

- le module préssiométrique E_m qui définit le comportement pseudo-élastique du sol ;
- la pression limite P_l qui caractérise la résistance de rupture du sol ;
- la pression de fluage P_f qui définit la limite entre le comportement pseudo-élastique et l'état plastique.

V.5. Essais de laboratoires

Les essais réalisés en laboratoire sont :

- *Les essais d'identification :*
 - caractéristiques physiques ;
 - analyse granulométrique ;
 - équivalent de sable ;
 - limites d'Atterberg ;
 - essai au bleu de méthylène (ou à la tache).
- *Les essais mécaniques :*
 - essai Proctor ;
 - essai CBR ;
 - essai Los Angeles ;
 - essai Micro Deval ;
 - essai Marshall ;
 - essai Duriez.

V.5.1. Essais d'identification

V.5.1.1. Caractéristiques physiques

❖ Teneur en eau (w)

La norme NF P 94-050 (octobre 1991) a pour objet la détermination, à l'étuve, de la teneur en eau d'un matériau qui, est le rapport du poids de l'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On l'exprime en pourcentage par la formule :

$$w(\%) = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \quad (V.1)$$

❖ La masse volumique sèche (ρ_d)

La masse volumique sèche d'un matériau est déterminée selon la norme NF P94-064 (novembre 1993). Elle représente le rapport de la masse des particules de sol sec au volume total de la même masse de sol, y compris le volume des vides. On l'exprime par la formule :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad (V.2)$$

❖ Masse volumique des grains solides (ρ_s)

La norme NF P 94-054 (octobre 1991) a pour objet la détermination, de la masse volumique des grains solides de sol, qui est le rapport de la masse des particules de sol sec au volume de la même masse de sol sec.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (V.3)$$

❖ Indice des vides (e)

L'indice des vides permet de savoir si les vides sont importants ou non, c'est-à-dire, si notre matériau est dans un état serré ou lâche. Il est défini comme étant le rapport du volume des vides au volume des grains solides.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (V.4)$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi de la masse volumique des grains solides et de la masse volumique sèche selon la formule :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (V.5)$$

❖ Porosité (η)

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. C'est le rapport du volume des vides (c'est-à-dire du volume occupé par l'air, l'eau ou les deux fluides simultanément) au volume total du sol.

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (\text{V.6})$$

La porosité et l'indice des vides sont liés par la formule suivante :

$$\eta = \frac{e}{(e+1)} \quad (\text{V.7})$$

❖ *Degré de saturation (S_r)*

Le degré de saturation indique la quantité d'eau que contient le sol. C'est le rapport du volume occupé par l'eau au volume total des vides.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (\text{V.8})$$

Le degré de saturation peut être exprimé aussi par la formule suivante :

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \times \frac{w}{e} \quad (\text{V.9})$$

V.5.1.2. Analyses granulométriques (NF P 94- 040)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.



Figure V.4. Tamiseuse électrique.

Les résultats de l'analyse granulométrique seront traduits sous forme de courbe appelée courbe granulométrique. Cette dernière nous permet de déduire les coefficients C_u et C_c , suivants :

Le coefficient d'uniformité, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$: caractérise la pente de la courbe granulométrique.

Le coefficient de courbure, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$: traduit la forme plus ou moins régulière de la courbe.

avec :

D_{10} : diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés ;

D_{30} : diamètre correspondant à 30% des tamisats cumulés ;

D_{60} : diamètre correspondant à 60% des tamisats cumulés.

V.5.1.3. Équivalent de sable

La norme NF P-598 a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Il se fait sur des matériaux inférieurs à 5mm. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci, donné par la formule suivante :

$$ES (\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (V.10)$$

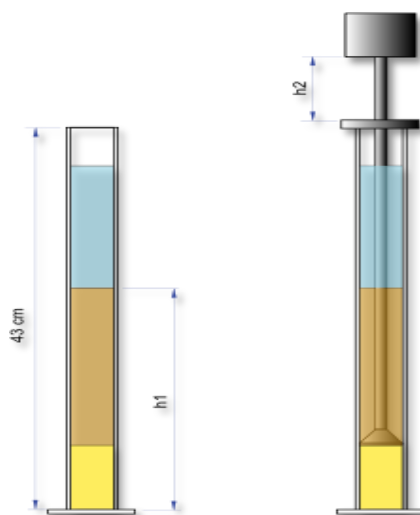


Figure V.5. Définition de l'équivalent de sable.

V.5.1.4. Limites d'Atterberg

La norme NF P94 – 051 (mars 1993) destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité au rouleau), s'applique aux sols dont les éléments ont une dimension inférieure à 0.4 mm.

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques, destinés à identifier un sol et à caractériser son état, au moyen de son indice de consistance. Ce sont des teneurs en eau pondérales, correspondant à des états particuliers d'un sol [27].

- *La limite de liquidité (w_l)* : teneur en eau d'un sol caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.

C'est la teneur en eau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1cm des lèvres de la rainure pratiquée dans l'échantillon placé dans une coupelle après 25 coups.

- *La limite de plasticité (w_p)* : teneur en eau d'un sol caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.

C'est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint $3.0 \pm 0.5\text{mm}$.

- *L'indice de plasticité (I_p)* : étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité.



Figure V.6. Appareil de Casagrande manuel.

V.5.1.5. Essai au bleu de méthylène (ou à la tache)

Les molécules de bleu de méthylène ont pour propriété de se fixer sur les surfaces externes et internes des feuillets d'argile, la quantité de bleu adsorbée par 100 g de sol s'appelle « Valeur Au Bleu » et reflète globalement : La teneur en argile (associée à la surface externe des particules) ; et son activité (associée à la surface interne) [30].



Figure V.7. Matériel de l'essai au bleu de méthylène

V.5.2. Essais Mécaniques

V.5.2.1. Essai Proctor

C'est l'étude de la variation de la masse volumique (avec recherche de la densité maximale) d'un sol, soumis à un compactage d'intensité donnée en fonction de l'évolution de sa teneur en eau. Autrement dit, il permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol, la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale correspondante [2].

Il existe deux types d'essais Proctor (Proctor normal et Proctor modifié), les principales caractéristiques des deux essais sont récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau V.3. Caractéristiques des essais Proctor.

Essais	Masse du marteau (Kg)	Hauteur de chute du marteau (mm)	Nombre de couches	Volume du moule (cm ³)	Nombre de coups par couche	Energie de compactage (E.C)
Proctor normal	2.49	305	3	944	25	592
				2124	56	589
Proctor modifié	4.54	457	5	944	25	2695
				2124	56	2683

L'essai Proctor modifié est l'essai de compactage en laboratoire le plus utilisé. Il peut s'effectuer suivant quatre méthodes, selon le type du sol à analyser.

Tableau V.4. Description des méthodes des essais Proctor

Méthodes	Conditions du choix de la méthode	Diamètre maximal des particules (mm)	Volume du moule (cm ³)	Nombre de coups par couches
A	Retenu 5mm < 7 %	5	944	25
B	Retenu 5mm < 7 %	5	2124	56
C	Retenu 5mm ≥ 7 % Retenu 20mm < 10 %	20	2124	56
D	Retenu 20mm ≥ 10 % Retenu 20mm ≤ 30%	20	2124	56

- Méthodes A ou B : On élimine le refus sur le tamis de 5mm et on réalise l'essai sur le passant du tamis de 5mm.
- Méthode C : On effectue l'essai sur le passant du tamis de 20mm.
- Méthode D : L'essai se fait sur le passant du tamis de 80mm , après remplacement de la masse des particules passant le tamis de 80mm et retenues sur le tamis de 20mm , par une masse égale de particules passant le tamis de 20mm et retenues sur le tamis de 5mm.
- Si la quantité de particules retenues sur le tamis de 20mm est supérieure à 30%, la norme recommande de ne pas effectuer l'essai Proctor.

$$W(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (V.11)$$

$$\gamma_d = \frac{P_s}{V} \quad (V.12)$$

$$d = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad (V.13)$$

avec :

P_s : poids sec [g] ;

P_h : poids humide [g] ;

w : teneur en eau [%] ;

γ_d : poids volumique sec [KN/m³] ;

V : volume du moule [cm³] ;

γ_w : poids volumique de l'eau, $\gamma_w = 10$ KN/m³.

V.5.2.2. Essai C.B.R (California Bearing Ratio)

Cet essai (NF P 94-078) a pour but d'évaluer la portance du sol en estimant sa résistance au poinçonnement, afin de pouvoir dimensionner la chaussée et orienter les travaux de terrassements.

L'essai consiste à soumettre des échantillons d'un même sol au poinçonnement, les échantillons sont compactés dans des moules à la teneur en eau optimum (Proctor modifié) avec trois (3) énergies de compactage 25 c/c ; 55 c/c ; 10 c/c et imbibé pendant quatre (4) jours. (Il ne concerne que les sols cohérents)

L'indice recherché, est un nombre sans dimension, exprimé en pourcentage, définit le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans le matériau type d'autre part.

L'indice C.B.R est par convention, la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement(en KN)} \times 100}{13,35} \quad (\text{V.14})$$

$$\frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement(en KN)} \times 100}{20} \quad (\text{V.15})$$

La capacité portante du sol, est d'autant meilleure que l'indice C.B.R est plus élevé.

Les essais C.B.R permettent, la détermination de :

❖ *L'indice portant immédiat (I.P.I)* : pour évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins pendant la durée du chantier. Le poinçonnement se fait immédiatement après confection de l'éprouvette, sans utilisation des charges annulaires.

❖ *L'indice C.B.R immédiat (C.B.R immédiat)* : c'est pour déterminer la portance du matériau sous les surcharges de la chaussée. Les conditions sont identiques à l'I.P.I, mais le poinçonnement se fait en chargeant l'éprouvette par les deux charges annulaires de 2.3Kg chacune, lesquelles représentent la surcharge de la chaussée.

❖ *L'indice C.B.R après immersion (C.B.R immersion)* : c'est pour déterminer la portance du matériau sous les plus mauvaises conditions hygrométriques (présence d'eau), qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique. On place sur l'échantillon, successivement, un disque de papier filtre, un disque perforé de gonflement et une charge constituée par des charges annulaires de 2.265g (au moins deux disques), représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate- forme de terrassement. On met le tout dans un bac rempli d'eau, la plaque de base étant un peu écartée du fond pour permettre le passage d'eau. Un comparateur tenu par un trépied placé sur le moule mesurera les variations de hauteur de l'échantillon. On remplit d'eau et l'on note la lecture de la mesure donnée par le comparateur au début de l'essai.

Dans le cas normal, laisser l'imbibition se poursuivre pendant quatre jours. À la fin de l'imbibition, on note le gonflement.

Le gonflement (G) pendant l'imbibition, est le gonflement linéaire relatif, par rapport à l'épaisseur h de l'échantillon à l'origine. Il est donné par la formule suivante :

$$G = \frac{\Delta h}{h} \quad (V.16)$$

Δh : gonflement mesuré [mm];

h : hauteur initiale de l'éprouvette [mm].

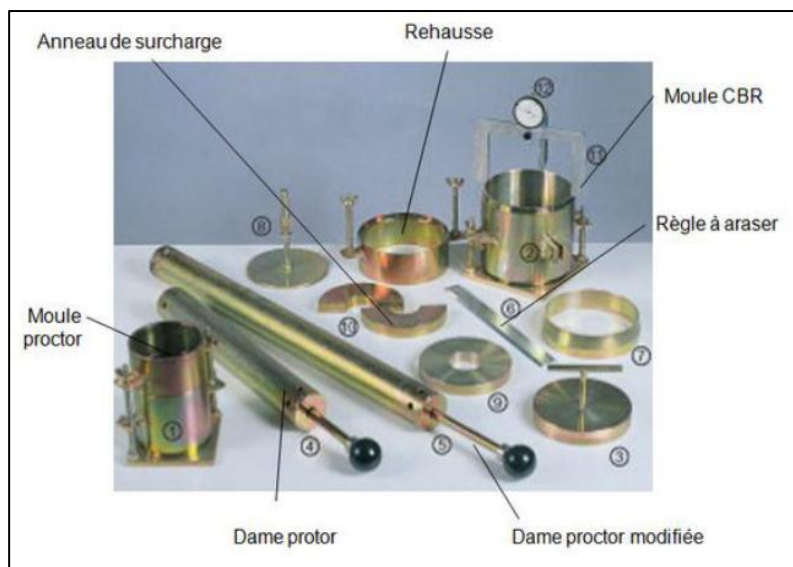


Figure V.8. Appareillage Proctor et C.B.R

V.5.2.3. Essai Los Angeles

L'essai Los Angeles selon la norme NF P 18-573 (octobre 1978) permet de mesurer la résistance aux chocs d'un échantillon de sol ou de granulats utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm produite en soumettant ($5\text{Kg} \pm 2\text{g}$) d'une fraction du matériau à tester aux chocs de boulets métalliques normalisés dans le cylindre de machine Los Angeles en rotation. Le coefficient Los Angeles est donné par la formule suivante :

$$\text{LA (\%)} = \frac{5000 - m}{5000} \times 100 \quad (\text{V.17})$$

avec : m : le refus au tamis 1.6mm.



Figure V.9. Appareil pour essai Los Angeles

V.5.2.4. Essai Micro Deval humide

L'essai Micro Deval selon la norme NF P 18-572 (octobre 1978) permet de mesurer dans des conditions bien définies, la résistance à l'usure des granulats, produite par frottements mutuels en présence d'eau, entre les granulats et une charge abrasive sous forme de billes d'acier, dans un cylindre en rotation.

Le coefficient Micro Deval est donné par la formule :

$$\text{MDE (\%)} = \frac{500 - m}{500} \times 100 \quad (\text{V.18})$$

avec : m : le refus au tamis de 1.6 mm.



Figure V.10. Appareil pour essai Micro Deval

V.5.2.5. Essai Marshall

La norme NF P 98-251-2 (avril 1992), spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, pour une température et une énergie de compactage donné, le pourcentage de vides, «la stabilité» et« le fluage» dits Marshall, d'un mélange hydrocarboné à chaud.

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis les soumettre à un essai de compression (diamétrale) suivant une génératrice dans des conditions définies .

L'enrobé est moulé sous forme d'éprouvettes cylindriques de diamètre 101.6 mm et de hauteur visée 63.5 mm, à l'aide d'un compacteur à impact.

La dame de compactage normalisée est constituée d'une masse coulissant sur une tige de guidage et tombant en chute libre sur le pied de la dame.

Le nombre de coups par face varie de 35 à 75, généralement pris égal à 50 (énergie de compactage) .

Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à 60 °C pendant 40 minutes minimum sans dépasser 1 heure. Après la mise en température des mâchoires d'écrasement.

L'essai de compression diamétrale est réalisé à l'aide d'une presse à vitesse de déformation constante de 50 mm/min hors période transitoire, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai.



Figure V.11. Presse Marshall

V.5.2.6. Essais Duriez

La norme NF P 98-251-1 (septembre 2002), spécifie les essais à chargement statique sur mélanges hydrocarbonés. Elle décrit une méthode ayant pour but de déterminer, pour une température et un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud, à partir du rapport des résistances en compression avec et sans immersion des éprouvettes, et leur pourcentage de vides.

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai, sont fabriquées par compactage statique à double effet. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage des vides. Les autres éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18°C dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres. La tenue à l'eau, est caractérisée par le rapport des résistances avec ou sans immersion.



Figure V.12. Presse Duriez

V.6. Conditions d'utilisation des sols en remblais

L'idéal est de pouvoir réutiliser les terres provenant des déblais, mais ceci doit répondre à certaines conditions.

Les matériaux de remblais seront exempts de :

- ✓ pierres de dimension > 80 mm ;
- ✓ matériaux plastique IP $> 20\%$ ou organique ;
- ✓ matériaux gélifs.

NB : Les remblais seront réglés et soigneusement compactés sur la surface sur laquelle seront exécutés.

Les matériaux des remblais seront établis par couche de 30 cm d'épaisseur en moyenne avant le compactage. Une couche ne devra pas être mise en place et compactée avant que la couche précédente n'ait été réceptionnée qu'après une vérification de son compactage [11].

V.7. Les Talus

En géométrie routière, on vérifie la stabilité des talus, dans le cas où les risques de glissements de sols existent.

Fondamentalement, il y a rupture lorsque les contraintes de cisaillement appliquées sont supérieures à la résistance au cisaillement [11].

V.7.1. Stabilité des pentes

La vérification de la stabilité des talus passe par la vérification de l'équilibre des forces présentées dans un talus :

- *La force motrice* : le poids du sol stabilisant.
- *La force déstabilisatrice* : la somme des forces de résistance au glissement du sol selon un plan de glissement défini.

V.7.2. Recommandation

- Un fossé de crête du talus de déblai en béton, qui va recevoir toutes les eaux amont du déblai.
- Des décentes d'eau au droit du talus, celles-ci seront acheminées vers le fossé en aval du talus de déblais.
- Les descentes d'eau seront espacées de 25 m.
- Un revêtement des parois de talus moyennant l'implantation d'arbustes.
- Pour les remblais de plus de 10 m de hauteur, des bermes de 3 m de largeur, seront requises chaque 8 m de hauteur.

V.8. Conclusion

Le sol doit être sondé et analysé en temps voulu pour évaluer :

- ses propriétés ;
- son aptitude en tant que fondation ou matériau ;
- la nécessité d'éventuels remblais ;
- la présence éventuelle de polluants.

Afin de prendre ces données en compte lors de la planification, des conclusions en matière de construction, de la conception, du déroulement et de l'exécution des travaux.

Les couches de chaussées, peuvent être construites de plusieurs façons avec des matériaux variables (cailloux, argile, sable, gravier, etc.). Il y a toujours des variantes possibles selon le calibre et la granulométrie des matériaux.

La conception et les conditions de réalisation des différentes couches des chaussées, sont récapitulés dans le chapitre (VI) suivant.

Chapitre VI

Conception des couches de chaussées

VI.1. Introduction	108
VI.2. Conception des couches de chaussées souples	108
VI.2.1. Couche de surface	108
VI.2.1.1. Fonctions et objectifs à considérer pour la couche de surface	108
A.1. Sécurité et confort des usagers	108
A.2. Maintien de l'intégrité de la structure	111
A.3. Impact sur l'environnement	112
A.4. Possibilités d'entretien	112
VI. 2.1.2. Choix du type de couche de surface	112
VI.2.1.3. Sélection des performances des matériaux	113
VI.2.2. Plate - forme support de la chaussée	114
VI.2.2.1. Fonctions et critères de classement des plates - formes	114
VI.2.2.2. Identification des matériaux et conditions d'emploi	115
VI.2.2.3. Environnement hydrique	115
VI.2.2.4. Classe de portance de l'arase de terrassement	116
VI.2.3. Couche de forme	117
VI.2.3.1. Techniques de préparation et de protection des matériaux	118
VI.2.3.2. Portance à long terme de la plate-forme	124
VI.2.3.3. Règles de surclassement de portance des plates-formes	124
VI.2.3.4. Couches de forme en matériau non traité	125
VI.2.3.5. Couches de forme en sols argileux et limoneux traités en place	126
VI.2.3.6. Couches de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques	127
VI.2.4. Corps de chaussée	130
VI.2.4.1. Le choix du corps de chaussée	130
VI.2.4.2. La règle des équivalences	131
VI.2.4.3. Les structures de corps de chaussée	131
A. Les structures en grave bitume	131
B. Les structures en enrobé à module élevé	131
C. Les structures souples	132
VI.3. Conclusion	133

VI.1. Introduction

Avant la conception de la chaussée, le laboratoire doit intervenir pour effectuer des sondages et des prélèvements de sols naturels en place, dans le but de les analyser et les classer.

Le besoin d'améliorer ou d'optimiser la durabilité des chaussées routières, tant lors de la conception des chaussées neuves que lors de la maintenance des chaussées routières, est un souci majeur des gestionnaires de réseaux routiers.

Dans ce chapitre, sont présentés les différents critères et objectifs pris en compte dans le choix de la conception des différentes couches constituant les chaussées souples.

VI.2. Conception des couches de chaussées souples**VI.2.1. Couche de surface**

La couche de surface d'une chaussée est constituée :

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

Dans certains cas la couche de roulement peut se réduire à un enduit superficiel, ou sa réalisation peut même être différée [23].

VI.2.1.1. Fonctions et objectifs à considérer pour la couche de surface

La qualité d'usage de la chaussée va dépendre pour une large part de la nature et de l'état de la couche de surface. Cette couche contribue en outre à la pérennité de la structure [26].

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

- la sécurité et le confort des usagers, qui sont en relation avec les caractéristiques de surface de la couche de roulement ;
- le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de déverglaçage ;
- l'impact sur l'environnement, par la satisfaction des exigences essentielles d'une part, et la recherche en tant que de besoin d'une réduction des bruits de roulement ;
- les possibilités de régénération des caractéristiques de surface [39].

A.1. Sécurité et confort des usagers

Les caractéristiques prises en considération, en relation avec ces objectifs, sont : l'uni, l'adhérence, la drainabilité, les caractéristiques photométriques et acoustiques [16], [17], [28].

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

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

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

L'évolution de l'uni longitudinal et de l'uni transversal résulte de la déformation du sol support (voire du corps de chaussée dans certains cas) et de l'orniérage de la couche de surface.

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



Figure VI.1. Analyseur de profil en long



Figure VI.2. Transversoprofilomètre à ultrasons

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

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



Figure VI.3. La pendule SRT



Figure VI.4. L'appareil SCRIM

Les techniques hydrocarbonées sont classées suivant les résultats de ces mesures en trois catégories :

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

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

- la *macrotecture* (aspérités de longueur d'onde comprise entre 0,5 et 50 mm), liée à la dimension maximale des granulats et à la composition granulométrique, ainsi qu'à la mise en œuvre. La macrotecture joue sur la capacité d'évacuation de l'eau à l'interface pneumatique-chaussée et sur le développement des forces de frottement à ce contact ;

- la *microtexture* (aspérités de longueur d'onde inférieure à 0,5 mm) liée à la nature pétrographique et au mode d'élaboration des gravillons. La microtexture permet au pneumatique de rompre le film d'eau résiduel jusqu'à l'obtention d'un contact sec ; elle participe aussi à l'augmentation du frottement pneumatique-chaussée.

• *Drainabilité* : Par sa nature, la couche de roulement peut favoriser l'évacuation des eaux de ruissellement soit superficiellement, soit par drainage à l'intérieur même de la couche de roulement. Cette drainabilité diminue les projections d'eau à l'arrière des véhicules en mouvement, tandis que la capacité de drainage réduit la rétention d'eau par les défauts géométriques de la chaussée.

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

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

A.2. Maintien de l'intégrité de la structure

Si ce rôle n'est pas assuré par une autre couche, la couche de roulement doit protéger la structure des entrées d'eaux, des sels de déverglaçage et des divers polluants répandus en surface.

La fonction d'étanchéité peut être assurée sur toute l'épaisseur de la couche de roulement ou à l'interface avec la couche inférieure. La couche de liaison peut également assurer ou compléter l'étanchéité, lorsque la couche de roulement est drainante ou imparfaitement étanche.

Pour assurer le maintien dans le temps de cette fonction d'étanchéité, la couche de roulement doit être apte à limiter la remontée des fissures des couches d'assise en matériaux traités aux liants hydrauliques. La couche de liaison permet dans ce cas aussi d'éloigner le sommet de la couche de base de la surface de la chaussée [35].

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

- la tenue à l'orniérage (NF P 98-253-1) ;

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

A.3. impact sur l'environnement

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

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

A.4. Possibilités d'entretien

Les caractéristiques fonctionnelles de la couche de surface diminuent dans le temps : réduction de l'adhérence par diminution de la texture, réduction de la drainabilité par colmatage, perte de l'imperméabilité par le développement des fissures. Le choix de la nature de la couche de roulement doit donc être fait en cohérence avec la stratégie d'entretien définie par l'exploitant de la route [20].

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

- la projection d'eau sous très haute pression, ou de particules métalliques (grenailage) sur chaussée béton et sur chaussée bitumineuse, pour augmenter la texture de la couche de roulement ;

- le striage et le rainurage du béton ;
- le décolmatage des bétons bitumineux drainants ;
- la réparation des défauts localisés ;
- le pontage des fissures de retrait ;
- l'application d'enduits superficiels pour améliorer l'étanchéité ou restaurer l'adhérence du revêtement ;

- le fraisage des enrobés pour supprimer les traces d'ornières et redonner une texture (éphémère) à la couche de roulement ;

- le thermoreprofilage pour reprendre les irrégularités géométriques.

VI. 2.1.2. Choix du type de couche de surface

Les objectifs retenus et les performances recherchées permettent d'opérer un premier choix parmi les familles de techniques pour couche de roulement et de préciser un domaine d'épaisseur [35]. Une couche de liaison est ensuite à étudier dans un certain nombre de situations :

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

VI.2.1.3. Sélection des performances des matériaux

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

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

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

La couche de liaison est fréquemment un béton bitumineux à module élevé (NF P 98-141) sinon un béton bitumineux semi-grenu (NF P 98-130) [35].



Figure VI.5. Textures de revêtements

VI.2.2. Plate-forme support de la chaussée

On note un usage croissant des méthodes de traitement en place des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Ces techniques permettent à la fois d'accroître les cadences d'exécution, de réduire l'incidence des aléas climatiques pendant la phase de travaux de terrassement, et de valoriser les matériaux locaux [20].

La couche de forme ayant un rôle en phase de construction de la chaussée mais aussi vis-à-vis du fonctionnement mécanique de l'ensemble de la chaussée, la question de la conception de la couche de forme intéresse à la fois le géotechnicien et le projeteur de la structure de chaussée [24].

Le GTR propose une démarche pour la conception et le dimensionnement de la couche de forme qui conduit à une définition de la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée.

VI.2.2.1. Fonctions et critères de classement des plates - formes

Les structures de chaussée sont construites sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée, constitué :

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

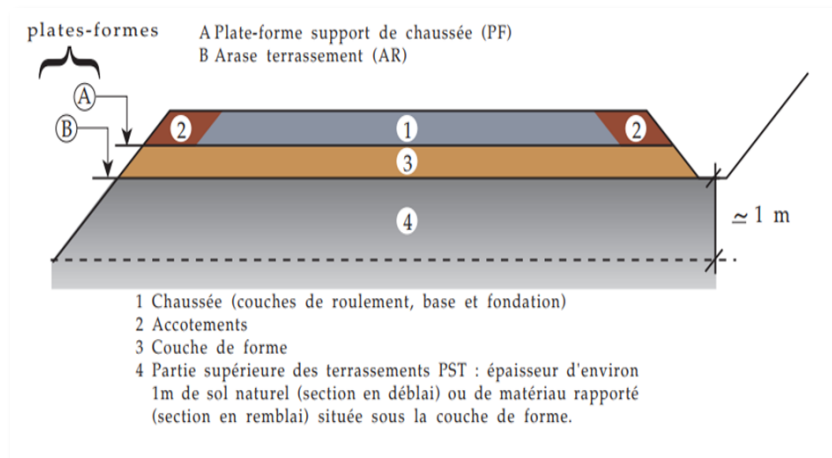


Figure VI.6. Terminologie

La plate-forme remplit deux fonctions essentielles :

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

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

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

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

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

S'agissant de critères pour la construction, les valeurs seuils dépendent de l'importance du chantier, du matériel, des méthodes et conditions d'exécution, ainsi que de la nature du matériau de la couche de fondation de la chaussée [16].

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

- du comportement du sol support, sur l'épaisseur de la partie supérieure des terrassements (PST), tel qu'il peut être apprécié à partir de sa nature et de l'environnement hydrique pour les conditions les plus défavorables (périodes de gel et dégel exclues),
- de la nature des matériaux et de l'épaisseur de la couche de forme retenues [17].

VI.2.2.2. Identification des matériaux et conditions d'emploi

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

À partir de la classification des matériaux et de la situation météorologique au moment des travaux, le GTR précise les conditions d'emploi, ainsi que les modalités de mise en œuvre à respecter [31].

VI.2.2.3. Environnement hydrique

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

- la catégorie d'état hydrique des matériaux de la partie supérieure des terrassements, telle que définie par la classification géotechnique ;
- une appréciation du contexte général de la chaussée (possibilités d'alimentation en eau, drainage).

VI.2.2.4. Classe de portance de l'arase de terrassement

La description de la partie supérieure des terrassements est complétée par la portance à long terme sur l'arase de terrassement, pour laquelle on distingue quatre classes (tableau VI.1).

Tableau VI.1. Classes de portance à long termes au niveau de l'arase de la partie supérieure des terrassements (PST)

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

Dans le cas de PST n°0 (classe d'arase ARO) il est nécessaire d'améliorer d'abord la situation (par purge, drainage, etc.) pour se ramener à un cas de portance à long terme supérieure à 20 MPa avant d'établir la plate-forme support de chaussée [17].

Tableau VI.2. Tableau des cas de partie supérieure des terrassements (PST)

SOLS NATURELS SUPPORTS				État hydriques du sol	PST n° i	Classe d'ARase AR j	Portance du sol Ps exprimée en MPa	Commentaire
Sols fins	Sols sableux et graveleux avec fines	Sols comportant des fines et des gros éléments	Sols insensibles à l'eau					
A1 ; A2 A3 ; A4	B2 ; B4 ; B5 ; B6	C1	/	th	PST n° 0	AR 0	Ps < 20	Mise en œuvre d'une opération de purge / substitution et/ou de drainage, pour opérer un reclassement de l'arase en AR1
A1 ; A2 A3 ; A4	B2 ; B4 ; B5 ; B6	C1 ; C2	/	h	PST n° 1	AR 1	20 ≤ Ps < 50	Deux démarches possibles pour passer à une classe d'arase supérieure : - soit un traitement à la chaux, - soit mettre en œuvre une couche de forme en matériau granulaire en intercalant un géotextile anti contaminant
A1 ; A2 A3 ; A4	B2 ; B4 ; B5 ; B6	C1 ; C2	/	m	PST n° 2	AR 1	20 ≤ Ps < 50	Réalisation d'un rabattement de nappe à une profondeur suffisante si possible, on est alors ramené au cas de la PST n° 3 - la couche de forme est indispensable
A1 ; A2 A3 ; A4	B2 ; B4 ; B5 ; B6	C1 ; C2	/	m	PST n° 3	AR 1	20 ≤ Ps < 50	- Pas de mesure de drainage, - La couche de forme est indispensable AR1
						AR 2	50 ≤ Ps < 120	Classement en AR2 si on effectue des dispositions de drainage pour l'évacuation des eaux à la base de la chaussée afin d'éviter leur infiltration AR2
A1 ; A2 A3 ; A4	B2 ; B4 ; B5 ; B6	C1	/	h	PST n° 4	AR 2	50 ≤ Ps < 120	Traitement durable des matériaux de la PST n° 1 à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. Possibilités en fonction du projet de réaliser une couche de forme.
/	B1	/	D1	/	PST n° 5	AR 2	50 ≤ Ps < 120	Matériaux sableux insensibles à l'eau.
						AR 3	120 ≤ Ps < 200	Ces valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme (AR3) La nécessité d'une couche de forme sur cette PST ne s'impose pas.
/	B3	C2	D2 ; D3	/	PST n° 6	AR 3	120 ≤ Ps < 200	Matériaux insensibles à l'eau
						AR 4	Ps > 200	(mêmes remarques que précédemment)

VI.2.3. Couche de forme

La couche de forme est un élément de transition permettant d'adopter les caractéristiques des matériaux de remblai ou du terrain en place aux fonctions essentielles d'une plate-forme support de chaussée.

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

- inexistante ou réduite à une mince couche de réglage, lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises,

- constituée d'une ou plusieurs couches de matériaux différents incluant éventuellement un géotextile.

Le guide technique réalisation des remblais et des couches de forme préconise une épaisseur de couche de forme (h) permettant d'assurer la circulation quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de la couche de chaussée. Cette épaisseur est fonction du cas de partie supérieure des terrassements (PST) et de la nature du matériau retenu pour la couche de forme [40].

Une étude technico-économique d'optimisation peut amener à retenir une épaisseur (h_p) supérieure pour obtenir une plate-forme de meilleure portance

VI.2.3.1. Techniques de préparation et de protection des matériaux

Les techniques considérées se rangent en quatre rubriques [34],[40] :

➤ *Rubrique G : Actions sur la granularité*

Les actions suivantes peuvent être envisagées :

- L'élimination de la fraction fine sensible à l'eau 0/d par criblage dans l'état naturel ou avec lavage-débouage. La valeur de d souvent retenue est d'environ 10 mm. Des valeurs plus faibles peuvent être choisies notamment lorsque le criblage se fait par lavage. La technique peut encore s'avérer intéressante pour certains matériaux jusqu'à $d = 20$ mm. L'élimination de la fraction 0/d permet d'obtenir un matériau insensible à l'eau mais qui peut présenter une certaine instabilité sous trafic. Dans ce cas il convient de procéder à un sablage superficiel voire à une couche de fin réglage. Dans les cas où cette modalité est prescrite, des valeurs des coefficients LA et MDE légèrement supérieures peuvent être admises sans toutefois dépasser le seuil de 50.

- L'élimination de la fraction grossière ne permettant pas le malaxage du sol avec le ou les produit(s) de traitement, ou le réglage de la plate-forme conformément aux exigences imposées. En général, on retient pour la dimension maximale les valeurs suivantes :

- 50 mm pour les matériaux devant être malaxés avec des produits de traitement ;
- 100 mm dans les autres cas.

L'élimination de la fraction grossière d'un matériau peut se faire selon différents modes : concassage, fragmentation en place à l'aide de briseurs de pierres, engins à chenilles et/ou rouleaux à grilles très lourds, écrêtage par cribles mobiles, engins épierreurs...

- L'élimination à la fois de la fraction fine sensible à l'eau et de la fraction grossière.

- La fragmentation de la fraction grossière pour produire une certaine quantité d'éléments fins, afin d'obtenir l'enrobage des blocs en cas de traitement avec un liant hydraulique (cas des craies dures et moyennement dures ou des calcaires tendres).

Un grand nombre de matériaux exigent l'élimination de leur fraction grossière pour être utilisables en couche de forme. Pour ce faire, plusieurs techniques peuvent être envisagées, en particulier l'emploi de crible mobile tel que celui représenté sur les photos ci-dessous.



Figure VII.7. Chargement du crible et ejection des éléments grossiers par basculement de la grille

➤ *Rubrique W : Actions sur l'état hydrique*

Ces actions concernent surtout les matériaux sur lesquels on doit pratiquer un traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques pour les rendre aptes à un emploi en couche de forme. Le respect d'un état hydrique aussi voisin que possible de la teneur en eau à l'optimum Proctor normal du mélange matériau-liant est indispensable pour obtenir les performances mécaniques élevées escomptables.

Les actions sur l'état hydrique envisageables sont :

- un arrosage pour maintenir la teneur en eau durant le malaxage et le compactage ;
- une humidification de la masse du matériau pour ramener son état hydrique de sec à moyen. Dans ce cas, il faut être conscient que les quantités d'eau peuvent être importantes car il faut, d'une part apporter l'eau nécessaire à l'augmentation de la teneur en eau pondérale recherchée, et d'autre part compenser les pertes dues à l'évaporation durant le malaxage.

➤ *Rubrique T : Traitement*

Cette rubrique rassemble les actions consistant à mélanger différents produits tels que la chaux (éventuellement sous forme de lait de chaux), des liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers...) ou des correcteurs granulométriques, pour conférer au matériau des

performances mécaniques supérieures à celles qu'il possède à l'état naturel, et durables tout au long de la vie de l'ouvrage.

Dans le cas du traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques [41], il convient de:

- déterminer par une étude de laboratoire : le choix du ou des produits de traitement, les dosages nécessaires pour atteindre les performances mécaniques recherchées, et la plage de teneur en eau du mélange sol-liant dans laquelle il est réaliste d'escompter obtenir ces résistances ;

- s'assurer de la pérennité des liaisons engendrées par le traitement (non apparition d'espèces cristallines gonflantes à moyen et long terme en particulier) ;

- réaliser le traitement selon des modalités beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement en remblai (utilisation d'épandeurs précis, de malaxeurs puissants à arbre horizontal et d'arroseuses réglables et fiables, élaboration éventuelle du mélange en centrale...).



Figure VI.8. Epandeur



Figure VI.9. Malaxeur à arbre horizontal

Suivant la nature et l'état des matériaux, le traitement à préconiser peut être :

- un traitement aux liants hydrauliques (ciment normalisé, liants spéciaux à usage routier, cendres volantes sulfocalciques, laitiers broyés...). Ce traitement est principalement

adapté aux matériaux peu ou pas argileux. L'association de chaux pourra être retenue selon l'état hydrique ;

- un traitement mixte chaux + ciment dans le cas des sols moyennement argileux ;
- un traitement à la chaux seule. Ce traitement est plus spécialement adapté aux sols argileux et très argileux ;
- un traitement associant liant hydraulique et correcteur granulométrique dans le cas de sols granulaires peu «traficables» ;
- un traitement par apport d'un correcteur granulométrique. Dans ce cas, le malaxage et le dosage du correcteur n'exigent pas la même rigueur. Des techniques telles qu'un répandage du correcteur à la niveleuse et un malaxage à la charrue à disques, ou réalisé suivant la méthode dite de "dépôt-reprise" peuvent s'avérer suffisantes [1]. Les caractéristiques du correcteur granulométrique doivent être validées par une étude géotechnique.



Figure VI.10. Réglaage des plates-formes de couches de forme en sols traités par rabotage

➤ *Rubrique S : Protection superficielle*

Les matériaux granulaires non traités utilisables en couche de forme requièrent souvent une protection de surface pour leur donner une résistance suffisante aux efforts tangentiels créés par les pneumatiques des engins (accélérations, freinages, virages), ou garantir les exigences de nivellement.

Dans le cas des matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques, ce rôle se double de celui, tout aussi important, de maintenir leur état hydrique relativement constant durant la période de prise et de durcissement. Ceci impose que la protection appliquée demeure peu perméable (vis-à-vis des percolations comme de l'évaporation) pendant le temps correspondant.

D'autres objectifs peuvent être encore poursuivis avec cette protection comme la recherche d'un bon accrochage avec la couche de fondation, la réduction des poussières sous le trafic...

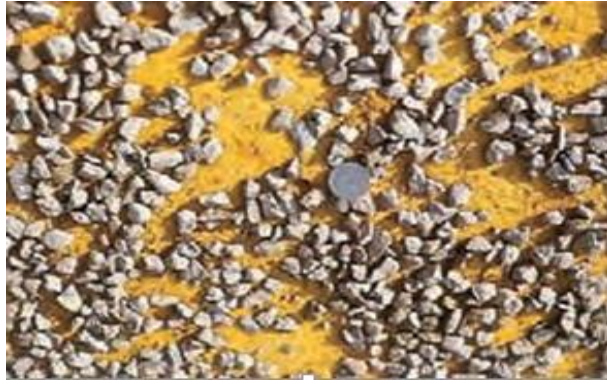


Figure VI.11. Épandage des gravillons de cloutage



Figure VI.12. Répandage de l'émulsion

Suivant les matériaux de couche de forme utilisés, les techniques de protection superficielle pouvant être appliquées sont :

- un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté. Ce type de protection qui fait appel à des émulsions de bitume s'applique tout particulièrement aux matériaux traités. Le choix entre gravillonnage ou cloutage est fonction de la granulométrie du matériau (les plus fins étant cloutés). L'absence de gravillonnage peut être envisagée quand le trafic à supporter est faible et que les matériaux sont d'origine assez "charpentés",

- une couche de fin réglage. Il s'agit d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur, constituée d'un granulat très frottant, qui est réalisée à la surface d'une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau mais relativement grossier. Elle peut se réduire à un simple sablage superficiel (à raison de 7 à 10 litre/m² d'un sable concassé 0/5) dans le cas de matériaux granulaires dont on a éliminé la fraction 0/d et dont le D_{max} est inférieur à 50 mm.

Tableau VI.3 : Tableau récapitulatif des techniques de préparation des matériaux pour emploi en couche de forme.

Rubrique	Code	Technique de préparation des matériaux
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Élimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Élimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Élimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Élimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
	2	Humidification pour changer d'état hydrique
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	6	Traitement avec un correcteur granulométrique
S Protection superficielle	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
	3	Couche de fin réglage

VI.2.3.2. Portance à long terme de la plate-forme

Pour le dimensionnement des structures de chaussée, la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée est déterminée à partir du couple PST couche de forme.

On distingue 4 classes de portance des plates-formes définies par des plages de valeur de module de déformation réversible, selon le découpage donné par le tableau suivant :

Tableau VI.4. Tableau définissant les classes de plate-forme PFi

Classe de plate-forme PFi	Portance de la PFi module EV2
PF1 ⁺	$30 \text{ MPa} \leq \text{EV2} < 50 \text{ MPa}$
PF2*	$50 \text{ MPa} \leq \text{EV2} < 80 \text{ MPa}$
PF2 ⁺	$80 \text{ MPa} \leq \text{EV2} < 120 \text{ MPa}$
PF3	$120 \text{ MPa} \leq \text{EV2} < 200 \text{ MPa}$
PF4	$\text{EV2} > 200 \text{ MPa}$

Tableau VI.5. La classe de plate-forme PFi visée en fonction de la portance du sol Ps et de l'arase de terrassement ARj

ARASE DE TERRASSEMENT		PLATE-FORME VISEE	
Classe d'arase ARj	Portance du sol Ps en MPa	Classe de la plate-forme PFi	Module EV2 en MPa
AR0	Ps < 20	PF1	$+ 30 \leq \text{EV2} < 50$
		PF2*	$50 \leq \text{EV2} < 80$
AR1	$20 \leq \text{Ps} < 50$	PF2*	$50 \leq \text{EV2} < 80$
AR2	$50 \leq \text{Ps} < 120$	PF2 ⁺	$80 \leq \text{EV2} < 120$
AR3	$120 \leq \text{Ps} < 200$	PF3	$120 \leq \text{EV2} < 200$

VI.2.3.3. Règles de surclassement de portance des plates-formes

L'épaisseur de matériau de couche de forme nécessaire pour permettre un surclassement de portance de la plate-forme support de chaussée, par rapport aux valeurs indiquées dans les tableaux de l'annexe, se détermine :

- en examinant l'incidence de l'épaisseur et de la qualité de la couche de forme sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée,

- en vérifiant que les contraintes de traction restent admissibles dans les couches de forme en matériaux traités.

L'effet, sur les contraintes et déformations dans les couches de chaussée, d'un accroissement donné d'épaisseur de la couche de forme dépend des caractéristiques mêmes de la chaussée. Par mesure de simplification, pour couvrir les situations courantes, des règles de surclassement identiques sont proposées ci-après pour les différentes structures de chaussées souples et semi-rigides. On considère successivement le cas des couches de forme en :

- matériaux granulaires non traités,
- sols argileux et limoneux traités en place à la chaux seule, ou chaux plus ciment, ou éventuellement ciment seul,
- matériaux traités aux liants hydrauliques,

Les épaisseurs indiquées dans les tableaux, découlent de calculs de mécanique des chaussées pour l'analyse du comportement de la chaussée en service et de constatations de chantier pour la tenue sous le trafic de chantier des couches de forme.

Pour une technique de chaussée donnée, l'optimisation du dimensionnement de l'ensemble couche de forme chaussée peut être recherchée par la méthode rationnelle de calcul des chaussées à la condition expresse de disposer de données fiables sur les caractéristiques mécaniques (déformation et résistance) du sol support et du matériau de couche de forme. Les caractéristiques retenues comme représentatives de la situation à long terme devront de plus être validées par des essais effectués sur la plate-forme support de chaussée :

- mesures de module de déformation réversible à partir d'essais de chargement à la plaque ou de mesures au déflectographe,
- module et résistance à la traction mesurés sur carottes, dans le cas de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Cette validation nécessitant en général la réalisation d'un chantier expérimental, et des essais en nombre suffisant pour que les résultats puissent être tenus pour représentatifs, cette démarche ne se justifiera que pour les grands chantiers.

VI.2.3.4. Couches de forme en matériau non traité

Les règles de surclassement sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau VI.6. Conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme non traitée.

Classe de l'arase	Classe de la plate-forme	Matériau de la couche de forme	Epaisseur de Matériau de couche de forme
AR1	PF3	B ₃₁ , C ₁ B ₃₁ , C ₂ B ₃₁ , D ₂₁ , D ₃₁ , R ₂₁ , R ₄₁ , R ₆₁ C ₁ B ₁₁ *, C ₂ B ₁₁ *, R ₁₁ *, R ₄₂ *, R ₆₂ *	0,80 m **
AR2	PF3	idem ci-dessus	0,50 m
* sous réserve d'une vérification sur la plate-forme support de chaussée. ** une réduction d'épaisseur de l'ordre de 0,10 à 0,15 m peut être admise si l'on intercale un géotextile adapté entre la couche de forme et la PST.			

Les valeurs d'épaisseur de couche de forme permettant un reclassement en PF3 peuvent être validées par des mesures de portance à court terme. Il est donc vivement conseillé de procéder à cette validation, et celle-ci devient impérative lorsque des doutes existent sur les caractéristiques du matériau de couche de forme. À l'inverse, avec certains matériaux rocheux, les mesures peuvent conduire à admettre un reclassement en PF4.

VI.2.3.5. Couches de forme en sols argileux et limoneux traités en place

Les matériaux considérés sont :

- pour un emploi avec traitement à la chaux seule : les sols A₃,
- pour un emploi avec traitement mixte (chaux + ciment) ou ciment seul : les sols A₁, A₂ et éventuellement A₃, ainsi que les matériaux C dont la fraction 0/50 mm est constituée par les sols précédents et lorsque la faisabilité du traitement est acquise.

La nature du traitement est à choisir en fonction de l'argilosité et de l'état hydrique.

Les règles de surclassement correspondant aux couches de forme réalisées avec ces matériaux sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau VI.7. Tableau des conditions de surclassement de portance des plates- formes avec couche de forme en sol fin traité en place

Classe de l'arase	Classe de la plate-forme	Matériau de la couche de forme	Épaisseur de Matériau de couche de forme
AR1 (*)	PF3	A ₃ traité à la chaux seule.	0,70 m (en 2 couches)
		A ₁ , A ₂ , A ₃ traités à la chaux + ciment ou éventuellement ciment seul.	0,50 m (en 2 couches)
AR2	PF3	A ₃ traité à la chaux seule.	0,50 m (en 2 couches)
		A ₁ , A ₂ , A ₃ traités chaux+ciment ou éventuellement ciment seul.	0,35 m
(*) Cas des PST n°2 et 3. Dans le cas d'une PST n°1 (mauvaise portance à la mise en œuvre) ces solutions de surclassement ne sont pas applicables.			

VI.2.3.6. Couches de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques

Il s'agit principalement des matériaux des classes B, D₁, D₂, des matériaux de classe C dont la fraction 0/50 mm est constituée par les sols précédents lorsque la faisabilité du traitement est acquise, ainsi que certains matériaux rocheux.

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

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

Le tableau VI.8.présente des valeurs d'épaisseurs pour les différentes classes mécaniques de matériau traité aux liants hydrauliques.

Tableau VI.8. Tableau des conditions de surclassement de portance des plates-formes avec couche de forme en matériaux grenus traités aux liants hydrauliques

Classe de l'arase		AR1			AR2	
		Epaisseur de matériau de couche de forme				
Classe mécanique du matériau de couche de forme	3	*	30cm	40cm	25cm	30cm
	4	30cm	35cm	45cm**	30cm	35cm
	5	35cm	50cm**	55cm**	35cm	45cm**
Classe de plate-forme obtenue		PF2	PF3	PF4	PF3	PF4
* l'épaisseur minimale de 30 cm permet un reclassement en PF3. ** l'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduira généralement à une mise en œuvre en 2 couches						

Tableau VI.9. Epaisseur de couche de forme constituée en grave naturelle GN

ARASE DE TERRASSEMENT	PLATE-FORME SUPPORT DES TERRASSEMENTS		CLASSE DE PLATE-FORME VISEE			
			PF1 +	PF2*	PF2 +	PF3
AR1 20 à 50 MPa	PST n° 1	Matériaux sensibles - Mauvaise portance à court et à long terme	40cm ou géotextile + 25cm	70cm ou géotextile + 50cm	90cm ou géotextile + 70cm	
	PST n° 2	Matériaux sensibles - Bonne portance à court terme et mauvaise portance à long terme	30cm ou géotextile + 20cm	50cm ou géotextile + 40cm	60cm ou géotextile + 50cm	80cm ou géotextile + 65cm
	PST n° 3	Matériaux sensibles - Bonne portance à court terme. Portance à long terme hypothéquée par une sensibilité aux venues d'eaux pluviales	20cm	30cm ou géotextile + 20cm	50cm ou géotextile + 40cm	80cm ou géotextile + 65cm
AR2 50 à 120 MPa	PST n° 4	Matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques (1)			30cm	50cm
	PST n° 5	Plate-forme de bonne portance posant des problèmes de traficabilité				Couche de fin réglage
AR2 50 à 120 MPa	PST n° 6	Plate-forme de bonne portance posant des problèmes de traficabilité et/ou de réglage				

Remarque : Les épaisseurs indiquées incluent la couche de fin réglage

(1) avec mise en œuvre d'un enduit de cure destiné à éviter la dessiccation de surface du matériau traité

Effet enclume

Tableau VI.10. Epaisseur de couche de forme constituée de divers matériaux naturels pour une classe de PF2

ARASE DE TERRASSEMENT		PLATE-FORME SUPPORT DES TERRASSEMENTS		CLASSE GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX CONSTITUANT LA COUCHE DE FORME			
				Ai	Bi	Cj / Bi	Ri
RESULTATS DES ESSAIS GEOTECHNIQUES	AR1	PST n°1	Matériaux sensibles mauvaise portance à court et à long terme		B11 : 80cm ou géotextile : + 65cm B31 : 75cm ou géotextile : + 60cm	(C1, C2) / (B11, B31) : 75cm ou géotextile : + 60cm	R41, R61 : 60cm ou géotextile : + 45cm R42, R62 : 70cm ou géotextile : + 55cm
		PST n° 2	Matériaux sensibles bonne portance à court terme et mauvaise portance à long terme	35cm aux liants hydrauliques ou pour A3 : 50cm à la chaux (2)	B11, B31 : 50cm ou géotextile : + 40cm ou 35cm aux liants hydrauliques	(C1, C2) / (B11, B31) : 50cm ou géotextile : + 40cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)	R4, R6 : 50cm ou géotextile : + 40cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)
		PST n° 3	Matériaux sensibles bonne portance à court terme. Portance à long terme hypothéquée par une sensibilité aux venues d'eaux pluviales	Couche de fin réglage	B11, B31 : 40cm ou géotextile + 30cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)	(C1, C2) / (B11, B31) : 30cm ou géotextile : + 20cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)	R4, R6 : 40cm ou géotextile : + 30cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)
	AR2	PST n°4	Matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques (1)				
		PST n° 5	Plate-forme de bonne portance posant des problèmes de traficabilité				Couche de fin réglage

Remarque : Les épaisseurs indiquées incluent la couche de fin réglage

(1) avec la mise en œuvre d'un enduit de cure destiné à éviter la dissémination des matériaux de surface traités
(2) mise en œuvre en deux couches

Tableau VI.11: Epaisseur de couche de forme constituée de divers matériaux naturels pour une classe de PF3

ARASE DE TERRASSEMENT		PLATE-FORME SUPPORT DES TERRASSEMENTS		CLASSE GEOTECHNIQUE DES MATERIAUX CONSTITUANT LA COUCHE DE FORME			
				Ai	Bi	Cj / Bi	Ri
RESULTATS DES ESSAIS GEOTECHNIQUES	AR1	PST n°1	Matériaux sensibles Mauvaise portance à court et à long terme		B31 : 80cm ou géotextile : +65cm	(C1, C2) / (B11, B31) : 80cm ou géotextile : + 65cm	R4, R6 : 80cm ou géotextile : + 65cm
		PST n° 2	Matériaux sensibles Bonne portance à court terme et mauvaise portance à long terme				
		PST n° 3	Matériaux sensibles Bonne portance à court terme. Portance à long terme hypothéquée par une sensibilité aux venues d'eaux pluviales				
	AR2	PST n°4	Matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques (1)	B31 : 50cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)	(C1, C2) / (B11, B31) : 50cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)	R4, R6 : 50cm ou 35cm aux liants hydrauliques (1)	
		PST n° 5	Plate-forme de bonne portance posant des problèmes de traficabilité				
	AR3	PSR n°6	Plate-forme de bonne portance posant des problèmes de traficabilité et/ou de réglage	Couche de fin réglage			

Remarque : Les épaisseurs indiquées incluent la couche de fin réglage

(1) avec la mise en œuvre d'un enduit de cure destiné à éviter la dissécation des matériaux de surface traités

(2) mise en œuvre en deux couches

VI.2.4. Corps de chaussée

Pour la conception et le dimensionnement du corps de chaussée on tient compte de trois paramètres :

- la vocation de la voie ;
- la classe de plate-forme visée à long terme (PF_i) ;
- la classe de trafic poids lourds (PL) estimé (T_i).

VI.2.4.1. Le choix du corps de chaussée

Pour chaque vocation de voies, il est proposé trois groupes de corps de chaussée correspondant à des matériaux différents :

- *Groupe 1*
 - tout en grave bitume (GB) ;
 - en grave bitume (GB) sur de la grave non traitée (GNT).
- *Groupe 2*
 - tout en enrobé à module élevé (EME),
 - en enrobé à module élevé (EME) sur de la grave non traitée (GNT).
- *Groupe 3*
 - tout en grave non traitée (GNT)

VI.2.4.2. La règle des équivalences

La plupart des corps de chaussée sont proposés avec une couche de roulement en béton bitumineux théorique (BB) de 4cm d'épaisseur.

Cette particularité permet au décideur de choisir le type de béton bitumineux le mieux adapté à la situation tout en appliquant la règle des équivalences afin de respecter les contraintes mécaniques admissibles [17].

ainsi :

2cm BB = 2,5cm BBSG = 2,5cm BBTM = 4cm BBDr = 4cm BBM = 1,5cm GB = 1cm EME

VI.2.4.3. Les structures de corp de chaussée

On distingue trois grandes catégories de structures :

- les structures en grave bitume (GB) ;
- les structures en enrobé à module élevé (EME) ;
- les structures souples (BBCS, ESU, etc).

A. Les structures en grave bitume

Des structures sont proposées pour toutes les catégories de voiries et pour les trafics poids lourds supérieurs à 25 PL/jour/sens (plage de T4 à T0).

Elles sont déterminées en fonction de la classe de trafic poids lourds et pour une classe de plate-forme PF.

Deux types de structures de corps de chaussée sont ainsi définis :

- les structures avec fondation en matériau bitumineux (GB/GB), d'épaisseurs totales réduites, mais s'accommodant mal, en contrepartie, des supports médiocres (portance, résistance au gel) ;
- les structures avec fondation en matériau non lié (GB/GNT), d'épaisseurs plus importantes, mais s'adaptant mieux aux supports médiocres.

Pour déterminer les épaisseurs des couches du corps de chaussée, les règles d'équivalence décrites précédemment ont été appliquées. Elles le seront également lorsque des corrections d'épaisseurs d'assises seront appliquées.

De manière générale, dans une structure de chaussée l'épaisseur des couches décroît du bas vers le haut, ainsi que la granularité 0/D.

B. Les structures en enrobé à module élevé

La démarche est strictement similaire à celle décrite auparavant pour les structures en grave-bitume. S'agissant d'un matériau plus performant, les épaisseurs sont plus faibles mais en contrepartie, les exigences de portance sont plus fortes sur la plate-forme, ainsi donc :

- aucune structure de corps de chaussée en EME ne sera mise en œuvre sur une plateforme de type PF1⁺.

- ces structures sont fortement déconseillées sur une plate-forme de type PF2. Elles ne peuvent être envisagées qu'à partir de plate-forme de classe PF2⁺.

Des structures sont proposées pour toutes vocations de voies et pour tous trafics supérieurs à 50 PL/jour/sens (plage de T3 à T0), ce qui exclut les voies de desserte, les voies de lotissement et les voies rurales [16].

Il n'est pas sûr que ce type de structure soit toujours financièrement intéressant par rapport aux structures en grave-bitume (GB), et on aura tout intérêt à comparer au cas par cas ces deux types de structures. Cependant, outre le côté financier, la réduction des épaisseurs peut présenter un intérêt en site urbain, du fait des diverses contraintes de niveaux (réseaux, bordures, caniveaux,...)

Lors de la réfection définitive de tranchées, les EME et les BBME ne peuvent être utilisés car leur mis en œuvre doit être mécanisé et la faible quantité nécessaire pour reconstituer le corps de chaussée bitumineux interdit toute fabrication en centrale à enrobés.

C. Les structures souples

Les structures souples comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15cm), parfois réduite à un enduit superficiel d'usure (ESU) de chaussées. Elles ne sont proposées que pour les trafics PL les plus faibles (classes T5 et T4, moins de 50 PL/jour/sens) ce qui exclut les voies de transit, interurbaines ou périurbaines. Elles sont déterminées en fonction de la classe de trafic PL et pour une classe de plateforme PF_i.

La couche de roulement est constituée :

- soit de 4 à 5cm de Béton Bitumineux « Souple » *BBS* (nouvelle appellation normalisée : Béton Bitumineux à Chaussée Souple : *BBCS*)

- ou pour les voies rurales et les voies de lotissement, d'un enduit superficiel d'usure (ESU).

On constatera que dans ce dernier cas que l'épaisseur de l'assise ou fondation est plus importante.

Cette fondation est constituée de grave non traitée (GNT), d'une épaisseur totale pouvant varier de 15 à 50cm, en une ou deux couches. L'épaisseur par couche varie de 15 à 25cm. A partir de 30cm d'épaisseur, on passe en 2 couches (2 x 15cm)

Pour les meilleures classes de plates-formes (PF3), la composition du corps de chaussée peut se limiter à une simple couche de roulement associée à une couche de fin réglage pour les plus faibles classes de trafics PL (T5 à T4) [17].

VI.3. Conclusion

L'application des méthodes des analyses de la valeur aux chaussées incite à concevoir les structures en dissociant les fonctions remplies par les différentes couches, en prenant en considération les objectifs de chacune. Les valeurs sont finalement prises selon le trafic.

Une démarche pour la conception et le dimensionnement de la couche de forme est proposé par le guide technique routier qui conduit à une définition de la portance à long terme de la plate-forme support de chaussée.

Le classement et les exigences auxquelles doit répondre la plate-forme support de chaussée sont définis en prenant en considération des critères à court terme associés à la construction de la chaussée ainsi qu'une caractérisation à long terme pour le dimensionnement et la vérification du comportement de la chaussée en service. Il précise les conditions d'emploi, et les modalités de mise en œuvre à respecter.

Par ailleurs, la conception du corps de chaussée dépend de trois paramètres : la vocation de la voie ; la classe de plate-forme visée à long terme et la classe de trafic poids lourds estimé.

Dans le chapitre suivant, on s'intéresse aux différentes méthodes et approches de dimensionnement des structures de chaussées souples.

Chapitre VII

Méthodes de dimensionnement des structures de chaussées

VII.1. Introduction	134
VII.2. Caractéristiques mécaniques des sols en vue du dimensionnement des chaussées	134
VII.2.1. Calcul des sollicitations dans la chaussée sous l'essieu de référence	134
VII.2.2. Déformations permanentes du support de chaussée.....	135
VII.3. Méthodes de dimensionnement des couches d'assise.....	135
VII.3.1. Méthodes empiriques	135
VII.3.1.1. Méthode C.B.R.....	135
VII.3.1.2. Méthode tenant compte du trafic (CBR amélioré).....	136
VII.3.1.3. Méthode du catalogue des structures SETRA	138
VII.3.1.4. Méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).....	139
VII.3.1.5. Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTPP.....	139
VII.3.1.6. Méthode (Américaine) A.A.S.H.O	141
VII.3.1.7. Méthode de l'Asphalte Institute.....	141
VII.3.2. L'approche théorique	142
VII.3.2.1. Modèle de Boussinesq (1885)	143
VII.3.2.2. Modèle de Westergaard (1925).....	144
VII.3.2.3. Modèle bicouche de Hogg (1938).....	145
VII.3.2.4. Modèle de Burmister (1943).....	146
VII.3.2.5. Modèle d'Odemark (1949).....	147
VII.3.2.6. Modèle monocouche de Pasternak (1954).....	147
VII.3.2.7. Modèle de Jeuffroy-Bachelez (1955).....	148
VII.3.2.8. Modèle monocouche de Kerr (1964)	148
VII.3.2.9. Modèle aux éléments finis.....	148
VII.4. Avantages et Inconvénients des méthodes de dimensionnement	149
VII.5. Epaisseur de la couche de surface	149
VII.6. Conclusion	151

VII.1. Introduction

L'étude de dimensionnement de la structure de chaussée s'insère dans l'ensemble des études techniques, en aval des études socio-économiques qui auront servi à cerner la fonction économique du projet d'infrastructure routière.

Il s'agit de choisir simultanément les matériaux nécessaires ayant des caractéristiques requises et de déterminer les épaisseurs des différentes couches constituant la structure de la chaussée. Afin, d'assurer de bonnes caractéristiques mécaniques qui lui permettra de résister à toutes les charges pendant toute sa durée de vie.

En matière de dimensionnement des chaussées, il n'existe pas de méthodes de calcul universelles applicables rigoureusement à tous les pays. Ainsi, chaque pays a ses propres règles qui s'affinent au gré des progrès réalisés dans la connaissance des paramètres de l'environnement routier et des résultats théoriques sur les modèles mécaniques.

Plusieurs approches ont été développées à cet effet, à savoir : l'approche empirique et l'approche théorique.

Dans ce chapitre on s'intéresse aux différentes méthodes de dimensionnement des couches d'assise ainsi que la couche de roulement des chaussées souples.

VII.2. Caractéristiques mécaniques des sols en vue du dimensionnement des chaussées

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

Cependant pour l'évaluation des sollicitations dans les couches d'assise, il s'avèrera souvent suffisant d'avoir une description approchée du comportement mécanique du sol support [20].

VII.2.1. Calcul des sollicitations dans la chaussée sous l'essieu de référence

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

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

VII.2.2. Déformations permanentes du support de chaussée

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

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

VII.3. Méthodes de dimensionnement des couches d'assise

VII.3.1. Méthodes empiriques

La méthode empirique est basée sur des essais et des observations effectuées sur des routes expérimentales. La technique est basée sur l'identification, la reproduction conforme et standard des structures de chaussées identiques à celles qui ont fait la preuve de leur performance. On utilise les matériaux, les trafics et les mêmes conditions environnementales chaque fois jusqu'à ce que des endommagements jugés sévères, pour un type de chaussée de référence, puissent être inventoriés.

VII.3.1.1. Méthode C.B.R

La méthode dite CBR (California Bearing Ratio) se base sur l'essai CBR-même. Ce dernier consiste en le poinçonnement d'un échantillon de sol confectionné en forme cylindrique ($\phi 15\text{cm}$) à 90% (à 100%) de l'optimum Proctor modifié (OPM) [4]. L'épaisseur totale du corps de chaussée, à mettre en œuvre, est évaluée comme suit :

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I_{\text{CBR}} + 5} \quad (\text{VII.1})$$

Où :

I_{CBR} : Indice de portance Californien (%).

P : Charge par roue P = 6.5 t (essieu 13 t)

e : Épaisseur équivalente

L'Abaque donnant l'épaisseur de la chaussée en fonction du CBR et de la charge p est représentée dans la figure VII, suivante [47].

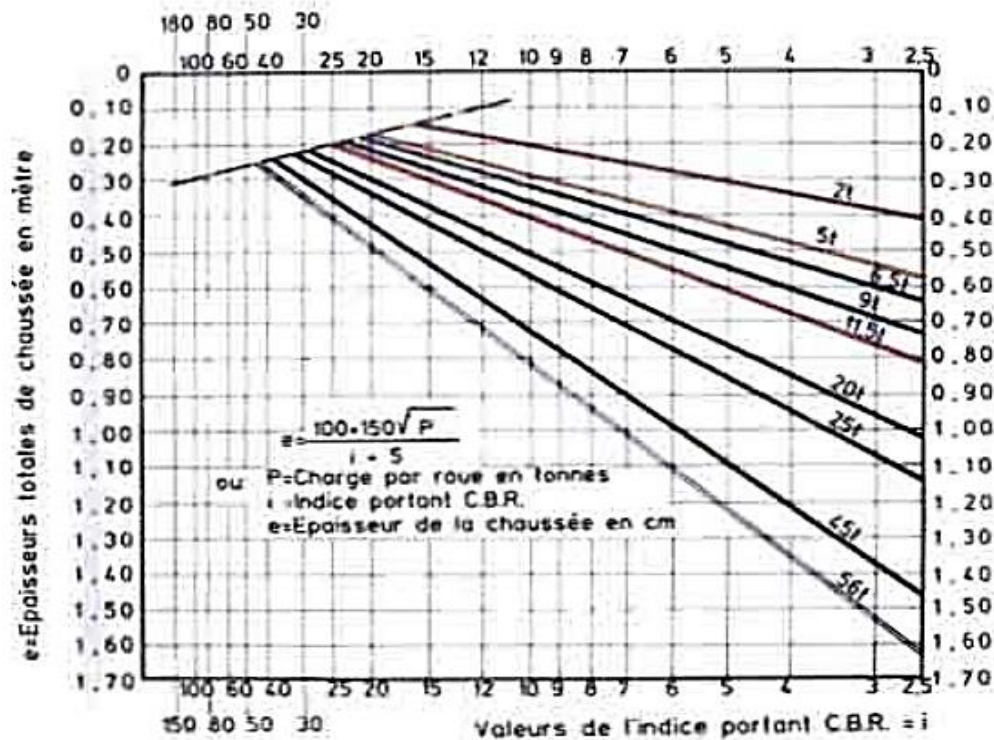


Figure VII.1. Abaque donnant l'épaisseur de la chaussée en fonction du CBR et de la charge p

VII.3.1.2. Méthode tenant compte du trafic (CBR amélioré)

En tenant compte du trafic devant passer sur la chaussée, l'épaisseur de la couche supportant la charge appliquée est donnée par la relation :

$$e_{eq} = \frac{100 + (75 + 50 \log_{10} \frac{N}{10}) \sqrt{P}}{I_{CBR} + 5} \quad (VII.2)$$

Où :

N : Nombre moyen journalier des véhicules (TJMA) > 1,5t à l'année horizon.

$$TJMA = T_H \cdot PL \quad (VII.3)$$

$$T_H = \frac{T_0}{2} (1 + \tau)^m \quad (VII.4)$$

T_H : Trafic prévu pour une durée de vie de 15 ans.

PL : Poids lourd en %

T_0 : Trafics actuel (V/j)

m : Année de prévision

τ : Taux d'accroissement du trafic(%)

P : Charge par roue P = 6.5 t (essieu 13 t)

I_{CBR} : Indice de portance Californien du sol support (%)

- Coefficient d'équivalence

La notion d'épaisseur équivalente est introduite pour tenir compte des différentes qualités mécaniques des couches. L'épaisseur équivalente d'une couche est égale à son épaisseur réelle multipliée par un coefficient numérique (a) appelé coefficient d'équivalence [20]. L'épaisseur équivalente de la chaussée est égale à la somme des épaisseurs équivalentes des couches :

$$e_{eq} = \sum e_{réelle} \times a_i = a_1 e_1 + a_2 e_2 + a_3 e_3 \quad (VII.5)$$

Selon les matériaux utilisés, les valeurs usuelles du coefficient d'équivalence sont comme indiqués dans le tableau suivant.

Tableau VII.1. Coefficients d'équivalence des matériaux constituant un corps de chaussée.

Matériaux utilisés	Coefficient d'équivalence (a_i)
Béton bitumineux et enrobé dense	2,0
Grave bitume	1,6 à 1,7
Sable ciment	1,0 à 1,2
Grave et grave concassée	1,0
Grave roulée, grave sableuse et tout venant d'Oued (TVO)	0,75
Sable	0,5
Grave ciment - Grave laitier	1,5
Tuf	0,6

Où : e_1, e_2, e_3 : épaisseurs réelles des couches.

$a_1 \times e_1$: couche de roulement

$a_2 \times e_2$: couche de base

$a_3 \times e_3$: couche de fondation

Les épaisseurs e_1, e_2 et e_3 sont toutes arbitraires. Une troisième épaisseur (parmi e_1, e_2 et e_3) est obtenue en ayant fixé les deux autres. Les épaisseurs généralement adoptées sont :

- Béton Bitumineux : de 6 à 8cm
- Grave Bitumineuse : de 10 à 20cm
- Grave de Ciment : de 15 à 25cm
- Tout Venant Oued : 25cm et plus.

VII.3.1.3. Méthode du catalogue des structures SETRA

La méthode dite du catalogue des structures est agréée par le règlement Algérien B60-B61. Elle tient compte simultanément de la classe du trafic en PL, sur une période d'exploitation de 20 années, ainsi que de la classe du sol support. La classe de trafic est directement liée au nombre de poids lourds de charge utile supérieure à 50 kN par jour sur la voie la plus chargée.

Le Tableau indique la classe des trafics selon le règlement Algérien B60-B61.

Tableau VII.2. Classe des trafics

Classe de trafic	Trafic en PL cumulé sur 20 ans
T1	$T_c < 7.3 \times 10^5$
T2	$3.7 \times 10^5 < T_c < 2 \times 10^6$
T3	$2 \times 10^6 < T_c < 7.3 \times 10^6$
T4	$7.3 \times 10^6 < T_c < 4 \times 10^7$
T5	$T_c > 4 \times 10^7$

Le trafic cumulé est donné par l'expression :

$$T_c = T_{PL} \times \left(1 + \frac{(1+\tau)^{n+1}-1}{\tau}\right) \times 365 \quad (\text{VII.5})$$

Où :

T_{PL} : Trafic en poids lourds à l'année de mise en service (V/j).

n : Durée de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré.

τ : Taux d'accroissement du trafic (%)

La classe du sol support est liée à la valeur du CBR et à la densité maximale de l'essai Proctor modifié.

Les différentes classes de sol usuellement considérées sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau VII.3. Classes de sol support

Classe de sol	Indice CBR(%)
S1	25-40
S2	10-25
S3	5-10
S4	< 5

VII.3.1.4. Méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)

Cette méthode est dérivée des essais A.A.S.H.O, elle est basée sur la détermination du trafic équivalent donné par l'expression :

$$T_{eq} = \frac{TJMA \times a [(1+\tau)^n - 1] \times 0,75 P \times 365}{(1+\tau) - 1} \quad (VII.6)$$

T_{eq} : Trafic équivalent par essieu de 13 t

TJMA : Trafic à la mise en service de la route

a : Coefficient qui dépend du nombre de voies

τ : Taux d'accroissement annuel

n : Durée de vie de la route

P : Pourcentage de poids lourds

Une fois la valeur du trafic équivalent est déterminée, on cherche la valeur de l'épaisseur équivalente e (en fonction de T_{eq} , I_{CBR}) à partir de l'abaque L.C.P.C.

L'abaque L.C.P.C est découpé en un certain nombre de zones pour lesquelles, il est recommandé en fonction de la nature et la qualité de la couche de base [25].

VII.3.1.5. Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves CTTTP

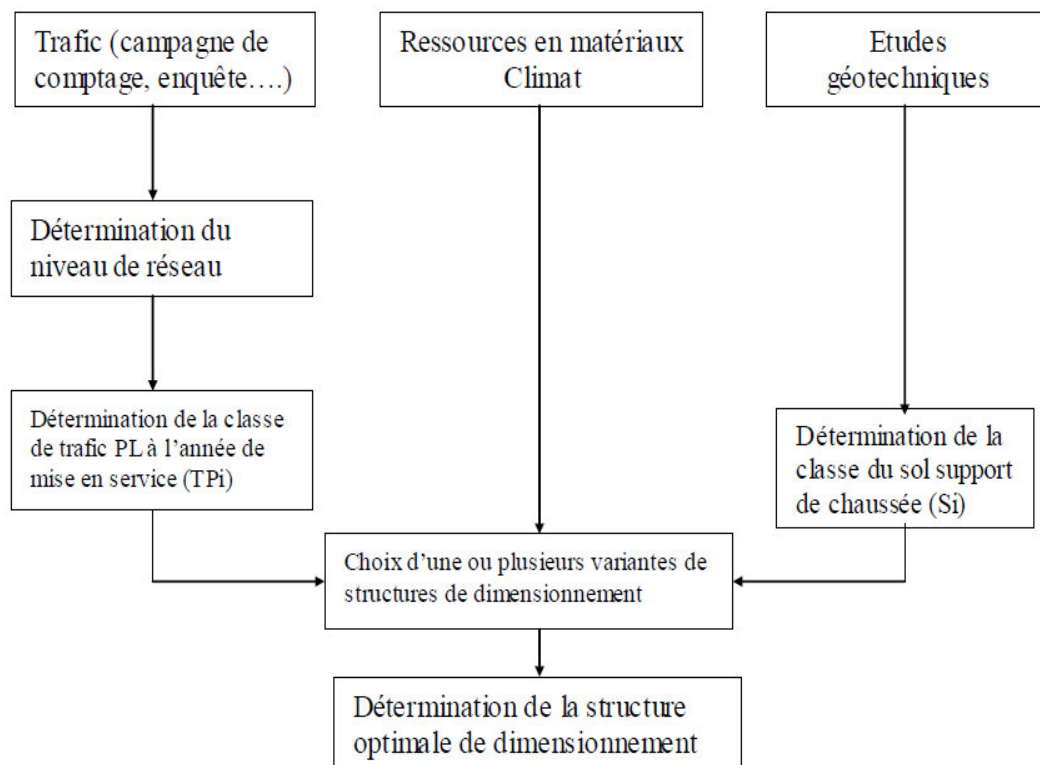


Figure VII.2. Organigramme de la démarche du catalogue.

La méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves se base sur deux approches :

- approche théorique ;
- approche empirique.

L'utilisation de catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées : trafic, matériaux, sol support et environnement [9].

Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée. Tous ces paramètres ont été précédemment vus dans le détail dans les chapitres précédents.

➤ *Trafic* : Le trafic peut s'effectuer sur un réseau principal (RP) ou sur un réseau secondaire (RS). Le premier relie :

- les chefs lieu de wilaya,
- les ports, les aéroports et les postes frontaliers,
- les principales agglomérations et importantes zones industrielles.

Le second réseau comprend toutes les catégories de routes non considérées dans le RP.

➤ *Zones climatiques* : Les zones climatiques d'Algérie sont telles que mentionnées dans le chapitre III.

➤ *Nature du sol support* : La portance du sol support est évaluée au biais de l'essai CBR pour le cas des sols sensibles à l'eau (sols fins), ou grâce à l'essai de plaque pour le cas des sols insensibles à l'eau (sols grenus). Les classes usuelles de portance des sols sont telles désignées dans le chapitre III.

Pour améliorer la portance d'un sol, on a recours aux couches de formes.

Le catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (CTTP) a fait des recherches sur la variation du CBR selon les différentes épaisseurs de la couche de forme, le mode de sa mise en place (nombre de couches) et la nature du matériau utilisé (les plus répandus en Algérie) pour la réalisation de la couche de forme [8].

Les résultats de ces recherches sont résumés dans tableau suivant :

Tableau VII.4. Les résultats de différentes épaisseurs de la couche de forme.

Portance de sol	Matériau CF	Epaisseur de CF	Portance
< S4	Non traité	50 cm (2 couches)	S3
S4	Non traité	35 cm	S3
S4	Non traité	60 cm (2 couches)	S2
S3	Non traité	40 cm (2 couches)	S2
S3	Non traité	70 cm (2 couches)	S1

VII.3.1.6. Méthode (Américaine) A.A.S.H.O

Cette méthode est née, à la suite d'un constat fait sur l'accroissement considérable de la circulation routière, qui créait des dommages sur les chaussées américaines et l'exigence des ingénieurs à l'amélioration des techniques de conception routière. Elle est basée sur l'observation du comportement sous trafic de chaussées réelles ou expérimentales. Il s'agit d'établir par régression multiple, des relations entre la durée de vie, l'épaisseur des couches et les propriétés mécaniques des matériaux.

Cette méthode permet d'établir des lois d'équivalence entre essieux de charges différentes, de relier statistiquement les déflexions à la structure de la chaussée, de définir un indice de qualité de service des chaussées PSI (*ou* Present Serviceability Index) ou indice de viabilité et un indice d'épaisseur pouvant s'exprimer par une forme linéaire des épaisseurs des différentes couches [25].

VII.3.1.7. Méthode de l'Asphalte Institute

L'asphalte Institut est une association basée aux Etats Unies, qui rassemble des entreprises internationales productrices de bitume, employant le bitume ou exerçant une activité associée au bitume. Elle a pour but de promouvoir l'usage du bitume et de mettre en avant ses avantages et ses performances, aux moyens de programmes d'ingénierie, de recherche et de formation et par la résolution des problèmes qui se posent à l'industrie. Elle a joué un rôle directeur dans l'élaboration du système de normes.

La méthode qui lui est associée est une méthode qui permet de déterminer l'épaisseur d'une chaussée en une couche unique ou en plusieurs couches. Le passage d'une couche à plusieurs couches se fait par des rapports de substitution qui proposent des combinaisons de couches en béton bitumineux, en fondation granulaire et en sous couche granulaire en respectant un rapport dont la nature du matériau a une influence sur l'épaisseur de chaque

couche de la chaussée. Les rapports de substitution recommandés par Asphalte Institut sont basés sur des recherches très poussées faites avec différents types de matériaux [47].

Du point de vu des chaussées souples, elle permet de déterminer l'épaisseur totale de la chaussée à revêtement bitumineux ainsi que l'épaisseur de chacune des couches qui la constitue par le biais d'un abaque dans les conditions d'un même sol et pour des circulations identiques. Les données de base étant :

- l'intensité et la nature de la circulation exprimée en trafic équivalent durant la période de design
- la portance du sol obtenu par les essais CBR et l'essai de chargement sur plaque. Les solutions alternatives sont déterminées en utilisant les facteurs de substitutions appropriées et en respectant les épaisseurs minimales requises du revêtement bitumineux et de la couche de base granulaire. La figure ci-dessous permet de déterminer les épaisseurs des différentes couches de chaussées [25].

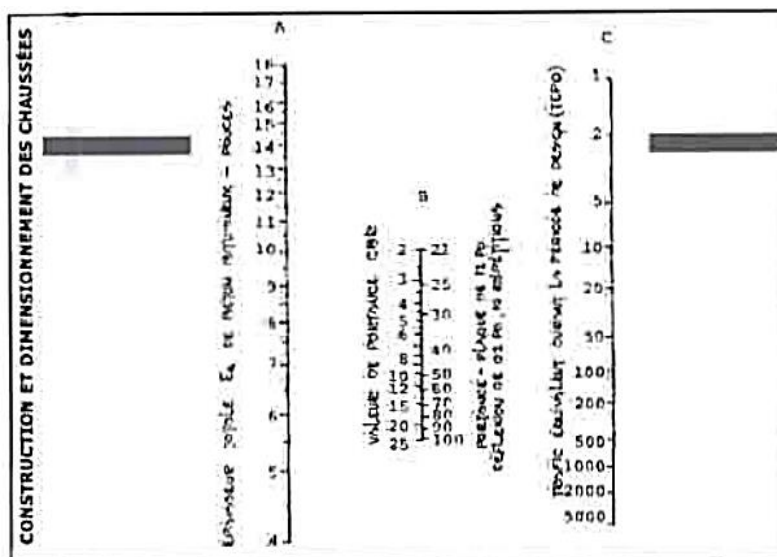


Figure VII.3. Épaisseur minimum requise

La plupart de ces méthodes sont empiriques et aboutissent, à la sortie, à des résultats bien distincts. D'une autre part, ces mêmes méthodes sont plus ou moins adaptées et compatibles pour tel ou tel conditions géotechniques.

VII.3.2. L'approche théorique

L'approche théorique s'intéresse en premier lieu à établir un modèle de chaussée qui reproduit au mieux le fonctionnement mécanique et l'état de contrainte de la structure sous l'effet d'un chargement donné (trafic). Il s'agit d'une branche particulière de la mécanique des Milieux Continus, dite «mécanique des chaussées».

La première étape dans cette approche est d'établir expérimentalement, les lois de comportement des matériaux et d'en déduire leurs caractéristiques mécaniques qui seront utilisés dans la formulation mathématique du problème posé.

Une seconde étape du modèle mécanique a pour but de déterminer les contraintes et les déformations dans les matériaux de chaussées et le sol support, ces dernières sont alors comparées aux contraintes et déformations admissibles.

VII.3.2.1. Modèle de Boussinesq (1885)

Dans le cas où le corps de chaussée n'est pas trop différent du sol naturel, on peut considérer que la pression se répartit de la même manière que dans un sol. Ceci conduit à considérer la structure de chaussée comme un massif semi-infini et proposer une méthode simple de dimensionnement. Avec l'hypothèse d'isotropie et d'élasticité linéaire, ce problème a été résolu Par Boussinesq [25].

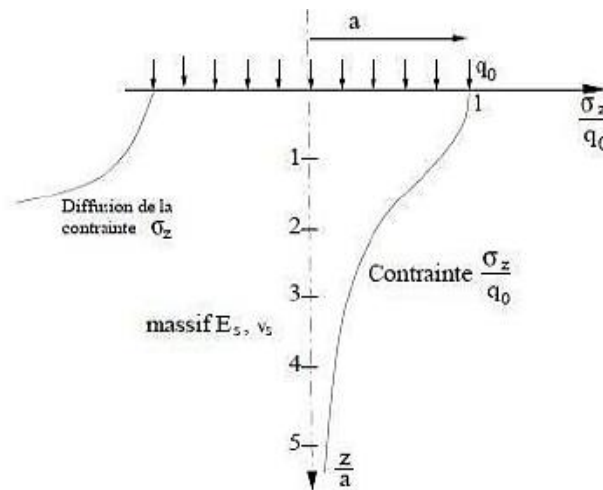


Figure VII.4. Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq.

Pour une charge d'intensité q_0 appliquée sur un cercle de rayon a , le déplacement, la contrainte verticale et radiale en un point sur l'axe de la charge situé à une profondeur z sont déterminés par la formule ci-dessous :

$$\sigma_z = q_0 \times \left[1 - \frac{\left(\frac{z}{a}\right)^3}{\left(1 + \left(\frac{z}{a}\right)^2\right)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (\text{VII.7})$$

avec :

q_0 : Pression appliquée par le pneumatique

a : Rayon d'action de la charge

Z : Profondeur

Grâce aux résultats de Boussinesq, on peut trouver l'épaisseur H de la chaussée où la pression verticale ne dépasse pas la valeur admissible du sol. Ce modèle est simple et facile à utiliser [25].

Toutefois, son application au dimensionnement de la chaussée présente les inconvénients suivants :

- le champ d'application de ce modèle est limité (au cas où le corps de chaussée n'est pas trop différent du sol support) ;

Il ne caractérise pas le comportement des structures multicouches.

- la contrainte σ_z ne dépend pas du module E_2 du sol support.

Il conduit à des structures non économiques dès que la contrainte admissible du sol devient relativement faible.

VII.3.2.2. Modèle de Westergaard (1925)

Il crée le premier vrai modèle dédié aux chaussées. La simplicité du modèle retenu (modèle bicouche en termes d'aujourd'hui) associée au génie mathématique de Westergaard lui permirent d'exprimer les contraintes sous forme d'équations explicites simples et à la portée de tous. Cette hypothèse, dite de Westergaard, s'écrit :

$$P = K \times W \quad (\text{VII.8})$$

avec :

P : Contrainte verticale sur le sol

W : Déplacement vertical de la plaque

K : Coefficient de proportionnalité est appelé module de réaction.

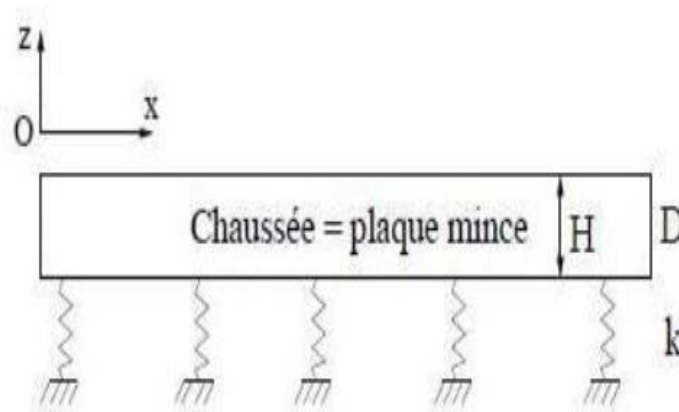


Figure VII.5. Schéma du modèle de Westergaard.

Cela implique que le sol réagit de manière élastique et uniquement dans le sens vertical. Or, le sol ne se comporte pas comme un massif élastique :

-Il accuse des déformations permanentes.

La réaction du sol n'est donc pas strictement verticale : les contraintes se dispersent en profondeur et des contraintes de cisaillements ne sont pas à exclure.

-Tous les spécialistes reconnaissent aujourd'hui que le modèle de Westergaard surestime les contraintes.

VII.3.2.3. Modèle bicouche de Hogg (1938)

Lorsque la contrainte verticale sur le sol support est limitée à une valeur très faible (1/10 ou 1/20 de la pression exercée en surface par exemple), la répartition des pressions par un corps granulaire peut être coûteuse, l'épaisseur H est très forte. Pour diminuer cette épaisseur, il suffit d'augmenter le rapport de module entre la couche E_1 de la chaussée et E_2 du sol support à l'aide d'un liant hydraulique (ciment, laitier) [45].

On peut avec une assise traitée aux liants hydrauliques obtenir une faible pression sur le sol support, sans que l'épaisseur de chaussée ne soit importante. La couche de chaussée fléchit sous la charge appliquée, ce fléchissement est accompagné de contraintes de traction par flexion à la base de la chaussée. Le dimensionnement de la chaussée consiste alors à vérifier deux critères qui conditionnent son comportement dans le temps :

- La contrainte verticale sur le sol support doit être inférieure à une valeur limitée, fonction de la nature du sol support et du nombre de chargements envisagés.

- La contrainte de traction par flexion à la base de la couche de chaussée doit être également inférieure à une valeur limitée en fonction de la nature du matériau de chaussée et du nombre de cycles.

Avec des assises traitées aux liants hydrauliques, le premier critère du dimensionnement est généralement satisfait lorsque le deuxième l'est, il suffit donc de vérifier le deuxième critère. C'est en cela que le dimensionnement d'une couche de chaussée diffère d'une fondation. Puisqu'en mécanique des sols, c'est le premier critère à considérer, c'est-à-dire la pression sur le sol qui est prépondérante.

L'étude d'un tel problème ne peut se faire à l'aide d'un modèle de Boussinesq. L'utilisation d'un modèle bicouche est nécessaire. En somme il faudra :

$\sigma_z \leq \sigma_{zad}$ et $\sigma_t \leq \sigma_{tad}$ qui est une condition nécessaire et suffisante ; en effet :

$\sigma_t \leq \sigma_{tad} \Rightarrow \sigma_z \leq \sigma_{zad}$ [25].

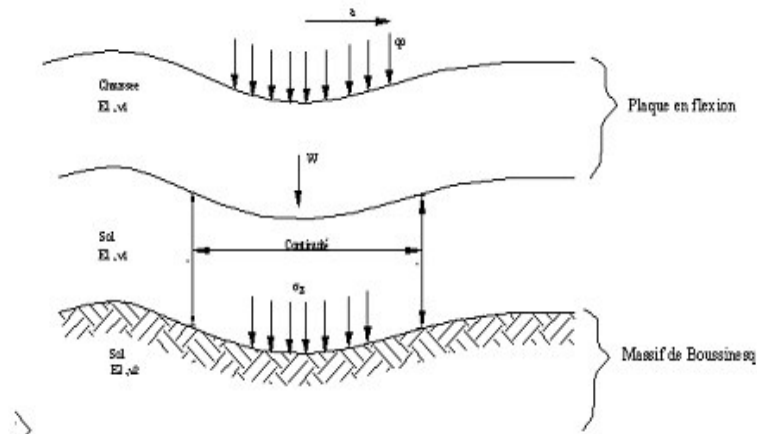


Figure VII.6. Modèle Bicouche de Hogg (1938)

Alors, dans le dimensionnement de la chaussée, hormis la condition de contrainte admissible à la surface du sol-support, nous devons vérifier aussi le critère de déformation de traction à la base de la couche de chaussée. Parmi les solutions théoriques, on peut citer la solution de Westergaard.

VII.3.2.4. Modèle de Burmister (1943)

Les modèles bicouches ne reproduisent pas la nature multicouche de la chaussée et ne modélisent pas correctement le comportement mécanique des couches de chaussées (hypothèse de plaque). Partant de ces remarques, Burmister a traité le problème général à n couches infinies dans le plan et reposant sur le sol infini de Boussinesq.

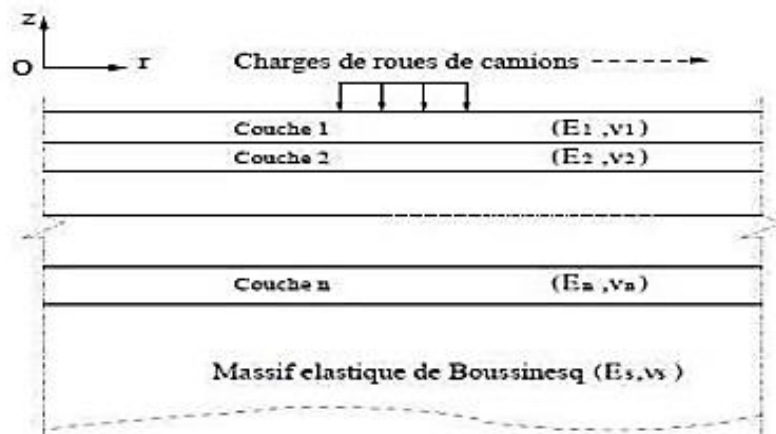


Figure VII.7. Schéma du modèle de Burmister 1943

Par rapport aux modèles précédents, le modèle multicouche de Burmister présente plusieurs avantages, puisque :

- toutes les couches sont traitées comme des solides élastiques ;
- les interfaces entre les couches peuvent être collées ou décollées, et une même structure peut comporter des couches collées et des couches décollées,

- le cas de charges multiples : jumelages, essieux tandem ou tridem peut être traité en additionnant les effets de charges élémentaires.
- le problème est résolu en prenant en considération la symétrie de révolution du système en utilisant les coordonnées cylindriques.
- dans le cas des dalles en béton, il est notamment nécessaire de le compléter par un modèle aux éléments finis pour évaluer les conséquences des charges en bord ou en angle de dalle [47].

VII.3.2.5. Modèle d'Odemark (1949)

La méthode de la hauteur équivalente a été développée par Odemark. Le principe de la méthode consiste à transformer un système de plusieurs couches avec des modules différents en un système équivalent homogène où toutes les couches ont un même module et, ainsi, pouvoir appliquer les théories classiques d'élasticité au système et les équations de Boussinesq.

Dans le cas du système à plus de deux couches, une fois la couche de surface est transformée en une couche équivalente à la deuxième, la même procédure est reprise pour transformer la nouvelle couche obtenue (somme des deux premières couches) en une couche équivalente à la troisième et ainsi de suite.

Il existe des limitations au niveau de l'utilisation de la méthode des épaisseurs équivalentes.

L'une d'entre elles concerne le module E qui doit décroître avec la profondeur H . Une autre limitation est que l'épaisseur équivalente d'une couche devrait être, de préférence, supérieure au rayon de plaque de chargement.

VII.3.2.6. Modèle monocouche de Pasternak (1954)

Le modèle de fondation de Pasternak améliore le modèle de Westergaad pour la modélisation du sol. Ainsi, le massif de sol est toujours considéré comme un assemblage de ressorts, mais une couche de cisaillement est introduite entre la couche de chaussée et la fondation.

Cette couche est constituée de ressorts verticaux incompressibles, qui ne se déforment qu'en cisaillement, de module de cisaillement G . Cette partie ajoutée a pour fonction de ne prendre en compte que le cisaillement à l'interface chaussée-sol.

La détermination du module de réaction k et du module de cisaillement G a été recherchée par certains travaux. [Kerr, 1985] aboutit à la même expression que Westergaad pour G est donnée par l'expression suivante :

$$G = \frac{E_1 H}{6(1 + \mu_1)} \quad (\text{VII.9})$$

avec : E_1 et μ_1 le module d'Young et le coefficient de Poisson de la chaussée. Cependant, Kerr recommande pour les cas usuels de réaliser un calage de la solution analytique avec des points de mesures expérimentaux, pour un résultat fiable.

Cependant, ce modèle présente encore les inconvénients du modèle de Westergaard à savoir:

- Les ressorts ont la même rigidité et travaillent indépendamment les uns et les autres ;
- La déflexion en un point donné ne dépend que de la contrainte en ce point sans qu'il y ait d'effet exercé par la fondation environnante ;
- Il ne peut pas représenter un complexe de type multicouche de chaussée [25].

VII.3.2.7. Modèle de Jeuffroy-Bachelez (1955)

Qui assimile la chaussée à un tri couche (plaque mince sur un modèle de Burmister), a permis pour la première fois d'établir un système très complet d'abaques. Il a constitué pour les ingénieurs français une étape fondamentale vers plus de rationalité dans le dimensionnement des chaussées [25].

VII.3.2.8. Modèle monocouche de Kerr (1964)

Le modèle de fondation de Kerr est une suite plus sophistiquée du modèle de Pasternak. Le massif de sol est un assemblage de ressorts avec une couche de cisaillement, dans lequel est introduit un assemblage de ressorts entre la couche de chaussée et la couche de cisaillement.

En comparant les déflexions, les pressions et moments obtenus pour les trois types de chargements (charge uniformément répartie ; forces concentrées aux bords d'une bande infinie ; moments sur ces bords) au moyen de plusieurs modèles de fondation (Winkler, Kerr, Pasternak et fondation Boussinesq), Kneifati a montré que le modèle de Kerr permet d'obtenir des résultats proches de ceux déterminés par le massif de Boussinesq.

- Ce modèle ne peut pas présenter un complexe de type multicouche de chaussée [47].

VII.3.2.9. Modèle aux éléments finis

Le développement des méthodes numériques et particulièrement la méthode des éléments finis, permet d'envisager l'utilisation de modèles encore plus réalistes. On peut ainsi prendre en compte la non-linéarité des matériaux, les conditions complexes de contacts entre les différentes couches.

La modélisation par éléments finis des structures de chaussées a été abordée dès 1967. Cesar-LCPC s'impose chaque fois que des modèles multicouches continus, élastiques et linéaires s'avèrent trop simplistes. Cette approche permet notamment de traiter les cas suivants :

- caractère tridimensionnel de la structure du fait de géométries non infinies en plan ;
- non linéarité ou évolution des conditions de contact ;

- comportement viscoélastique des matériaux sous charges roulantes, etc.

De nos jours, plusieurs codes de calcul sont utilisés dans le dimensionnement et l'analyse des structures de chaussées, on peut citer :

- les programmes ALIZE 3 et CESAR du LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussée, France.
- le programme NOEL 8 de l'université de Nantes, France ;
- le code de calcul FENLAP de l'université de Nottingham, Angleterre ;
- le programme DIANA de l'université de Delft ;
- le programme ELMOD DYNATEST, Danemark [47].

VII.4. Avantages et inconvénients des méthodes de dimensionnement

Au vue de ce qui a été développé dans cette partie, Nous constatons que chaque approche présente des avantages et inconvénients résumés dans le Tableau suivant :

Tableau VII.5. Avantages et inconvénients des deux méthodes

Méthode	Avantages	Inconvénients
Empirique	• Facilité de calcul.	Les résultats des analyses ne peuvent pas être généralisés car ils ne s'appliquent qu'aux matériaux étudiés, aux conditions d'environnement de l'expérience et aux sols supports rencontrés.
Théorique	• Minimise les erreurs ; • Prise en compte des compositions réelles du Trafic et des matériaux locaux ; • Adaptation aux différentes conditions environnementales et climatiques.	La base est théorique : donc aucune certitude pratique.

VII.5. Epaisseur de la couche de surface

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

- les chaussées souples à couche de base granulaire et dont la couche de roulement est peu épaisse (moins de 6 cm) ;

- les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques ;
- les autres cas de chaussées.

Dans le premier cas correspondant à des couches liées minces, on propose une épaisseur en fonction du trafic cumulé équivalent.

Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, la couche de surface en matériaux bitumineux assure une protection mécanique et thermique. C'est ici aussi l'expérience tirée de l'observation du comportement de ces chaussées qui donne une référence pour le choix d'une valeur d'épaisseur minimale afin de prévenir des décollements de la couche de roulement [9].

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

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

Dans les autres cas, l'épaisseur de la couche de surface est déterminée en fonction des limites technologiques de chaque technique et de l'épaisseur totale de la structure de chaussée telle que déduite des calculs de dimensionnement exposés dans le présent chapitre.

En ce qui concerne la couche de liaison, son épaisseur peut aller de 5 cm pour une granularité 0/10, à 8 cm en 0/14.

Les épaisseurs de l'ordre de 5 à 7 cm sont actuellement les plus favorables du point de vue des résultats d'uni. Des valeurs plus fortes peuvent être retenues vis-à-vis de la résistance à l'orniérage si la couche de roulement est mince ou très mince [35].

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

$$h' = h_1 (E_1/E_2)^{0.5} \quad (\text{VII.10})$$

La figure suivante permet de déterminer l'épaisseur de la couche de surface en matériau bitumineux (pour les chaussées à faible trafic, à assise granulaire), en fonction du trafic cumulé.

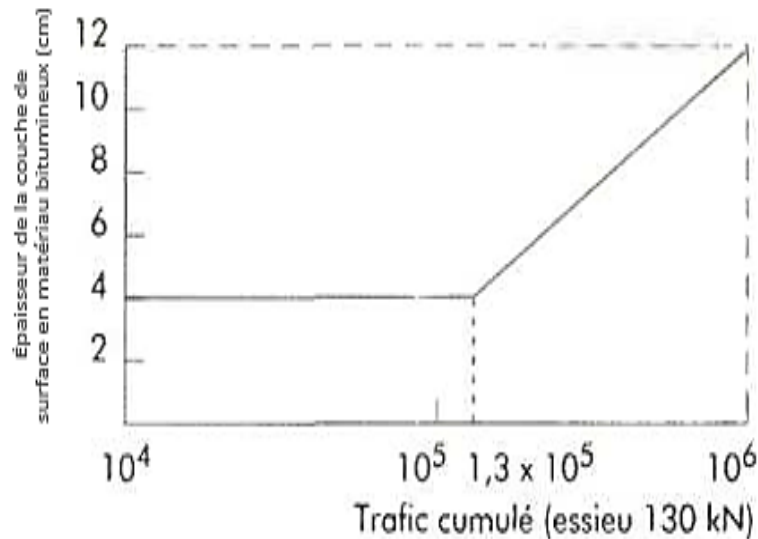


Figure VII.8. Épaisseur de la couche de surface en matériau bitumineux (pour les chaussées à faible trafic, à assise granulaire)

VII.6. Conclusion

Les méthodes de dimensionnement des chaussées se subdivisent en trois groupes essentiellement : les méthodes dites classiques ou empiriques basées sur l'expérience, les méthodes rationnelles, modernes ou d'approches théoriques basées sur les considérations mécaniques et les méthodes numériques.

Lors d'un choix de la méthode à appliquer, il ne faudra pas oublier que la qualité réelle de la chaussée dépend :

- ✓ de la disposition constructive adaptée à la chaussée ;
- ✓ de la qualité des matériaux utilisés dans la construction en place ;
- ✓ du soin apporté à l'élaboration et à la mise en œuvre des matériaux.

Conclusion générale

Le but de cette recherche bibliographique est de présenter les outils essentiels de la conception et du dimensionnement des chaussées routières.

À l'issue de l'étude menée dans le cadre de cette recherche, quelques sujets apparaissent assez pertinents et méritent d'être rappelés. Dans ce qui suit, les aspects recensés.

Le secteur des routes est reconnu assez stratégique en termes de développement socio-économique. L'étude d'une route englobe plusieurs connaissances ayant trait à la conception : types de routes à considérer, récolte des données, choix de la méthode de dimensionnement, faisabilité des essais, analyse des résultats, ...

Le projet routier ne se limite pas seulement à l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques. En effet, pour sa réalisation, la route devra avoir un bon tracé en plan et profil en long tout en respectant les bonnes conditions de visibilité, et en garantissant une bonne lisibilité de l'itinéraire pour l'utilisateur.

Cependant, tous les sols ne sont pas à vocation routière, d'où la nécessité d'une étude géotechnique avant toute utilisation. Cette situation nous conduit à chercher des solutions alternatives pour permettre soit, de rendre les matériaux utilisables (par action sur la granulométrie, sur la teneur en eau, un traitement au liant, ou bien une protection superficielle), soit par apport de matériaux en remblais.

Afin de concevoir une chaussée, il est primordial de dissocier les couches en fonction de leurs objectifs attribués. À partir de cette dissociation, on parvient à déterminer l'épaisseur optimale pour chacune des couches.

Le but de dimensionnement des couches de chaussées souples est de concevoir une structure capable de supporter un trafic pour une durée de vie fixée. Pour cela il faudra non seulement assurer des bonnes caractéristiques géométriques mais aussi mécaniques qui lui permettra de résister à toutes les charges pendant toute sa durée de service.

Ce travail a permis de mettre en place une méthodologie de dimensionnement des chaussées selon la réglementation, afin de pouvoir proposer une structure de chaussée comportant des matériaux disponible le long du tracé, ce qui rend le coût de construction de la section de chaussée plus intéressant.

Depuis bien longtemps, les chercheurs essayent de trouver le meilleur dimensionnement pour avoir une chaussée qui résiste à toutes les charges durant sa durée de vie. Plusieurs méthodes sont alors proposées qu'elles soient empiriques ou théoriques. Ces méthodes sont plus ou moins adaptées et compatibles pour tel ou tel conditions géotechniques.

Références bibliographiques

- [1] : **[ARQUIE, 1972]** ; Georges Arquie; « Le compactage, route et piste d'envol », 2ème édition, Eyrolles.
- [2] : **[ARQUIE et MOREL, 1988]** ; Georges Arquie et Guy Morel « Le compactage », édition Eyrolles.
- [3] : **[BERTRAND, 2004]** ; Bertrand Pouteau, « Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussées », Thèse de Doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées, 3decembre 2004.
- [4] : **[CEN, 2003]** ; «Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques, partie 47 : Méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement », version française, 3 novembre 2003.
- [5] : **[CIMBETON, 2009]** ; béton – Tome 1: « Conception et dimensionnement »; Voiries et aménagements urbains en béton.
- [6] : **[COQUAND Roger ,1978]** ; « Routes (Circulation -Tracé – Construction) » ; livre II Construction et entretien ; 6^{ème} édition ; Eyrolles.
- [7] : **[CTTP Algérie, 2001]** ; «Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves». Fascicule 1: «notice d'utilisation».
- [8] : **[CTTP Algérie, 2001]** ; «Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves» Fascicule 2: «hypothèses et données de dimensionnement».
- [9] : **[CTTP Algérie, 2001]** ; «Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves» Fascicule 3: «fiches techniques de dimensionnement».
- [10] : **[DENIS, 1999]** ; **Denis François**, « Retour d'expérience en construction routière : évaluation du comportement environnemental et mécanique de MIOM (Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères), dans les chaussées sous trafic », LCPC 1999.
- [11] : **[DEGOUTE Gérard et ROYET Paul , Mai 2005]** ; « Aide-mémoire de mécanique des sols » ; édition Engref.
- [12] : **[DUPAIN R., LANCHANT R. et SAINT-ARROMAN J.C. ; 2000]** ; « granulats, sols, ciments et bétons » ; caractérisations des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ; 2^{ème} édition ; Casteilla.
- [13] : **[FAURE Michel, 1997]** ; « ROUTES » ; cours de l'ENTPE, Tome I, édition Aléa.
- [14] : **[FAURE Michel, 1998]** ; « ROUTES » ; cours de l'ENTPE, Tome II, édition Aléas.
- [15] : **[GAGNON Luc, 1982]** ; «Techniques routière», Modulo éditeur.
- [16] : **[GRAND LYON, 2009]** ; J RAMPIGNON N. AZAMBRE ; « Dimensionnement des structures de chaussées neuves et élargissements des voies ».

- [17] : [GRAND LYON, Version Mars 2017] ; « Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées métropolitaines ».
- [18] : [HOLTZ Roberts et KOVASCS Williams, 1991] ; « Introduction à la géotechnique » , traduit par Jean Lafleur, Editions de L'Ecole Polytechnique de Montréal.
- [19] : [IDRRIM, 2019] ; « Conception des chaussées à faible trafic ».
- [20] : [IKHELEF Nour-Said, 2015] ; « comportement d'un matériau routier traité au liant hydraulique » ; Thèse doctorale ; Spécialité Génie civil, Option géotechnique et matériaux ; Université Sidi Bel Abbas.
- [21] : [JEUFFROY Georges, 1974] ; « Conception et construction des chaussées» ; tome I ; les véhicules, les sols, le calcul des structures ; 3^{ème} édition ;Eyrolles.
- [22] : [JEUFFROY Georges, 1974] ; « Conception et construction des chaussées» ; tome II ; les matériaux, les matériels, les techniques d'exécution des travaux, 3^{ème} édition, ;Eyrolles.
- [23] : [JEUFFROY Georges et SAUTEREY Raymond, 1985] ; « Couches de roulement » ; Département Edition de l'Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées.
- [24] : [JEUFFROY Georges et SAUTEREY Raymond, 1987] ; « Assises des chaussées », 2^{ème} édition Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [25] : [JEUFFROY Georges et SAUTEREY Raymond, 1991] ; «dimensionnement des chaussées», 2^{ème} édition ; Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [26] : [JEUFFROY Georges et SAUTEREY Raymond, 1991] ;«assises des chaussées», 2^{ème} édition ; Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.
- [27] : [LCPC 19, 1987] ; LCPC, « Limites d'Atterberg », (limite de liquidité, limite de plasticité), méthode d'essai LCPC n° 19, février 1987.
- [28] : [MEZIANI Faroudja, 2008] ; « Amélioration des Caractéristiques Mécaniques d'une Couche de Chaussée Souple par des Matériaux Composites », Mémoire de Magister, Spécialité : Génie Civil, Option : Géotechnique et Environnement.
- [29] : [ODIER L., MILLARD R.S., DOS SANTOS Pimentel, MEHRA S.R., 1968] ; « Routes dans les pays en voie de développement : Conception-Construction-Entretien » ; Editions Eyrolles ; 2^{ème} édition.
- [30] : [ROBITAILLE et TREMBLAY, 1997] ; Vaincent Robitaille et Denis Tremblay], « Mécanique des sols, Théorie et pratique », Modulo éditeur, 1997.
- [31] : [SETRA, 1985] ; « Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison (ICTAAL) ».

- [32] : [SETRA, avril 1986] ; « Note d'information n° 10, série circulation sécurité exploitation ; Vitesses pratiquées et géométrie de la routes ».
- [33] : [SETRA, avril 1988] ; Paris : LCPC ; Guide technique « Établissement des coupes transversales de chaussées ». CETE de l'Ouest.
- [34] : [SETRA, septembre 1992] ; Paris LCPC ; Guide technique. 2 vol ; « Réalisation des remblais et des couches de formes "GTR" ».
- [35] : [SETRA, 1994] ; LCPC ; guide technique ; « Conception et dimensionnement des structures de chaussées ».
- [36] : [SETRA, décembre 1994] ; Paris LCPC ; « Guide d'application des normes pour le réseau routier national » ; Enrobés hydrocarbonés à chaud.
- [37] : [SETRA, (1994)] ; « Manuel de conception des chaussées d'autoroutes », Scétauroute.
- [38] : [SETRA, 1997] ; LCPC ; guide technique ; « Chaussées en béton ».
- [39] : [SETRA, 1998] ; LCPC ; « Catalogue des structures-types de chaussées neuves ».
- [40] : [SETRA, 2000] ; LCPC, guide technique ; « Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) ».
- [41] : [SETRA, 2000] ; LCPC ; guide technique ; « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques », Application à la réalisation des remblais et des couches de forme (GTS).
- [42] : [SETRA, 2000] ; BRENAC.T ; Note technique ; « Relations vitesse, courbure ,dévers ».
- [43] : [SETRA, 2000] ; PATTE, L ; « Rapport ; Explication du chapitre 2 " visibilité" de l'ICTAAL ».
- [44] : [SETRA, novembre 2002] ; Guide technique ; « Traitement des obstacles latéraux sur les routes principales hors agglomération ».
- [45] : [SETRA, janvier 2006] ; « service d'Études techniques des routes et autoroutes » ; « Comprendre les principaux paramètres de conception géométrique des routes ».
- [46] : [TRISTAN Larino] ; « Autopsie d'une chaussée » ; Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ; Division ESAR. Section AGR.
- [47] : [TUMBERE, Mars 2008] ; « Problématique du dimensionnement des chaussées souples au Burkina Faso » Thèse en ingénierie de conception ; Ecole Polytechnique de Thiès.

Normes techniques

AFNOR (1992) ; Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, Partie 2 : Essai MARSHALL sur mélanges hydrocarbonés à chaud.

AFNOR (2002) ; Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud.

B40 (1977) ; Norme techniques d'aménagement des routes.

NF EN 1097-1 (2011) ; Norme française, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-DEVAL).

NF EN 1097-2 (2010) ; Norme française, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles).

NF P 94-056 (1996) ; Norme française, Sols : Reconnaissance et essais. Analyse granulométrique. Méthode par tamisage à sec après lavage.

NF P 94-059 (2000) ; Norme française, Sols : Reconnaissance et essais. Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents.

NF P 94-066 (1992) ; Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-067 (1992) ; Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-078 (1997) ; Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice portant immédiat. Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF P 94-093 (1995) ; Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Prélèvement des sols et des roches. Méthodologie et procédures.

NF P 94-093 (2014) ; Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal – Essai Proctor modifié.

NF P 98-217-1 (1995) ; Essais relatifs aux chaussées Essais associés à la macrotexture Mesure de la drainabilité superficielle.

NF P 98-218-4 (1995) ; Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'uni longitudinal Profilomètres.

NF P 98-220-2 (1995) ; Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'adhérence Mesure du coefficient de frottement longitudinal.

NF P 98-220-3 (1995) ; Essais relatifs aux chaussées Essais liés à l'adhérence Mesure du coefficient de frottement transversal.

NF P 98-251-1(1991) ; Essais relatifs aux chaussées Essais statistiques sur mélanges hydrocarbonés Essai Duriez à chaud.

NF P 98-253-1 (1991) ; Essais relatifs aux chaussées Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés Essai d'orniérage.

NF P 98-254-2 (1993) ; Essais relatifs aux chaussées Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux Détermination du pourcentage de vides communicants des matériaux liés.

NF P 98-254-3 (1993) ; Essais relatifs aux chaussées Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux Essai ou drainomètre de chantier.

NF P 98-259-1 (1994) ; Essais relatifs aux chaussées Comportement des mélanges hydrocarbonés par rapport à la fissuration Mesure du temps de remontée des fissures.

Annexe

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

A₁, A₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée						
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4		
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2		
A _{1h}	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter avec des liants hydrauliques associés éventuellement à de la chaux. La maîtrise de l'état hydrique de ces sols traités est souvent délicate en raison de la variation brutale de leur comportement (portance) pour de faibles écarts de teneur en eau. Ces sols se traitent généralement en place.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON	(1)	e=0,35	e=0,35	e=0,35	e=0,35	
		= ou -	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 2 2						
A _{1m}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON						0 1 2 2
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté							
A _{1s}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON						0 2 1 2
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté							
A _{2h}	La sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique de les traiter le plus souvent en associant chaux + liant hydraulique étant donné l'importance de la fraction argileuse qu'ils peuvent contenir. L'association avec de la chaux peut par ailleurs s'imposer pour ajuster leur état hydrique lorsqu'ils sont trop humides. Lorsqu'ils sont dans un état sec, il est nécessaire de les humidifier pour les ramener à l'état moyen et dans ce cas la chaux peut avantageusement être introduite sous forme de lait de chaux dont la concentration doit être adaptée au cas de chantier considéré. Ces sols se traitent presque toujours en place pour la phase de prétraitement à la chaux et éventuellement en centrale pour la phase traitement au ciment.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON						0 0 3 2
		=	ni pluie ni évaporation	T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté							
		-	évaporation importante	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 2 2						
A _{2m}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON						0 1 2 2
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté							
A _{2s}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON						0 2 2 2
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté							

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

A₃, A₄

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
A _{3h}	La sensibilité à l'eau et la plasticité élevée des sols de cette classe implique un traitement associant chaux et liant hydraulique pour pouvoir les utiliser en couche de forme. Pour les plus plastiques d'entre eux un traitement à la chaux seule peut être envisagé notamment s'il n'y a pas de risques d'apparition de gel peu après la réalisation. Ces sols se traitent exclusivement en place.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON				
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté Solution 2 : T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 3 2 0 0 4 2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
A _{3m}	Lorsqu'ils sont dans un état humide, la chaux est très efficace pour faciliter leur malaxage et ajuster leur état hydrique. Lorsqu'ils sont dans un état sec leur emploi en couche de forme est à déconseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	++	pluie forte	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)			
		+ ou =	faible pluie ou faible évaporation	Solution 1 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 3 2 0 1 4 2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
		-	évaporation importante	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON				
A _{3s}	Sols normalement inutilisables en couche de forme								
A ₄	Sols normalement inutilisables en couche de forme								

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

(2) Mise en œuvre en 2 couches.

(3) Solution de couche de forme peu appropriée, sauf à vouloir rechercher un surclassement en PF3 ou PF4, auquel cas on appliquera les règles de surclassement définies au § 3.4.2 du fascicule I "Principes généraux".

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

B₁₁, B₁₂, B₂₁, B₂₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
B ₁₁	Bien qu'insensibles à l'eau (*) les sols de cette classe sont néanmoins peu traficables du fait de leur fi- nesse et de leur uniformité granu- laire. Ils sont constitués de grains résis- tants qui autorisent leur emploi en couche de forme soit après leur avoir fait subir une correction granulométrique soit un traitement avec un liant hydraulique. (*) On considère ici les sols de la classe B ₁ dont l'insensibilité à l'eau est confir- mée.	++	forte pluie	Situation météorologique ne permettant pas une mise en œuvre correcte	NON					
		+	pluie faible	T : Traitement avec un correcteur granulo- métrique	0 0 6 0	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 T : Traitement avec un correcteur granulo- métrique Solution 2 W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique as- socié éventuellement à un correcteur granulométrique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 5 2		e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
B ₁₂	Bien qu'insensibles à l'eau (*) les sols de cette classe sont néanmoins peu traficables du fait de leur finesse et de leur uniformité granulaire. De plus ils sont constitués de grains friables qui sous l'action du trafic pourraient se transformer en éléments fins sensibles à l'eau. Pour ces raisons les sols doivent être traités avec un liant hydraulique pour être utilisables en couche de forme. (*) On considère ici les sols de la classe B ₁ dont l'insensibilité à l'eau est confirmée.	+	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)	PF2	PF2	PF3	PF3
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydri- que T : Traitement avec un liant hydraulique as- socié éventuellement à une correction granulométrique S : Application d'un enduit de cure gra- villonné éventuellement clouté	0 1 5 2					
B ₂₁ ^h et B ₂₂ ^h	La grande sensibilité à l'eau des sols de ces classes impose de les traiter avec un liant hydraulique. Ces sols se traitent souvent en place mais lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec ils sont également susceptibles d'être traités en cen- trale.	+	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)	e = 0,35 PF2	PF2	PF3	e = 0,35 PF3
B ₂₁ ^m et B ₂₂ ^m		= ou -	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gra- villonné éventuellement clouté	0 0 1 2					
		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON					
		=	ni pluie ni évapo- ration	T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gra- villonné éventuellement clouté	0 0 1 2					
		-	évapo- ration impor- tante	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 1 2					
			B ₂₁ ^s et B ₂₂ ^s	+	pluie faible					
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydri- que T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 1 2					

- (1) Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité "couche de forme" n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique "remblai" et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.
- (2) Si intercalation d'un géotextile à l'interface PST-couche de forme.
- (3) Dans le cas de la PST n°4, une couche de forme conduisant à une PF2 peut se limiter à une couche de protection superficielle de quelques centimètres d'épaisseur de ce matériau. Celle-ci peut même être inutile si l'on a prévu la possibilité d'éliminer par rabotage les 5 à 10 cm supérieurs de la PST. Elle peut également être remplacée par un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté, appliqué directement sur l'arase terrassement.

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

B₃₁, B₃₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
B ₃₁	Ces sols insensibles à l'eau (*) et constitués par des granulats résistants peuvent être utilisés en couche de forme : - soit dans leur état naturel, - soit traités avec un liant hydraulique. Ils se traitent en place et en centrale (*) On considère ici les sols de la classe B ₃ dont l'insensibilité à l'eau est confirmée.	++ ou +	pluie même forte	Utilisation en l'état	0 0 0 0	e = 0,75 ou (2) e = 0,6 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 Utilisation en l'état	0 0 0 0					
				Solution 2 W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1					
B ₃₂	Ces sols insensibles à l'eau (*) sont constitués par des granulats friables qui sous l'action du trafic pourraient se transformer en éléments fins (fillers) sensibles à l'eau. Pour cette raison leur emploi en couche de forme impose de les traiter avec un liant hydraulique. Ces sols se traitent en place ou en centrale. (*) On considère ici les sols de la classe B ₃ dont l'insensibilité à l'eau est confirmée.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)				
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1			e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

B₄₁

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
B ₄₁ th	Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau. Leur fraction grenue est résistante et ne risque donc pas de se broyer sous l'action du trafic. Pour utiliser ces sols en couche de forme deux solutions sont applicables : a) Eliminer par tout moyen ad hoc la fraction o/d responsable de la sensibilité à l'eau. Le matériau ainsi élaboré devient insensible à l'eau et peut être utilisé en toutes situations météo. Il est toutefois conseillé de répandre en surface une couche de fin réglage de 2 à 3 cm d'épaisseur d'un granulat frottant qui améliorera nettement la traficabilité. b) Traiter ces matériaux avec les liants hydrauliques en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec).	++ ou + ou = ou -	toutes conditions météo	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
B ₄₁ h		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,65 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
				S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 1 1					
B ₄₁ m		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
		= ou -	pas de pluie	S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,65 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
				S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
B ₄₁ s		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
		= ou -	pas de pluie	S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,65 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
				S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 2 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
B ₄₁ ts	++ ou + = ou -	toutes conditions météo	G : Elimination de la fraction o/d S : Mise en œuvre d'une couche de fin réglage	1 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)	

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

B₄₂, B₅₁, B₅₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
B ₄₂ h	Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau. Par ailleurs leur fraction grenue est trop friable pour envisager leur emploi après élimination de cette fraction fine. La seule solution est donc de les traiter avec un liant hydraulique. Ces sols se traitent en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec).	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
		= ou -	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 1 1					
B ₄₂ m		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 1 1					
B ₄₂ s		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 2 1 1					
B ₅₁ h et B ₅₂ h	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique nécessairement de les traiter pour les utiliser en couche de forme. Ce traitement peut être un traitement aux liants hydrauliques pour les moins argileux de la classe ou un traitement associant chaux + liant hydraulique pour les plus argileux et les plus humides. Ces sols se traitent le plus souvent en place et éventuellement en centrale après les avoir traités en place à la chaux.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
		= ou -	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 2 1					
B ₅₁ m et B ₅₂ m		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 2 1					
B ₅₁ s et B ₅₂ s		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 2 1 1					

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

B₆

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
B ₆ h	La sensibilité à l'eau et la plasticité des sols de cette classe impliquent nécessairement un traitement pour pouvoir les utiliser en couche de forme.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
		= ou -	pas de pluie	T : Traitement mixte chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 0 3 1					
B ₆ m	Ce traitement peut être soit un traitement avec des liants hydrauliques pour les moins argileux et les plus secs d'entre eux soit plus généralement un traitement associant chaux + liant hydraulique. Lorsqu'ils sont dans un état sec et que leur plasticité impose un traitement chaux + liant hydraulique, la chaux peut avantageusement être introduite sous forme de chaux éteinte ou mieux de lait de chaux.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 2 1					
B ₆ s	Ces sols se traitent le plus généralement en place ou éventuellement en centrale après les avoir préalablement traités en place à la chaux.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 2 2 1					

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

C₁A₁, C₁A₂, C₁B₆, C₂A₁, C₂A₂, C₂B₆ - C₁A_{3h}, C₂A_{3h}

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée					
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4	
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2	
C ₁ A _{1h} C ₁ A _{2h} C ₁ B _{6h} C ₂ A _{1h} C ₂ A _{2h} C ₂ B _{6h}	Les sols de cette classe sont sensibles à l'eau et plus ou moins plastiques malgré la présence d'une fraction granulaire grossière assez importante. Leur emploi en couche de forme implique donc nécessairement un traitement soit avec des liants hydrauliques pour les moins argileux soit avec de la chaux associée aux liants hydrauliques pour les plus plastiques et les plus humides. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage homogène à l'aide d'un malaxeur à outils animés (pulvimixers...) est réalisable dans des conditions économiques acceptables. Ceci suppose soit que l'on procède à l'élimination préalable des éléments grossiers interdisant le fonctionnement correct du malaxeur, soit que le malaxeur utilisé puisse absorber et fragmenter ces éléments grossiers.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 0 2 1					
		C ₁ A _{1m} C ₁ A _{2m} C ₁ B _{6m} C ₂ A _{1m} C ₂ A _{2m} C ₂ B _{6m}	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)					
= ou -	pas de pluie		G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1						
C ₁ A _{1s} C ₁ A _{2s} C ₁ B _{6s} C ₂ A _{1s} C ₂ A _{2s} C ₂ B _{6s}	+		pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
	= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 2 1 1						
	C ₁ A _{3h} C ₂ A _{3h}	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
= ou -		pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) T : Traitement mixte : chaux + liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	2 0 3 2						
			Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	2 0 4 2						

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

(2) Mise en œuvre en 2 couches.

(3) Solution de couche de forme peu appropriée, sauf à vouloir rechercher un surclassement en PF3 ou PF4, auquel cas on appliquera les règles de surclassement définies au § 3.4.2 du fascicule I "Principes généraux".

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

C₁A₃ et C₂A₃ (m et s) - C₁A₄, C₂A₄ - C₁B₁₁, C₁B₃₁, C₂B₁₁, C₂B₃₁, C₁B₁₂, C₁B₃₂, C₂B₁₂, C₂B₃₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
C ₁ A ₃ m C ₂ A ₃ m	Les sols de cette classe sont sensibles à l'eau et très plastiques malgré la présence d'une fraction granulaire grossière assez importante. Leur emploi en couche de forme implique donc nécessairement un traitement soit avec de la chaux seule soit en associant chaux + liants hydrauliques. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) est réalisable dans des conditions économiques acceptables. Ceci suppose soit que l'on procède à l'élimination préalable des éléments grossiers interdisant le fonctionnement correct du malaxeur, soit que le malaxeur utilisé puisse absorber et fragmenter ces éléments grossiers. Lorsque ces sols sont dans un état sec leur emploi en couche de forme, même traités, n'est pas à conseiller en raison de la difficulté qu'il y a à les humidifier de manière homogène.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s)	NON	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement mixte chaux + ciment S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	2 1 3 2		PF2	PF2	PF3	PF3
C ₁ A ₃ s C ₂ A ₃ s C ₁ A ₄ C ₂ A ₄							(1)	(3) e = 0,5	(3) e = 0,5	(4)
			W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement à la chaux seule S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté					2 1 4 2	PF2	PF2
Sols normalement inutilisables en couche de forme										
C ₁ B ₁₁ C ₁ B ₃₁ C ₂ B ₁₁ C ₂ B ₃₁	On considère ici les sols des classes C ₁ et C ₂ dont la fraction 0/50 est insensible à l'eau et suffisamment résistante pour que ces sols puissent être utilisés en couche de forme : - soit dans leur état naturel après élimination des éléments grossiers incompatibles avec les exigences de nivellement de la plate forme - soit traités avec un liant hydraulique après élimination des éléments grossiers empêchant le malaxage homogène du sol avec le liant ou son élaboration dans une centrale.	++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme	3 0 0 0	(1)	e = 0,75 ou (2) e = 0,6 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	3 0 0 0 2 1 1 1					
C ₁ B ₁₂ C ₁ B ₃₂ C ₂ B ₁₂ C ₂ B ₃₂	Bien qu'insensibles à l'eau ces sols sont constitués d'éléments relativement friables qui interdisent leur emploi en couche de forme sans traitement avec un liant hydraulique. Le traitement impose par ailleurs un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés ou l'élaboration dans une centrale. Ceci suppose l'élimination des éléments grossiers incompatibles avec la bonne exécution du malaxage.	+		pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	PF2	PF2	PF3
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1					

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

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

(3) Mise en oeuvre en 2 couches.

(4) cf. note 3 p. 63

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

C₁B₂₁, C₂B₂₁, C₁B₄₁, C₂B₄₁, C₁B₅₁, C₂B₅₁

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée					
					PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2	
C ₁ B ₂₁ th C ₁ B ₄₁ th C ₁ B ₅₁ th C ₂ B ₂₁ th C ₂ B ₄₁ th C ₂ B ₅₁ th	Les sols de ces classes sont constitués d'une fraction argileuse en faible quantité et d'une fraction granulaire grossière résistante aux sollicitations du trafic. Dans leur état naturel ils sont sensibles ou très sensibles à l'eau. Pour les utiliser en couche de forme deux techniques différentes peuvent être appliquées. a) Eliminer par tout moyen ad hoc (lavage, criblage, concassage) à la fois les gros éléments ne permettant pas un réglage correct de la plate-forme et la fraction o/d renfermant les éléments fins sensibles à l'eau. Il est également conseillé d'améliorer la stabilité du matériau ainsi corrigé en mettant en œuvre une couche de fin réglage de 1 à 5 cm d'épaisseur d'un matériaux sableux. b) Traiter ces matériaux avec des liants hydrauliques. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés (pulv-mixers...) est réalisable dans des conditions économiques acceptables. Ceci suppose soit que l'on procède à l'élimination préalable des éléments grossiers interdisant le fonctionnement correct du malaxeur, soit que le malaxeur utilisé puisse absorber et fragmenter ces éléments grossiers.	++ + = ou -	toutes situations météo- rologiques	G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3					
C ₁ B ₂₁ C ₁ B ₄₁ C ₁ B ₅₁ C ₂ B ₂₁ C ₂ B ₄₁ C ₂ B ₅₁ m et h		++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65	e = 0,5 ou (2) e = 0,4	e = 0,4 ou (2) e = 0,3	e = 0,3 ou (2) e = 0,2	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	PF2	PF2	PF2	PF2	
				Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1	(1) PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
C ₁ B ₂₁ s C ₁ B ₄₁ s C ₁ B ₅₁ s C ₂ B ₂₁ s C ₂ B ₄₁ s C ₂ B ₅₁ s	++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65	e = 0,5 ou (2) e = 0,4	e = 0,4 ou (2) e = 0,3	e = 0,3 ou (2) e = 0,2	(3)	
	= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	PF2	PF2	PF2	PF2		
			Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Humidification pour changer l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 2 1 1	(1) PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3	
C ₁ B ₂₁ ts C ₁ B ₄₁ ts C ₁ B ₅₁ ts C ₂ B ₂₁ ts C ₂ B ₄₁ ts C ₂ B ₅₁ ts		++ + = ou -	toutes situations météo- rologiques	G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	e = 0,8 ou (2) e = 0,65 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

C₁B₂₂, C₁B₄₂, C₁B₅₂, C₂B₂₂, C₂B₄₂, C₂B₅₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
					PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
					AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
C ₁ B ₂₂ ^h C ₁ B ₄₂ ^h C ₁ B ₅₂ ^h C ₂ B ₂₂ ^h C ₂ B ₄₂ ^h C ₂ B ₅₂ ^h	Les sols de ces classes sont constitués d'une fraction argileuse en faible quantité et d'une fraction grenue grossière relativement friable susceptible de se fragmenter sous l'action du trafic de chantier en produisant un complément d'éléments fins sensibles à l'eau.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant (s)	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le (ou les) liant(s) T : Traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 0 2 1				
C ₁ B ₂₂ ^m C ₁ B ₄₂ ^m C ₁ B ₅₂ ^m C ₂ B ₂₂ ^m C ₂ B ₄₂ ^m C ₂ B ₅₂ ^m	Pour utiliser ces sols en couche de forme il est nécessaire de les traiter avec des liants hydrauliques. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage homogène à l'aide de malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) est réalisable dans des conditions acceptables. Ceci suppose soit que l'on procède à l'élimination préalable des éléments grossiers interdisant le fonctionnement correct du malaxeur, soit que le malaxeur utilisé puisse absorber et fragmenter ces éléments grossiers.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant (s)	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1	(1) e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
C ₁ B ₂₂ ^s C ₁ B ₄₂ ^s C ₁ B ₅₂ ^s C ₂ B ₂₂ ^s C ₂ B ₄₂ ^s C ₂ B ₅₂ ^s		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 2 1 1				

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

D₁₁, D₁₂, D₂₁, D₂₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plateforme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
D ₁₁	Bien qu'insensibles à l'eau les sols de cette classe sont néanmoins peu "traficables" du fait de leur finesse et de leur uniformité granulaire. Ils sont constitués de grains résistants qui autorisent leur emploi en couche de forme après leur avoir fait subir une correction granulométrique ou un traitement avec un liant hydraulique.	++	pluie forte	Situation météorologique ne permettant pas une mise en œuvre correcte	NON	e = 0,8	e = 0,5	e = 0,4	e = 0,3	(3)
		+	pluie faible	Traitement avec un correcteur granulométrique	0 0 6 0	ou (2)	ou (2)	ou (2)	ou (2)	
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : Traitement avec un correcteur granulométrique	0 0 6 0	e = 0,65	e = 0,4	e = 0,3	e = 0,2	
				Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à un correcteur granulométrique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 5 2	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
D ₁₂	Bien qu'insensibles à l'eau les sols de cette classe sont néanmoins peu "traficables" du fait de leur finesse et de leur uniformité granulaire. De plus ils sont constitués de grains friables qui sous l'action du trafic pourraient se transformer en éléments fins sensibles à l'eau. Pour ces raisons les sols doivent être traités avec un liant hydraulique pour être utilisables en couche de forme.	+	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique	0 1 5 2					
				T : Traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à un correcteur granulométrique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté						
D ₂₁	Ces sols sont utilisables en couche de forme soit dans leur état naturel car la résistance des granulats est suffisamment élevée soit traités avec un liant hydraulique en place ou en centrale.	++ ou +	pluie même forte	Utilisation en l'état	0 0 0 0	e = 0,75 ou (2) e = 0,6	e = 0,5 ou (2) e = 0,4	e = 0,4 ou (2) e = 0,3	e = 0,3 ou (2) e = 0,2	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : Utilisation en l'état	0 0 0 0	PF2	PF2	PF2	PF2	
				Solution 2 : W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
				D ₂₂	Ces sols bien qu'insensibles à l'eau ne peuvent en général être utilisés en couche de forme dans leur état naturel en raison de la friabilité des granulats (risques de formation d'éléments fins sensibles à l'eau sous l'action du trafic). Il convient donc de les traiter en place ou en centrale avec un liant hydraulique.					
= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1							

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

D₃₁, D₃₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
					PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
D ₃₁	Les sols de cette classe peuvent être utilisés en couche de forme : - soit dans leur état naturel après avoir éliminé ou fragmenté les gros éléments empêchant un réglage correct de la plate-forme - soit traités avec un liant hydraulique. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage intime du sol avec le liant peut être réalisé avec des malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) ou en centrale.	++ ou +	pluie même forte G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme	3 0 0 0	e = 0,75 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
		= ou -	pas de pluie Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	3 0 0 0 2 1 1 1	e = 0,6 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
D ₃₂	Par rapport aux sols de la classe D ₃₁ précédente les sols de la D ₃₂ sont constitués de granulats plus friables pouvant conduire sous l'action du trafic à la formation d'éléments fins sensibles à l'eau. Pour les utiliser en couche de forme il est donc nécessaire de les traiter avec un liant hydraulique. Le traitement n'est cependant possible que dans la mesure où un malaxage intime du sol avec le liant peut être réalisé avec des malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) ou en centrale.	+	pluie faible Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	PF2	PF2	PF3	PF3
		= ou -	pas de pluie G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1					

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

R₁₁, R₁₂

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
					PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
R ₁₁	Ces matériaux, bien qu'issus de craies denses, restent cependant suffisamment fragmentables pour former une pellicule de "pâte de craie" boueuse et glissante lorsqu'ils sont mis en œuvre et circulés sous la pluie. Mis en œuvre dans de bonnes conditions météorologiques et protégés par une couche de fin réglage d'un matériau concassé, ils forment une croûte très résistante aux sollicitations du trafic. Cette technique est principalement applicable dans les sites à indice de gel faible ou moyen. Ces matériaux peuvent également être traités avec un liant hydraulique moyennant une fragmentation intense pour produire une quantité de mortier suffisante (> 10 à 20 %).	+	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une mise en œuvre et une circulation de chantier dans des conditions satisfaisantes	NON				
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage Solution 2 : G : Fragmentation intense pour produire des éléments fins W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	4 0 0 3 5 1 1 1	e = 0,7 ou (2) e = 0,6 PF2 (1) e = 0,35 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2 e = 0,35 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2 e = 0,35 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2 e = 0,35 PF3
R _{12h}	Ces matériaux sont friables et gélifs. Leur emploi en couche de forme impose impérativement un traitement avec un liant hydraulique. Ce traitement doit s'accompagner d'une fragmentation importante du matériau pour produire une quantité de mortier suffisante (> 20%). Le dosage en liant retenu doit notamment garantir l'insensibilité au gel (gonflement et gélification). Lorsqu'ils sont dans un état(s), ils peuvent encore être utilisés à condition de les humidifier pour les ramener à l'état (m), ce qui demande des quantités d'eau encore économiquement acceptables.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une exécution correcte du traitement	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Fragmentation intense pour produire des éléments fins T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	5 0 1 2				
R _{12m}	La protection superficielle doit être particulièrement résistante. Un cloutage avec de gros granulats (20/40 par exemple) est souvent à recommander.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une exécution correcte du traitement	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Fragmentation intense pour produire des éléments fins W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	5 1 1 2	(1) e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
R _{12s}		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une exécution correcte du traitement	NON				
		= ou -	pas de pluie	G : Fragmentation intense pour produire des éléments fins W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	5 2 1 2				

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

R₁₃

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée									
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4					
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2					
R ₁₃ h	Ces craies sont très friables et très gélives. Leur emploi en couche de forme impose un traitement avec un liant hydraulique. Le dosage en liant retenu doit notamment garantir l'insensibilité du matériau à l'eau et au gel (gonflement et gélifraction) ce qui peut nécessiter des quantités de liant importantes.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une exécution correcte du traitement	NON	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35					
		= ou -	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 1 2										
R ₁₃ m	Lorsque ces craies sont dans un état(s), le traitement et le compactage ne sont plus réalisables dans des conditions technico-économiques satisfaisantes. La protection superficielle doit être particulièrement résistante ; un cloutage avec de gros granulats (20/40 par exemple), est souvent à recommander.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une exécution correcte du traitement	NON						(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 1 2										
R ₁₃ s	Craies normalement inutilisables en couche de forme														

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

R₂, R₃, R₄, R₅, R₆

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
						PST n° 1	PST n° 2	PST n° 3		PST n° 4
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
R ₂₁ R ₄₁ R ₆₁	Ces matériaux issus de roches saines et dures peuvent être utilisés en couche de forme : - soit dans leur état naturel après avoir éliminé ou fragmenté, les éléments grossiers ne permettant pas le réglage de la plate-forme conformément aux exigences formulées - soit traités avec un liant hydraulique. Le traitement n'est cependant envisageable que dans la mesure où un malaxage intime du liant avec le sol peut être réalisé soit en place avec des malaxeurs à outils animés (pulvimixers...) soit en centrale.	++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme	3 0 0 0	e = 0,6 ou (2) e = 0,45 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme	3 0 0 0					
				Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du sol avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1	(1)	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF2	e = 0,35 PF3	e = 0,35 PF3
R ₂₂ R ₄₂ R ₆₂	Ces matériaux issus de roches relativement tendres forment une pellicule superficielle de boue lorsqu'ils sont circulés sous la pluie. Mis en œuvre dans de bonnes conditions météorologiques et s'ils ne comportent que peu, ou mieux, pas d'éléments fins, ils forment une croûte sous la circulation qui leur confère une très bonne tenue aux sollicitations du trafic. Ces matériaux peuvent également être traités avec un liant hydraulique dans les mêmes conditions que ceux des classes R ₂₁ , R ₄₁ , R ₆₁ .	++ ou +	pluie même forte	G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	e = 0,7 ou (2)	e = 0,5 ou (2)	e = 0,4 ou (2)	e = 0,3 ou (2)	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 : G : Elimination de la fraction o/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant le réglage correct de la plate-forme S : Mise en place d'une couche de fin réglage	4 0 0 3	e = 0,55 PF2	e = 0,4 PF2	e = 0,3 PF2	e = 0,2 PF2	
				Solution 2 : G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du matériau + liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange sol + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1					e = 0,35 PF2
R ₂₃ R ₃₃	Ces matériaux issus de roches calcaires ou argileuses très tendres nécessitent un traitement avec un liant hydraulique pour pouvoir être utilisés en couches de forme. Le traitement s'effectue le plus généralement en place. La faible résistance de la roche mère permet d'absorber dans les malaxeurs à outils animés des blocs relativement importants.	+	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange matériau + liant	NON	(1)				
		= ou -	pas de pluie	G : Elimination de la fraction grossière empêchant le malaxage correct du matériau avec le liant W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique du mélange matériau + liant T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	2 1 1 1			PF2	PF2	PF3
R ₄₃ R ₆₃ R ₃₄	Matériaux issus de roches très friables dont les possibilités d'emploi en couche de forme sont celles des sols auxquels on prévoit qu'ils seront assimilables au stade final de leur mise en œuvre. Leurs conditions d'utilisation en couche de forme sont alors à rechercher dans les tableaux relatifs aux classes des sols B, C, D ou A dans lesquelles ils seront susceptibles de se classer.									
R ₃₁ R ₃₂ R ₅	Matériaux issus de roches argileuses peu fragmentables ou de roches salines inutilisables normalement en couche de forme									

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

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

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

F₁, F₂, F₃, F₄, F₅

Classe de sol	Observations générales	Situation météo- rologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Epaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate- forme support de chaussée				
						PST n° 1 AR 1	PST n° 2 AR 1	PST n° 3 AR 1 AR 2		PST n° 4 AR 2
F ₁ Sols organiques	Matériaux normalement inutilisables en couche de forme									
F _{2h} Cendres volantes humides	La grande sensibilité à l'eau de ces matériaux implique de les traiter pour les utiliser en couche de forme. Les réactifs les plus appropriés sont les liants hydrauliques éventuellement associés à de la chaux vive lorsque les cendres se trouvent dans un état (h). Le traitement est réalisé le plus souvent en place.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
F _{2m} Cendres volantes à teneur en eau moyenne		= ou -	pas de pluie	T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 0 2 2					
		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
F _{2s} Cendres volantes sèches		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 1 1 2					
		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON					
		= ou -	pas de pluie	W : Humidification pour changement de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0 2 1 2					
F ₃₁ Schistes houillers brûlés	Bien que pouvant être considérés comme insensibles à l'eau, l'identification de ces matériaux doit être complétée par la mesure des paramètres retenus pour la classification des sols			On adoptera les conditions applicables à la classe de sols à laquelle ces matériaux sont assimilables en excluant toutefois les solutions impliquant un traitement avec des liants hydrauliques (risques de gonflements)						
F ₃₂ Schistes houillers partiel- lement ou non brûlés	Ces matériaux sont plus ou moins sensibles à l'eau et doivent être identifiés comme des sols.			On adoptera les conditions applicables à la classe de sols à laquelle ces matériaux sont assimilables en excluant toutefois les solutions impliquant un traitement avec des liants hydrauliques (risques de gonflements)						
F ₄ Schistes des mines de potasse	Matériaux normalement inutilisables en couche de forme									
F ₅ Phospho- gypse	Matériaux normalement inutilisables en couche de forme									

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

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

 F_6, F_7, F_8, F_9 [illegible]