

Le livre que vous avez entre les mains offre une présentation détaillée des structures des chaussées routières, accompagnée d'exercices et de leurs solutions. Il s'appuie sur plus de trente ouvrages scientifiques publiés au cours des soixante dernières années. Ce livre se concentre principalement sur le trafic routier, la géométrie, le terrassement, les types de chaussées, les matériaux, les méthodes de dimensionnement et les causes de dégradation des chaussées routières. Il est destiné aux étudiants en doctorat, leur offrant une vision globale du processus de dégradation des chaussées routières. Cela leur permettra d'économiser du temps dans leurs recherches et de définir rapidement et précisément le programme des expériences en laboratoire pour leurs travaux de recherche. Nous le recommandons également comme une référence importante pour les professeurs enseignant dans les universités. En général, les concepts présentés dans ce livre seront extrêmement utiles et pratiques pour les ingénieurs géotechniciens.



GADOURI Hamid is a Doctor of Geotechnical Engineering in the Department of Earth Sciences at Khemis Miliana University (Algeria).

MEZIANI Brahim is a Doctor of Geotechnical Engineering in the Department of Earth Sciences at Khemis Miliana University (Algeria).



GADOURI Hamid
MEZIANI Brahim

STRUCTURES DE CHAUSSEES ROUTIERES: COURS, EXERCICES ET SOLUTIONS

Apprendre comment maîtriser la géotechnique
routière?

**GADOURI Hamid
MEZIANI Brahim**

**STRUCTURES DE CHAUSSEES ROUTIERES: COURS, EXERCICES
ET SOLUTIONS**

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**GADOURI Hamid
MEZIANI Brahim**

STRUCTURES DE CHAUSSEES ROUTIERES: COURS, EXERCICES ET SOLUTIONS

**Apprendre comment maîtriser la géotechnique
routière?**

Éditions universitaires européennes

Imprint

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher:

Éditions universitaires européennes

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova, Europe

Printed at: see last page

ISBN: 978-620-3-45821-3

Copyright © GADOURI Hamid, MEZIANI Brahim

Copyright © 2023 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

Avant-propos

Le présent livre, intitulé **"STRUCTURES DE CHAUSSEES ROUTIERES: COURS, EXERCICES ET SOLUTIONS"** (**ROAD PAVEMENT STRUCTURES: COURSES, EXERCISES AND SOLUTIONS**) s'adresse aux étudiants en géologie de l'Ingénieur et Géotechnique, en particulier ceux spécialisés en génie routier. Il propose une synthèse des connaissances théoriques et pratiques de base relatives à la construction des chaussées routières. Les sujets abordés comprennent les propriétés des matériaux utilisés pour les chaussées, les méthodes de conception, les problèmes de dégradation, entre autres. Le livre est conforme au programme officiel du Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS) et vise à aider les futurs ingénieurs à développer les compétences nécessaires pour relever les défis liés aux structures de chaussées routières dans leur pratique professionnelle.

Ce livre s'articule sur trois chapitres qui couvrent les aspects clés liés aux structures de chaussées routières à savoir :

Le premier chapitre aborde les aspects de la géométrie routière, la planification de la construction de routes et les aspects liés au trafic routier, tels que la classification des véhicules et la prédiction des volumes de trafic. Il couvre également les techniques de terrassement utilisées pour préparer le terrain avant la construction des chaussées.

Le deuxième chapitre traite des structures de chaussées routières, en mettant l'accent sur les matériaux utilisés et les différentes méthodes de dimensionnement de chaussées routières. Les aspects tels que les charges de circulation, les caractéristiques des matériaux et les conditions environnementales sont abordés pour permettre aux lecteurs de comprendre les différentes étapes du dimensionnement et de la construction des chaussées.

Le troisième chapitre est consacré aux processus de dégradation des chaussées routières, tels que le vieillissement, la fatigue et l'usure. Les causes de ces dégradations sont également explorées, notamment les facteurs environnementaux, les charges de circulation et les processus physiques et chimiques qui affectent les matériaux de construction.

Dans l'ensemble, le livre offre aux lecteurs un aperçu complet des différentes étapes de la construction et de la maintenance des chaussées routières. Les exercices et les solutions proposés à la fin de ce livre aident les étudiants à développer leurs compétences en résolution de problèmes liés à la construction de chaussées routières.

Tables des Matières

Avant-propos

Table des matières

Liste des symboles et abréviations

INTRODUCTION GENERALE

9

CHAPITRE I : TRAFIC ROUTIER, GEOMETRIE ET TERRASSEMENT DES ROUTES

10

I.1 Introduction

I.1.1 Définition

I.1.2 Importance des réseaux routiers

I.1.3 Classification de routes

I.1.3.1 Classification proposée par BOS Nicolae (1984)

I.1.3.2 Classification de routes en Algérie selon le B40

I.2 Choix des itinéraires

I.2.1 Règles à respecter dans le tracé en plan

I.2.2 Eléments du tracé en plan

I.2.3 Environnement de la route

I.3 Etude du trafic routier

I.3.1 Analyse des trafics existants

I.3.1.1 Mesure des trafics

I.3.1.2 Méthodes de comptages des trafics

I.3.1.2.1 Les comptages manuels

I.3.1.2.1 Les comptages automatiques

I.3.2 Différents types de trafics

I.3.2.1 Trafic normal

I.3.2.2 Trafic dévié

I.3.2.3 Trafic induit

I.3.2.4 Trafic total

I.3.3 Calcul de la capacité d'une chaussée

I.3.3.1 Définition de la capacité d'une chaussée

I.3.3.2 Calcul du trafic journalier moyen annuel horizon « TJMA_h »

I.3.3.3 Calcul du trafic effectif « T_{eff} »

I.3.3.4 Débit de pointe horaire normal « Q_h »

I.3.3.5 Calcul de la capacité théorique « C_{th} »

I.3.3.6 Débit horaire admissible « Q_{adm} »

I.3.3.7 Détermination du nombre de voies « N »

I.3.3.8 Calcul du débit de saturation « Q_{sat} »

I.3.3.9 Calcul de l'année de saturation « n »

I.4 Profil en long

I.4.1 Définition

I.4.2 Eléments composant le profil en long

I.4.3 Coordination du tracé en plan et du profil en long

I.4.4 Déclivités

I.4.4.1	Déclivité minimale
I.4.4.2	Déclivité maximale
I.4.5	Raccordements en profil en long
I.4.6	Détermination pratiques du profil en long
I.4.6.1	Raccordement en forme convexe
I.4.6.2	Raccordement en forme concave
I.5	Profil en travers
I.5.1	Définition
I.5.2	Différents types des profils en travers
I.5.2.1	Profil en travers type
I.5.2.2	Profil en travers courant
I.5.3	Éléments géométriques d'un profil en travers
I.5.4	Éléments d'assainissement de la plate forme d'une chaussée routière
I.6	Terrassements
I.6.1	Définition
I.6.2	Types de terrassements
I.6.3	Le Blindages des fouilles
I.6.4	Terrassement en présence d'eau
I.6.5	Terrassement déblai/remblai
I.6.6	Travaux préparatoires avant terrassement
I.6.7	Problème du foisonnement
I.6.7.1	Définition
I.6.7.2	Types de volumes causés par un terrassement
I.6.7.3	Coefficients relatif au terrassement
I.6.8	Pente des talus
I.7	Calcul des cubatures
I.7.1	Rappel « profil en long »
I.7.2	Rappel « profil en travers »
I.7.3	Méthodes de calcul des cubatures
I.7.4	Calcul des cubatures par la méthode des aires moyennes
I.7.4.1	Volume de remblais total « V_{rt} »
I.7.4.2	Volume de déblais total « V_{dt} »

I.8 Conclusion

CHAPITRE II : TYPES DE CHAUSSEES, MATERIAUX ET METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES ROUTIERES

34

II.1 Introduction

II.2 Structures de chaussées routières

- II.2.1** Définition d'une chaussée
- II.2.2** Principe de la constitution d'une chaussée
- II.2.3** Différentes couches de chaussée
 - II.2.3.1 Couche de surface
 - II.2.3.2 Couche de base
 - II.2.3.3 Couche de fondation
 - II.2.3.4 Couche de forme
 - II.2.3.5 Sol support de chaussée
 - II.2.3.6 Stabilité du sol support au poinçonnement

II.2.3.6.1 Approche $C_{U(R)}-C_{U(SS)}$

II.2.3.6.2 Approche $C_{U(R)}-\sigma'_{P(SS)}$

II.2.4 Types de chaussées routières

II.2.4.1 Chaussées souples

II.2.4.2 Chaussées semi-rigides

II.2.4.3 Chaussées rigides

II.3 Matériaux constituant les chaussées routières

II.3.1 Béton bitumineux « BB »

II.3.2 Enduit superficiel routier « ES »

II.3.3 Grave bitumineux « GB »

II.3.4 Grave laitier (GL)

II.3.5 Béton de ciment goujonné (BCg)

II.3.6 Grave non traitée « GNT »

II.3.7 Tufs Calcaires (TUF)

II.3.8 Contrôle

II.3.8.1 Contrôle de fabrication

II.3.8.2 Contrôle de mise en oeuvre

II.4 Méthodes de dimensionnement des structures de chaussées routières

II.4.1 Approches empiriques

II.4.1.1 Méthode CBR

II.4.1.2 Method TRRL

II.4.1.3 Méthode CEBTP

II.4.1.4 Méthode CTTP

II.4.1.4.1 Le trafic

II.4.1.4.2 Détermination des classes de portance des sols

II.4.1.4.3 Détermination des classes de portance de sols support

II.4.1.4.4 Zones climatiques

II.4.1.5 Inconvénients des méthodes empiriques

II.4.2 Approches semi empiriques et celles dites « rationnelles »

II.4.2.1 Méthode du catalogue des structures « SETRA »

II.4.2.2 Détermination de la classe de trafic

II.4.2.3 Détermination de la classe du sol

II.4.2.4 Méthode L.C.P.C

II.4.3 Approches mécanistiques

II.5 Conclusion

CHAPITRE III : COMPORTEMENT, PROCESSUS ET CAUSES DE DEGRADATION DES CHAUSSEES ROUTIERES

52

III.1 Introduction

III.2 Comportement des structures de chaussées routières

III.2.1 Identification de dégradations et mode de rupture dans les chaussées

III.2.1.1 Identification des dégradations en surface des chaussées souples

III.2.1.1.1 Les déformations

III.2.1.1.2 Les fissurations

III.2.1.1.3 Les arrachements

III.2.1.1.4 Les mouvements de matériaux

III.2.1.2 Identification des modes de rupture dans les chaussées semi-rigides

III.2.2 Critères et mode d'évaluation de dégradations des chaussées

III.2.2.1 Critères d'évaluation	
III.2.2.2 Mode d'évaluation	
III.3 Processus et causes de dégradation des chaussées	
III.3.1 Définition	
III.3.2 Types de dégradations	
III.3.2.1 Les dégradations structurelles « Type A »	
III.3.2.2 Les dégradations non structurelles « Type B »	
III.3.3 Causes de dégradations par types de chaussée	
III.3.3.1 Cas de chaussées revêtues	
III.3.3.1.1 Chaussées souples	
III.3.3.1.2 Chaussées semi-rigides	
III.3.3.1.3 Chaussées rigides	
III.3.3.2 Cas de chaussées non revêtues	
III.3.3.2.1 Action des véhicules	
III.3.3.2.2 Action de l'eau	
III.3.4 Autres causes de dégradations	
III.3.4.1 Le trafic	
III.3.4.2 Les conditions climatiques	
III.3.4.3 La qualité des matériaux	
III.3.4.4 La mise en œuvre	
III.4 Conclusion	

EXERCICES & APPLICATIONS

67

Chapitre I

- I.1 Calcul du trafic routier
- I.2 Calcul des raccordements
- I.3 Calcul des terrassements
- I.4 Calcul des cubatures

Chapitre II

- II.1 Vérification de la stabilité d'un sol support au poinçonnement
- II.2 Dimensionnement des structures de chaussées routières

SOLUTIONS DES EXERCICES & APPLICATIONS

74

Chapitre I

- I.1 Calcul du trafic routier
- I.2 Calcul des raccordements
- I.3 Calcul des terrassements
- I.4 Calcul des cubatures

Chapitre II

- II.1 Vérification de la stabilité d'un sol support au poinçonnement
- II.2 Dimensionnement des structures de chaussées routières

CONCLUSION GENERALE

87

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

89

Liste des symboles et abréviations

Symbole ou abréviation	Signification	Unité
Ls/L	La sinuosité moyenne	-
h/L	La dénivelée cumulée moyenne	-
TJMA	Trafic journalier moyen annuel	V/js
NTAR	Normes techniques d'aménagement des routes	-
TJMA _h	Trafic journalier moyen annuel à l'année horizon	V/js
TJMA ₀	Trafic journalier moyen annuel à l'année zéro (ou à l'année de référence)	V/js
T _c	Trafic cumulé	PL/j/sens
n	Nombre d'année / Année de saturation (selon l'utilisation)	-
τ	Taux d'accroissement du trafic	%
PL	Poids lourds	-
uvp	Unités de véhicules particuliers	-
T _{eff}	Trafic effectif	uvp/h
Z	Pourcentage de poids lourds	-
P	Coefficient d'équivalence pour le poids lourd, il dépend de la nature de la route	-
Q _h	Débit de pointe horaire normal	uvp/h
C _{th}	Capacité théorique	uvp/h
K ₁	Coefficient lié à l'environnement	-
K ₂	Coefficient de réduction de capacité	-
Q _{adm}	Débit horaire admissible	uvp/h
N	Nombre de voies / Nombre journalier de camion (selon l'utilisation)	-
S	Coefficient de dissymétrie, en général égale à 2/3	-
Q	Débit de l'année horizon (ne pas celui de l'année de mise en service)	uvp/h
Q _{sat}	Débit de saturation	uvp/h
I _{max}	Pente maximale	%
V _r	Vitesse de référence	Km/h
P1 et P2	Les pentes	%
T	La tangente	m
H	La flèche	m
R	Rayon	m
TPC	Le terre-plein central	-
V _p	Volume en place	m ³
V _f	Volume foisonné	m ³
V _r	Volume reconstitué	m ³
C _f	Coefficient de foisonnement	-
C _c	Coefficient de compactage	-
C _{fr}	Coefficient de foisonnement résiduel	-
V _r	Volume de remblais	m ³
γ _r	Poids volumique du remblai	kN/m ³
V _{rt}	Volume de remblais total	m ³
V _d	Volume de déblai	m ³
V _{dt}	Volume de déblai total	m ³
S	Section	m ²
LCPC	Laboratoire central des ponts et chaussées	-
SETRA	Service d'études techniques, des routes et autoroutes	-
CB	Couche de base	-

CR	Couche de roulement	-
CF	Couche de fondation	-
CF _r	Couche de forme	-
C _{u(R)}	Résistance au cisaillement non drainée du remblai	kPa
C _{u(SS)}	Résistance au cisaillement non drainée du sol support	kPa
C _u	Cohésion non drainée du remblai	kPa
J _c	Facteur correcteur pour tenir compte de la pente du terrain	-
P _{max}	Valeur maximale de la charge que peut supporter le sol	kPa
H _r	Hauteur du remblai	m
γ _r	poids volumique du remblai	kN/m ³
F _s	Coefficient de sécurité	-
σ' _{p(SS)}	Pression de préconsolidation du sol support	kPa
BB	Béton bitumineux	-
GB	Grave bitume	-
GT	Grave traité	-
GNT	Grave non traité	-
GL	Grave laitier	-
SL	Sable laitier	-
SB	Sable bitume	-
CTTP	Cahier des clauses techniques particulières	-
TPL	Trafic poids lourds	-
RP1	Réseau principal de niveau 1	-
RP2	Réseau principal de niveau 2	-
I _c	Indice de concassage / Indice de consistance (selon l'utilisation)	%
OPM	Optimum Proctor modifié	-
OPM	Optimum Proctor normal	-
BCg	Béton de ciment goujonné	-
CPA	Ciment Portland Artificiel	-
CPJ	Ciment Portland Artificiel avec ajouts	-
CRS	Ciment résistant aux sulfates	-
ASTM	American Society for Testing and Materials	-
ω _{opm}	Teneur en eau optimale	%
γ _{dmax}	Densité sèche maximale	kN/m ³
I _{CBR}	Indice CBR du sol support	M
CBR	California Bearing Ratio	-
e	Epaisseur équivalente de la chaussée	cm
T _H	Trafics prévus pour une durée de vie de 20 ans	V/js
TRRL	Transportation Road Research Laboratory	-
CEBTP	Centre d'expertise du bâtiment et des travaux publics	-
EV ₂	Module de sol déterminé à l'aide de l'essai à la plaque	MPa
a	Coefficient qui dépend du nombre de voies	-
Mr	Module réversible	GPa
E	Module d'Young	GPa
ν	Coefficient de Poisson	-
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials	-
BBM	Béton bitumineux mince	-
BBTM	Béton bitumineux très mince	-
BBUM	Béton bitumineux ultra mince	-
BBS	Béton bitumineux souple	-
BBDr	Béton bitumineux drainant	-
BBSG	Béton bitumineux semi-grenu	-
BBME	Béton bitumineux à modules élevés	-
CDT	Californian Department of Transportation	-
CKE	Centrifuge Kerosene Equivalent	-
SHRP	Strategic Highway Research Program	-

Superpave	Superior Performing Asphalt Pavement	-
PG	Performance grading	-
PCG	Presse à cisaillement giratoire	-
TL	Teneur en liant (en bitume)	-
α	Coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats	-
Σ	Surface spécifique conventionnelle	-
Ng	Nombre de girations	-
CRR	Centre de Recherche Routière	-
γ_{app}	Densité apparente de l'éprouvette	kN/m ³
γ_b	Densité du bitume	kN/m ³
γ_{Gi}	Densité des agrégats	kN/m ³
P _b	Pourcentage en poids du bitume	%
P _{Gi}	Pourcentage en poids des agrégats	%
Vv	Volume des vides	m ³
C	Compacité	%
MA	Masse du mélange des agrégats	kg

FOR AUTHOR USE ONLY

INTRODUCTION GENERALE

Les routes sont des infrastructures vitales pour le transport et le commerce, et leur conception et leur construction doivent être soigneusement planifiées pour garantir leur sécurité, leur durabilité et leur efficacité. Le livre "Structures de chaussées routières : rappels de cours, exercices et solutions (Tome 1)" traite des aspects clés de la conception et de la construction des chaussées routières, ainsi que des processus de dégradation qui peuvent affecter leur performance à long terme.

Le livre est organisé en trois chapitres. Le chapitre I aborde le trafic routier, la géométrie et le terrassement des routes, qui sont des éléments essentiels à considérer lors de la conception d'une chaussée routière. Le chapitre II se concentre sur les types de chaussées, les matériaux et les méthodes de dimensionnement utilisées pour garantir la durabilité et la sécurité des routes. Enfin, le chapitre III examine le comportement des chaussées routières, les processus de dégradation et les causes possibles de détérioration, offrant ainsi une compréhension complète des problèmes que peuvent rencontrer les chaussées routières.

Chaque chapitre commence par une introduction détaillée du sujet, suivie de rappels de cours clairs et concis, d'exemples pratiques et d'exercices variés pour aider les lecteurs à renforcer leur compréhension et leur confiance. Les solutions détaillées fournies permettront aux lecteurs de mieux comprendre les différentes étapes du processus de résolution de problèmes.

Que vous soyez un étudiant en génie civil cherchant à renforcer vos connaissances ou un professionnel de l'ingénierie cherchant à améliorer vos compétences en conception et construction de chaussées routières, ce livre est une ressource essentielle pour tous ceux qui cherchent à maîtriser les aspects clés de la géométrie, des matériaux, de la conception et de la dégradation des chaussées routières.

CHAPITRE I : TRAFIC ROUTIER, GEOMETRIE ET TERRASSEMENT DES ROUTES

I.1 Introduction

Le trafic routier est un élément essentiel pour le dimensionnement des structures routières parce que le poids lourd est la raison principale qui provoque la dégradation des chaussées. Il est donc très important de déterminer le nombre de véhicules à recevoir par ces dernières.

I.1.1 Définition

Le terme « route » vient du mot latin « *viarupta* » qui signifie voie frayée. C'est donc une voie de communication terrestre permettant de relier un point à un autre, un village à un autre, etc. Une « route » est une voie terrestre (au niveau du sol, pénétrant le sol par un tunnel ou sur viaduc) aménagée pour permettre la circulation de véhicules à roues.

I.1.2 Importance des réseaux routiers

Les travaux publics, notamment le domaine des routes, constituent un secteur stratégique, et participent au développement économique et social des pays, des villes, des provinces, et des régions lointaines. Aussi, le réseau routier favorise :

- La création d'emplois et la mobilité des facteurs de production ;
- La naissance d'effets d'entraînement sur d'autres secteurs ;
- L'indépendance alimentaire du pays ;
- Les transactions et échanges commerciaux entre provinces (intégration économique) ;
- La réduction de la pauvreté ;
- L'avènement des investissements lourds (étrangers et locaux), etc.

I.1.3 Classification de routes

I.1.3.1 Classification proposée par BOS Nicolae (1984)

Les voies de communication terrestres peuvent être répertoriées selon plusieurs critères. Elles sont classifiées, de point de vue administratif, d'après la vitesse de référence, elle-même établie en fonction des conditions du terrain.

- Les chemins communaux: s'étendent dans l'espace d'une même commune ;
- Les chemins départementaux ou chemins de wilaya: desservent uniquement une wilaya et sont à la charge de celle-ci ;
- Les routes nationales: représentent des voies de grandes communication et d'intérêt commun pour le pays. Elles constituent des itinéraires interdépartementaux qui supportent un grand trafic. Ces routes sont construites, aménagées et entretenues au frais de l'état ;

Les autoroutes: Ce sont des routes nationales d'une catégorie spéciale dont elles sont réservées à la circulation mécanique rapide.

I.1.3.2 Classification de routes en Algérie selon le B40

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 du territoire à savoir (NTAR -B40, 1977) (Figure I.1):

- Catégorie 1 : Liaisons entre les grands centres économiques, les centres d'industrie lourde (A), Liaisons assurant le rabattement des centres d'industrie de transformation (B) sur ce réseau ;
- Catégorie 2 : Liaisons entre les centres d'industrie de transformation (B), Liaisons assurant le rabattement des pôles d'industries légères diversifiées (C) sur le réseau précédent (Cat .1.) ;
- Catégorie 3 : Liaisons des chefs-lieux de daïra et de wilaya (D) non desservis par le réseau précédent, avec le réseau des catégories 1 et 2 ;
- Catégorie 4 : Liaisons des centres de vie (E) avec le réseau des catégories 1 et 3 ;
- Catégorie 5 : Routes et pistes non comprises dans les catégories précédentes.

Remarque : Le « B40 » portant les différentes normes techniques d'aménagement des routes est utilisé en Algérie. (Link: <http://www.notices-pdf.com/norme-b40-routes-algerien-pdf.html>).

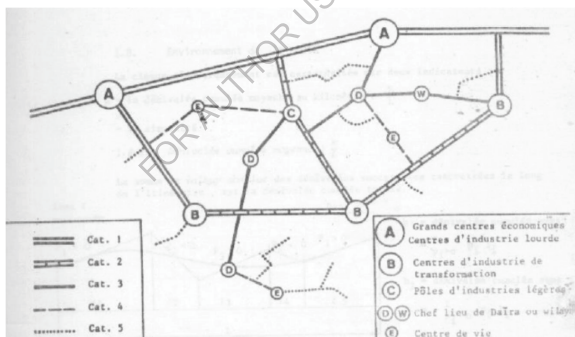


Figure I.1 – Classification des routes en Algérie (NTAR -B40, 1977).

I.2 Choix des itinéraires

I.2.1 Règles à respecter dans le tracé en plan

Le « tracé en plan » d'une route est, avec le « profil en travers » et le « profil en long », un des trois éléments qui permettent de caractériser la géométrie d'une « route ». Il est constitué par la projection horizontale sur un « repère cartésien » topographique de l'ensemble des points définissant le tracé de la route. La conception ou l'élaboration d'un tracé en plan s'appuiera sur les règles suivantes (sauf dans des cas exceptionnels) :

Respecter les valeurs des paramètres géométriques préconisés par les règlements en vigueur ;
Eviter les angles rentrants en déblai, car il faut éviter la stagnation des eaux et assurer leur écoulement ;

Un profil en long en léger remblai est préférable à un profil en long en léger déblai, qui complique l'évacuation des eaux et isole la route du paysage ;

Rechercher un équilibre entre les volumes de remblais et les volumes de déblais.

Eviter une hauteur excessive en remblai ;

1.2.2 Eléments du tracé en plan

La disposition générale du tracé est dans ses grandes lignes déterminée par un ensemble de contraintes identifiées dans le cadre des études préalables et relevant des domaines de l' « *environnement* », de la « *topographie* », de la « *géologie* » ou de l'habitat croisées avec les fonctionnalités attendues de la voie (localités à desservir, points de passage obligés pour le tracé, etc.).

Le tracé en plan est profondément marqué par l'influence de la dynamique des « *véhicules* » : leur stabilité n'est acquise qu'à condition de respecter les lois liant « *vitesse* » du véhicule, rayon de courbure du tracé en plan et dévers de chaussée (comprenant l'effet des « *forces centrifuges* »). Il faut tenir compte également de l'influence des facteurs physiologiques intervenant lors de la conduite et éventuellement des problèmes de visibilité (il faut rendre visible une certaine longueur de trajet pour pouvoir conduire). Le tracé en plan comporte (Figure I.2):

Des alignements droits ;

Des arcs de cercle ;

Des arcs de courbe à courbure progressive : essentiellement des arcs de « *clothoïde* ».



Figure I.2 – Choix des itinéraires et éléments du tracé en plan.

1.2.3 Environnement de la route

L'environnement est par définition l'état actuel du « *relief* », et il y a trois classes d'environnement (E_1 , E_2 et E_3) ont été proposées et sont caractérisées par deux indicateurs à savoir:

La « *dénivelée* » cumulée moyenne « h/L » (Tableau I.1) ;

La « *sinuosité* » moyenne « L_s/L » (Tableau I.2).

Tableau I.1 – Classification du relief en fonction de la dénivelée cumulée moyenne (NTAR -B40, 1977).

N° de code	La dénivelée cumulée moyenne h /L	Classification
1	$h/L \leq 1,5\%$	Plat
2	$1.5\% < h/L \leq 4\%$	Vallonné
3	$4\% < h/L$	Montagneux

Tableau I.2 – Classification de la sinuosité (ϕ) (NTAR -B40, 1977).

N° de code	la sinuosité (ϕ) « $\phi = h / L$ »	Classification
1	$\phi \leq 0.1$	Faible
2	$0.1 < \phi \leq 0.3$	Moyenne
3	$0.3 < \phi$	Forte

L'association des deux paramètres précédents (la sinuosité moyenne et la dénivelée cumulée moyenne), nous donne les trois types d'environnement et ceci selon le **Tableau I.3** ci-dessous:

Tableau I.3 – Environnement en fonction du relief et de la sinuosité (NTAR -B40, 1977).

		Sinuosité		
		Faible	Moyenne	Forte
Relief	Plat	E ₁	E ₂	
	Vallonné	E ₂	E ₂	E ₃
	Montagneux		E ₃	E ₃

I.3 Etude du trafic routier

L'étude du trafic routier est un élément essentiel qui doit être préalable à tout projet de réalisation ou d'aménagement d'infrastructures de transport, elle permet de déterminer le type d'aménagement qui convient et, au-delà les caractéristiques à lui donner depuis le nombre de voie jusqu'à l'épaisseur de différentes couches de matériaux qui constituent la chaussée.

L'étude de trafic constitue un moyen important de saisie des grands flux à travers un pays ou une région, elle représente une partie appréciable des études de transport, et constitue parallèlement une approche essentielle de la conception des réseaux routiers. Cette conception repose, sur une partie stratégique, planification sur la prévision des trafics sur les réseaux routiers, qui est nécessaire pour:

Apprécier la valeur économique des projets.

Estimer les coûts d'entretien.

Définir les caractéristiques techniques des différents tronçons de la route.

I.3.1 Analyse des trafics existants

L'étude du trafic est une étape importante dans la mise au point d'un projet routier et consiste à caractériser les conditions de circulation des usagers de la route (volume, composition, conditions de circulation, saturation, origine et destination). Cette étude débute par le recueil des données.

I.3.1.1 Mesure des trafics

Cette mesure est réalisée par différents procédés complémentaires à savoir:

Les « *comptages* » qui permettent de quantifier le trafic ;

Les « *enquêtes* » qui permettent d'obtenir des renseignements qualitatifs.

I.3.1.2 Méthodes de comptages des trafics

C'est l'élément essentiel de l'étude de trafic, on distingue deux types de comptage:

Les comptages manuels ;

Les comptages automatiques.

I.3.1.2.1 Les comptages manuels

Ils sont réalisés par les enquêteurs qui relèvent la composition du trafic pour compléter les indicateurs fournis par les comptages automatiques. Les comptages manuels permettent de connaître le pourcentage de poids lourds et les transports communs, Les trafics sont exprimés en moyenne journalière annuelle (TJMA).

I.3.1.2.1 Les comptages automatiques

Ils sont effectués à l'aide d'un appareil enregistreur comportant une détection pneumatique réalisée par un tube en caoutchouc tendu en travers de la chaussée. On distingue ceux qui sont permanents et ceux qui sont temporaires (Coquand, 1969):

Les « *comptages permanents* » sont réalisés en certains points choisis pour leur représentativité sur les routes les plus importantes: réseau autoroutier, réseau routier national et le chemin de Wilaya les plus circulés.

Le « *comptage temporaire* » s'effectue une fois par an durant un mois pendant la période où le trafic est intense sur les restes des réseaux routiers à l'aide de postes de comptages tournant. L'inconvénient de cette méthode est que tous les matériels de comptage actuellement utilisés ne détectent pas la différence entre les véhicules légers et les poids lourds.

I.3.2 Différents types de trafics

Dans le domaine routier, on utilise la notion de classe de trafic dans le dimensionnement des chaussées. Quatre types de trafics peuvent être distingués à savoir :

I.3.2.1 Trafic normal

C'est un trafic existant sur l'ancien aménagement sans prendre compte du nouveau projet (nouvelle route aménagée).

I.3.2.2 Trafic dévié

C'est le trafic attiré vers la nouvelle route aménagée (Trafics qui proviennent à partir d'autres voies voisines).

I.3.2.3 Trafic induit

C'est le trafic qui résulte des nouveaux déplacements des personnes qui s'effectuent et qui en raison de la mauvaise qualité de l'ancien aménagement routier.

I.3.2.4 Trafic total

C'est le trafic sur le nouvel aménagement qui sera la somme du trafic induit et dévie (NTAR-B40, 1977).

I.3.3 Calcul de la capacité d'une chaussée

La capacité est le nombre de véhicules qui peuvent raisonnablement passer par une direction de la route « ou deux directions » avec des caractéristiques géométriques et de circulation qui lui sont propres durant une période bien déterminée. La capacité s'exprime sous forme d'un débit horaire. Le calcul de la capacité dépend :

- Des conditions de trafic ;
- Des conditions météorologiques ;
- Du type d'usagers habitués ou non à l'itinéraire ;
- Des distances de sécurité (ce qui intègre le temps de réaction des conducteurs variables d'une route à l'autre) ;
- Des caractéristiques de la section considérée (nombre et largeur de voies).

I.3.3.1 Définition de la capacité d'une chaussée

La capacité et le nombre de véhicules qui peuvent raisonnablement passer sur une direction de la route « ou deux directions » avec des caractéristiques géométriques de circulation qui lui sont propres durant une période bien déterminée, la capacité s'exprime sous forme d'un débit horaire. La capacité d'une chaussée dépend.

- Les conditions de trafic ;
- Les conditions météorologiques ;
- Le type d'usagers habitués ou non à l'itinéraire ;
- Des distances de sécurité (ce qui intègre le temps de réaction des conducteurs variables d'une route à l'autre) ;
- Des caractéristiques géométriques de la section considérée (nombre et largeur des voies).

I.3.3.2 Calcul du trafic journalier moyen annuel horizon « TJMA_h »

Pour un calcul fiable du trafic routier, le comptage doit se faire sur des voies de chaussées relativement plates et loin des carrefours et des échangeurs. La formule qui donne le trafic journalier moyen annuel à l'année horizon est :

$$TJMA_h = TJMA_0 * (1 + \tau)^n \quad (\text{Eq. I.1})$$

Où :

TJMA_h : Trafic journalier moyen annuel à l'année horizon ;

TJMA₀ : Trafic journalier moyen annuel à l'année zéro (ou à l'année de référence) ;

n : Nombre d'année ;

τ : Taux d'accroissement du trafic (%).

I.3.3.3 Calcul du trafic effectif « T_{eff} »

C'est un trafic traduit en « unités de véhicules particuliers (uvp) » en fonction du type de route et de l'environnement : Pour cela, on utilise des coefficients d'équivalence pour convertir les « Poids lourds (PL) » en « uvp ». Le trafic effectif (T_{eff}) est donné par la relation :

$$T_{eff} = TJMA_n * [(1 - Z) + P * Z] \quad (\text{Eq. I.2})$$

Où :

T_{eff} : Trafic effectif à l'année horizon en (uvp/j) ;

Z : pourcentage de poids lourds (%) ;

P : coefficient d'équivalence pour le poids lourd, il dépend de la nature de la route (Tableau I.4).

Tableau I.4 – Coefficients d'équivalence pour les poids lourds « P » (NTAR -B40, 1977).

N° de Voies	Environnement		
	E ₁	E ₂	E ₃
2 voies	3	6	12
3 voies	2.5	5	10
4 voies et plus	2	4	8

I.3.3.4 Débit de pointe horaire normal « Q_h »

Le débit de pointe horaire normal est une fraction du trafic effectif à l'horizon lequel s'exprime en unité de véhicule particulier (uvp) et donné par la formule:

$$Q_h = \frac{1}{n} * T_{eff} \quad (\text{Eq. I.3})$$

Où :

Q_h : Débit de pointe horaire à l'année horizon (uvp/h) ;

n : Nombre d'heure, (en général « $n = 8$ » heures, donc $1/n = 1/8 = 0.125$, mais généralement on prend la valeur de $1/n = 0.12$) ;

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

I.3.3.5 Calcul de la capacité théorique « C_{th} »

$$C_{th} \geq \frac{Q_h}{K_1 * K_2} \quad (\text{Eq. I.4})$$

Où :

C_{th} : Capacité effective du profil en travers pour un écoulement en régime stable (uvp/h) ;

Q_h : Débit de l'année horizon (uvp/h) ;

K_1 : Coefficient lié à l'environnement ;

K_2 : Coefficient de réduction de capacité.

I.3.3.6 Débit horaire admissible « Q_{adm} »

Le débit horaire maximal accepté « *Débit horaire admissible (Q_{adm})* » par voie est déterminé par application de la formule suivante:

$$Q_{adm} = K_1 * K_2 * C_{th} \quad (\text{Eq. I.5})$$

Où :

K_1 : Coefficient lié à l'environnement (Tableau I.5) ;

K_2 : Coefficient de réduction de capacité lié à l'environnement et à la catégorie de la route (Tableau I.6) ;

C_{th} : Capacité effective du profil en travers pour un écoulement en régime stable (uvp/h) (Tableau I.7).

Tableau I.5 – Valeur de « K_1 » (NTAR -B40, 1977).

Environnement	E ₁	E ₂	E ₃
K_1	0.75	0.85	0.90 à 0.95

Tableau I.6 – Valeur de « K_2 » (NTAR -B40, 1977).

Environnement	Catégorie de la route				
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
E ₁	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E ₂	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98
E ₃	0.91	0.95	0.97	0.96	0.96

Tableau I.7 – Valeur de « C_{th} » (NTAR -B40, 1977).

N° de voies	Capacité théorique (uvp/h)
Route à 2 voies de 3.5m	1500 à 2000
Route à 3 voies de 3.5m	2400 à 3200
Route à chaussée séparée	1500 à 1800

I.3.3.7 Détermination du nombre de voies « N »

Cas d'une chaussée unidirectionnelle : le nombre de voie à retenir par chaussée est le nombre le plus proche du rapport (NTAR -B40, 1977).

$$Q_h = S * \frac{Q}{Q_{adm}} \quad (\text{Eq. I.6})$$

Où:

N : Nombre de voies ;

S : Coefficient de dissymétrie, en général égale à 2/3 ;

Q_{adm} : Débit admissible par voie (uvp/h) ;

Q : Débit de l'année horizon (uvp/h) (ne pas l'année de mise en service).

I.3.3.8 Calcul du débit de saturation « Q_{sat} »

$$Q_{sat} = 4 * Q_{adm} \quad (\text{Eq. I.7})$$

Où :

Q_{sat} : Débit de saturation (uvp/h) ;

Q_{adm} : Débit admissible par voie (uvp/h).

I.3.3.9 Calcul de l'année de saturation « n »

$$n = \frac{\ln(\frac{Q_{sat}}{Q_h})}{\ln(\frac{1}{1-\tau})} \quad (\text{Eq. I.8})$$

Où :

n : Année de saturation ;

Q_{sat} : Débit de saturation (uvp/h) ;

Q_{adm} : Débit admissible par voie (uvp/h) ;

Q_h : Débit à l'année horizon (uvp/h) ;

τ : Taux d'accroissement du trafic (%).

I.4 Profil en long

I.4.1 Définition

Le « *profil en long* » est une coupe longitudinale du terrain suivant un plan vertical passant par l'axe de la route. Il se compose de segments de droite de déclivité en pente et des raccordements circulaires, ou parabolique. Ces pentes et rampes peuvent être raccordées entre elles soit par des « *angles saillants* » ou par des « *angles rentrants* ». La courbe de raccordement les plus courants utilisés est le « *parabolique* » qui facilite l'implantation des points du projet.

I.4.2 Eléments composant le profil en long

Le profil en long est constitué d'une succession de segments de droites (pentes) raccordés par des courbes circulaires, pour chaque point du profil en long on doit déterminer:

L'altitude du terrain naturel « Z » (en mètre) ;

L'altitude du projet ou appelée aussi la ligne rouge de la route (en mètre) ;

La déclivité ou la pente du projet.

I.4.3 Coordination du tracé en plan et du profil en long

Il est très nécessaire de veiller à la bonne coordination du tracé en plan et du profil en long en tenant compte également de l'implantation des points d'échange afin:

D'avoir une vue satisfaisante de la route autre que les conditions de visibilité minimale ;

D'envisager de loin l'évolution du tracé ;

De distinguer clairement les dispositions des points singuliers (carrefours, échangeurs, etc.).

I.4.4 Déclivités

On appelle déclivité d'une route la tangente de l'angle qui fait le profil en long avec l'horizontale.

I.4.4.1 Déclivité minimale

Dans un terrain plat on n'emploie normalement jamais de pente nulle de façon à ce que l'écoulement des eaux pluviales s'effectue facilement au long de la route et au bord de la chaussée. On adopte en général les pentes longitudinales minimales d'au moins 0.5% et de préférences 1 %, si possible.

I.4.4.2 Déclivité maximale

La déclivité maximale est acceptée particulièrement dans les courtes distances inférieures à 1500m, à cause de la réduction de la vitesse et de l'effort de freinage des poids lourds qui est très important (l'usure de pneumatique en cas de pente max). Donc, la déclivité maximale dépend des conditions d'adhérence et de la vitesse minimale du poids lourd (Tableau I.8).

Tableau I.8 – La pente maximale en fonction de la vitesse de référence (NTAR -B40, 1977).

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

I.4.5 Raccords en profil en long

Le changement de déclivités constitue des points particuliers dans le profil en long; ce changement doit être pris en compte par l'aménagement de raccordement circulaire qui y doit satisfaire les conditions de visibilité et de confort, on distingue deux types de raccords à savoir (Figure I.3):

Les raccords en angle saillant (convexes).

Les raccords en angles rentrants (concaves).

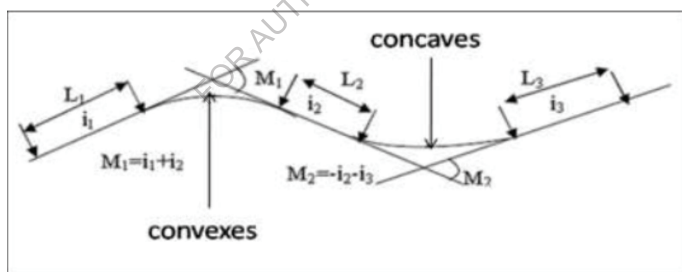


Figure I.3 – Les éléments géométriques du profil en long.

I.4.6 Détermination pratiques du profil en long

I.4.6.1 Raccordement en forme convexe

Pratiquement, le calcul des paramètres géométriques des raccords nécessite la connaissance des données suivantes (Figure I.4):

- Les coordonnées (abscisse, altitude) des points « $A(X_A, Z_A)$ » et « $D(X_D, Z_D)$ » ;
- Les coordonnées (abscisse, altitude) du point « $S(X_S, Z_S)$ » pour calculer les deux pentes « $P_{1(AS)}$ » et « $P_{2(DS)}$ » des droites « (AS) » et « (DS) », respectivement ;
- La valeur du rayon « R ».

Remarque : Connaissant la distance horizontale « X » entre les deux points « A » et « S » et la pente « P_1 », les coordonnées (abscisse, altitude) du point « $S(X_S, Z_S)$ » peuvent être calculées comme suit :

$$S(X_S, Z_S) \begin{cases} X_S = X_A + X & (m) & (Eq. I.9) \\ Z_S = Z_A + X * P_1 & (m) & (Eq. I.10) \end{cases}$$

a)- Calcul des pentes « $P_{1(AS)}$ et $P_{2(DS)}$ »

Les deux pentes « $P_{1(AS)}$ » et « $P_{2(DS)}$ » peuvent être des valeurs positives ou négatives. Elles peuvent être calculées comme suit :

$$P_{1(AS)} = \left(\frac{Z_S - Z_A}{X_S - X_A} \right) * 100 \quad (\%) \quad (Eq. I.11)$$

$$P_{2(DS)} = \left(\frac{Z_S - Z_D}{X_S - X_D} \right) * 100 \quad (\%) \quad (Eq. I.12)$$

b)- Calcul de la tangente « T »

La « tangente » peut être calculée comme suit :

$$T = \left(\frac{R}{2} \right) * [Abs(P_1) + Abs(P_2)] \quad (m) \quad (Eq. I.13)$$

Remarque : « T » est une distance exprimée en « m ».

c)- Calcul de la flèche « H »

La flèche « H » représente la distance entre le « *raccordement* » et le point « S ».

$$H = \frac{T^2}{2R} \quad (m) \quad (Eq. I.14)$$

d)- Calcul des coordonnées des points de tangentes « B, C et J »

Cordonnées du point « B »

$$B(X_B, Z_B) \begin{cases} X_B = X_S - T & (m) & (Eq. I.15) \\ Z_B = Z_S - T * P_1 & (m) & (Eq. I.16) \end{cases}$$

Cordonnées du point « C »

$$C(X_C, Z_C) \begin{cases} X_C = X_S + T & (m) & (Eq. I.17) \\ Z_C = Z_S + T * P_2 & (m) & (Eq. I.18) \end{cases}$$

Cordonnées du point « J »

$$J(X_J, Z_J) \begin{cases} X_J = X_B + R * P_1 & (m) & (Eq. I.19) \\ Z_J = Z_B + R * (P_1)^2 - \left[\frac{(R * P_2)^2}{2R} \right] & (m) & (Eq. I.20) \end{cases}$$

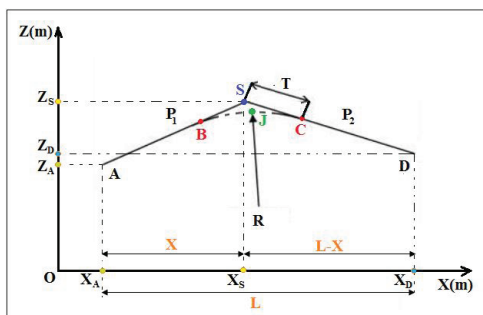


Figure I.4 – Cas de raccordement par un rayon convexe.

I.4.6.2 Raccordement en forme concave

En se basant sur les mêmes équations suscitées (d'Eq. I.9 à Eq. I.20) pour calculer les paramètres géométriques des raccordements qui ont une forme convexe (Figure I.5).

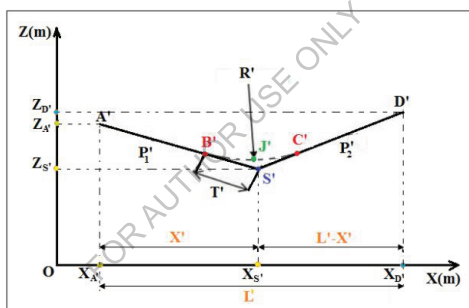


Figure I.5 – Cas de raccordement par un rayon concave.

I.5 Profil en travers

I.5.1 Définition

Le « profil en travers » est une coupe transversale menée selon un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la route projetée. Cependant, un projet routier comporte le dessin d'un grand nombre de profils en travers. En effet, on établit tout d'abord un profil unique appelé « profil en travers type » contenant toutes les dimensions et tous les détails constructifs (largeurs des voies, chaussées et autres bandes, pentes des surfaces et talus, dimensions des couches de l'infrastructure, système d'évacuation des eaux,... etc.).

I.5.2 Différents types des profils en travers

I.5.2.1 Profil en travers type

Le «profil en travers type» est une pièce de base dessinée dans les projets de nouvelles routes ou l'aménagement de routes existantes. Il peut être totalement en déblai, totalement en remblai ou mixte remblai/déblai (Figures I.6, I.7 et I.8).

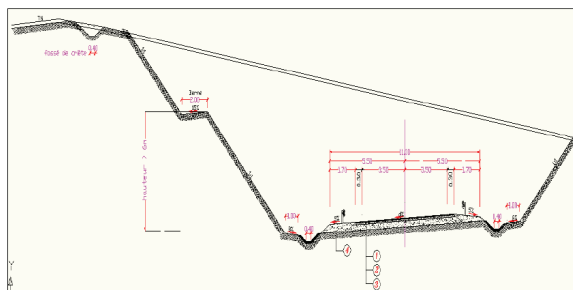


Figure I.6 – Profil en travers type totalement en déblai.

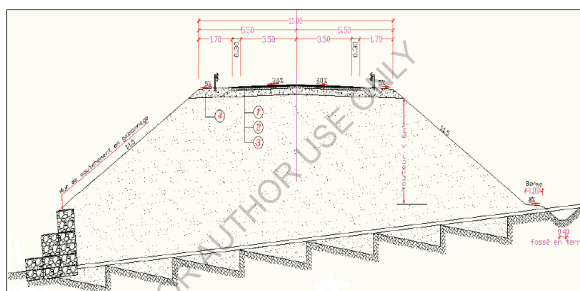


Figure I.7 – Profil en travers type totalement en remblai.

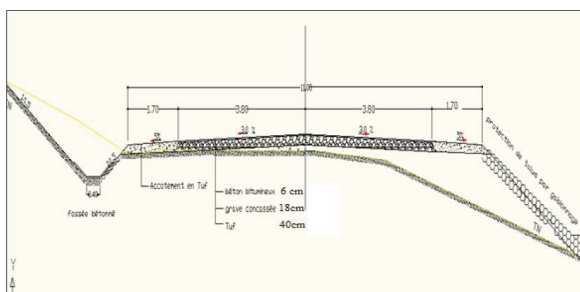


Figure I.8 – Profil en travers type mixte déblai/remblai.

I.5.2.2 Profil en travers courant

Ce sont des profils dessinés à des distances régulières qui dépendent du terrain naturel (relief plat, vallonné ou accidenté/montagneux).

I.5.3 Eléments géométriques d'un profil en travers

Les principaux éléments géométriques du profil en travers type sont présentés dans la Figure I.9 :

La « *chaussée* »: C'est la partie affectée à la circulation des véhicules.

La « *largeur roulable* »: Elle comprend les sur largeurs de la chaussée, la chaussée et la bande d'arrêt.

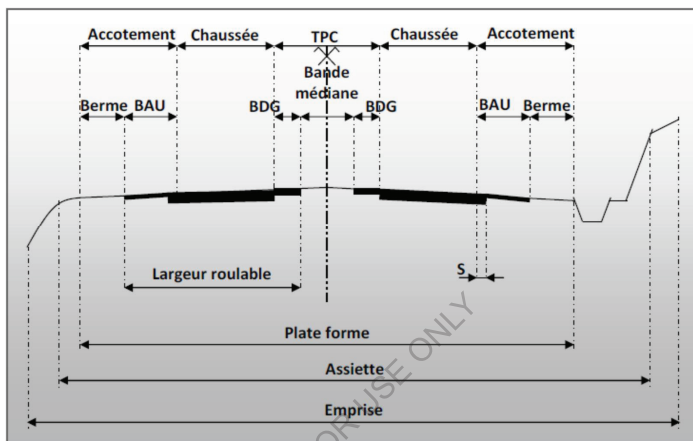


Figure I.9 – Eléments géométriques d'un profil en travers.

La « *plate forme* »: C'est la surface de la route située entre les fossés ou les crêtes des talus de remblais, comprenant la chaussée et les accotements, éventuellement les terre-pleins et les bandes d'arrêts.

L'« *assiette* »: C'est la surface de la route délimitée par les terrassements.

L'« *emprise* »: C'est la surface du terrain naturel affectée à la route et à ses dépendances (talus, Chemins de désenclavement, exutoires, etc.) limitées par le domaine public.

Les « *accotements* »: En dehors des agglomérations, les accotements sont dérasés. Ils comportent Généralement les éléments suivants : une bande de guidage, une bande d'arrêt et une berme extérieure.

Le « *terre-plein central* » ou le « *TPC* »: Il s'étend entre les limites géométriques intérieures des chaussées. Il comprend les sur largeurs de la chaussée (bande de guidage) et une partie centrale engazonnée, stabilisée ou revêtue.

Le « *fossé* »: C'est un ouvrage hydraulique destiné à recevoir les eaux de ruissellement provenant de la route et des talus et les eaux de pluie.

I.5.4 Eléments d'assainissement de la plate forme d'une chaussée routière

L'assainissement des voies de circulation comprend l'ensemble des dispositifs à prévoir et réaliser pour récolter et évacuer toutes les eaux superficielles et les eaux souterraines (Figure I.10).

L'« assèchement de la surface de circulation » : il peut se faire par des pentes transversales et longitudinales et par des fossés, cunettes et rigoles ;

Le « drainage » : il s'agit des ouvrages enterrés récoltant et évacuant les eaux souterraines par l'installation des canaux souterrains ;

Les « canalisations » : ce sont des ouvrages destinés à l'écoulement des eaux superficielles.

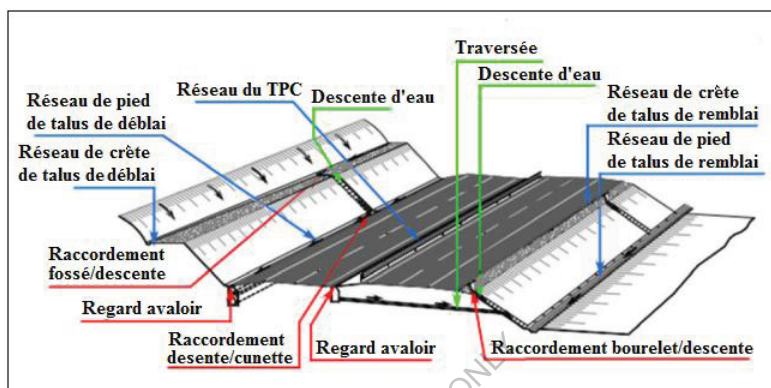


Figure 1.10 – Elément d'assainissement de la plate forme d'une chaussée routière.

Le « réseau de pied de talus de déblai » : En ce qui concerne les eaux superficielles, ce réseau récupère les eaux issues de la chaussée, de l'accotement et du talus, il est constitué d'un fossé peu profond, bétonné et aux formes de trapézoïdale pour améliorer la sécurité du talus. Dans le cas où les eaux de ruissellement sont collectées à différents niveaux sur le talus, le réseau comprend aussi des ouvrages de raccordement: descentes d'eau à cunette ou à collecteur.

Le « réseau de pied de talus de remblai » : Ce type de réseau a deux fonctions différentes (i) de canaliser les eaux issues de la plate-forme jusqu'à l'exutoire (ii) et de collecter et canaliser vers un ouvrage de traversée les eaux de ruissellement sur le terrain naturel vers le remblai. En effet, dans les deux cas, et pour les consécutions d'entretien, le fossé est réalisé à une distance minimale de 1m du pied de talus. Pour des remblais de faible hauteur, sans glissière, il est recommandé d'adoucir le profil du fossé pour améliorer le comportement d'un véhicule qui quitterait la plate-forme. Dans certain cas la pente du talus peut également être adoucie pour améliorer la sécurité.

Le « réseau de crête de talus de remblai » : Il a pour rôle d'éviter l'érosion du talus lorsque la chaussée est déversée vers l'extérieur. Le risque d'érosion augmente avec la hauteur et la pente des talus, il dépend également de la pluviosité locale, de la cohésion du sol et de la présence ou de l'état de végétation. En principe, on prévoit un tel réseau dès que la hauteur du talus dépasse 2m dans les régions où les pluies ont une forte intensité, ou 4m dans les autres cas.

Le « réseau de crête de talus de déblai » : Ce réseau ne se justifie que si le terrain naturel constitue, par sa pente et son étendue, un bassin versant dont l'apport d'eau risque de provoquer l'érosion du talus. Mal réalisé ou peu entretenus, ces ouvrages peuvent en effet

compromettre la stabilité des talus. Leur réalisation doit donc rester exceptionnelle. Ce réseau doit être constitué d'un ouvrage entièrement revêtu, afin d'éviter les infiltrations dans le talus, et être implanté en léger retrait (1 à 2 m) par rapport à la crête du talus.

I.6 Terrassements

I.6.1 Définition

Le « *terrassement* » consiste, par définition, à modifier la topographie d'un site conformément aux indications prescrites par des plans. Ces modifications peuvent être *modestes* (excavation requise pour installer des fondations superficielles d'un bâtiment), *linéaires* (aménagement d'une structure routière, construction d'une digue) ou *complexes* (construction des approches d'un échangeur routier multiple).

La construction d'une route exige la mise en forme de l'assise et de la plateforme qui vont recevoir le corps de chaussée et les équipements y afférents, cette mise en forme nécessite des opérations appelées « *Terrassements* ». Le fait de « *terrasser* » est un travail composite pouvant comprendre l'extraction de matériaux, au compactage, avec peut être du décapage de la terre végétale, et de la mise en dépôt des terres. Il n'existe pas un seul matériau à terrasser mais plusieurs sortes possibles : Rochers, terre, gravier, sable, limon, argile... etc. Cependant, il est à noter que les modes de quantification pour la facturation sont fonction du type de terrassement, de la nature du terrain, des dimensions des fouilles et de l'accessibilité du site.

I.6.2 Types de terrassements

Plusieurs types de terrassement (Figures I.11, I.12, I.13, I.14, I.15 et I.16) peuvent être distingués à savoir :

Figure I.11 – Décapage en surface (décapage de la terre végétale) : L'épaisseur de la couche à décaper varie de 20 à 30 cm. On quantifie souvent ce décapage en m^2 .

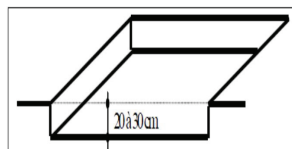


Figure I.12 – Fouilles en pleine masse ou en excavation : Il englobe des travaux d'envergure aussi bien en surface qu'en hauteur.

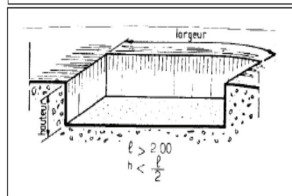


Figure I.13 – Fouilles en rigoles pour fondations : Elles correspondent aux semelles filantes (fondations sous les murs et les voiles de l'ouvrage). La quantification se fait en m^3 .

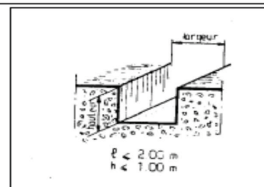


Figure I.14 – Fouilles en trous pour fondations : Elles correspondent aux semelles isolées (ex: fondations sous les poteaux, sous les murs isolés de petites dimensions).

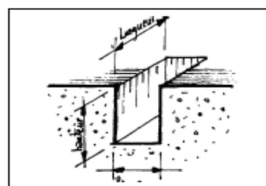


Figure I.15 – Fouilles en tranchées : Elles sont réalisées en général pour la pose de canalisations.

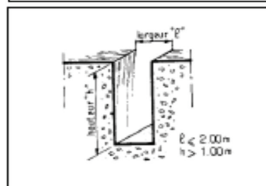
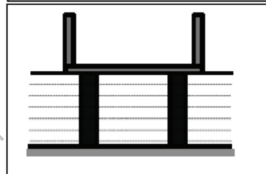


Figure I.16 – Fouilles en puits : Ces fouilles permettent la réalisation de fondations semi-profondes qui transmettent les charges de l'ouvrage sur un sol approprié.



I.6.3 Le Blindage des fouilles

La hauteur parfois importante de ces terrassements impose la mise en place d'un blindage. En règle générale, le blindage est requis à partir d'une profondeur de 1.30 m pour les tranchées de largeur inférieure à 1.00 m (Figure I.17).

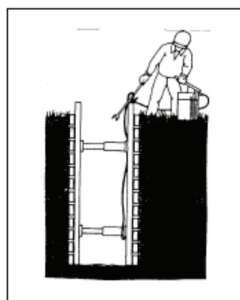
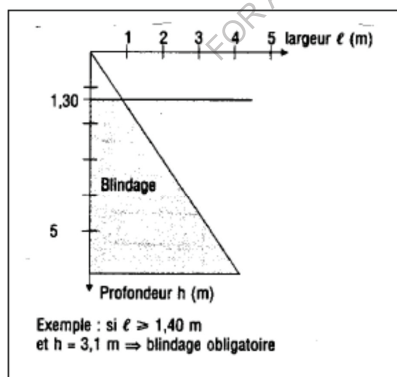


Figure I.17 – Conditions générales pour la mise en place d'un blindage.

Les types de blindages utilisés pour la stabilisation des fouilles vis-à-vis de l'effondrement sont les parois berlinoises, parois moulées, rideaux de palplanches, parois clouées, ...etc.

I.6.4 Terrassement en présence d'eau

La présence d'eau dans les sols modifie de manière non négligeable ses caractéristiques et les modes de terrassements pour cela il faut :

- Collecter les eaux de ruissellement ;
- Pomper les venues d'eau (faible) ou drainer ;
- Dans le cas de la présence d'une nappe phréatique permanente, il faut procéder à un rabattement de nappe.

I.6.5 Terrassement déblai/remblai

On distingue deux opérations majeures dans les activités de terrassement, le déblai et le remblai (Figure I.18).

Le « *déblai* » consiste à retirer et à transporter sur le site du projet ou à l'extérieur de celui-ci, des sols découpés ou excavés « *le déblai consiste à enlever des terres* ».

Le « *remblai* » consiste à transporter à partir du site du projet ou de l'extérieur de ce dernier (gîte d'emprunt : terrain d'emprunt), des matériaux conformes à l'usage et aux spécifications techniques « *le remblai consiste à apporter des terres* ».

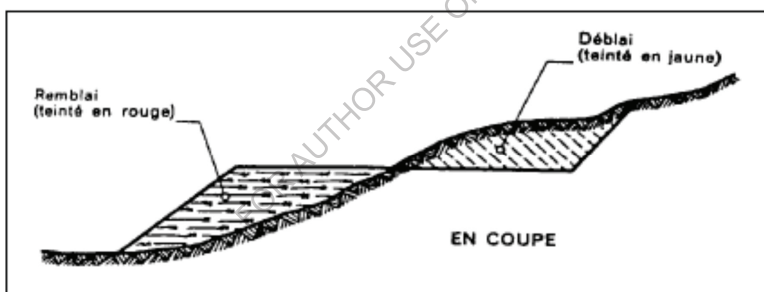


Figure I.18 : Terrassement déblai/remblai.

I.6.6 Travaux préparatoires avant terrassement

Avant d'entamer l'exécution des terrassements, des travaux préparatoires (préalables) doivent être effectués dont les plus importants sont :

- Débroussaillage ou bien abattage d'arbres (débroussaillage veut dire : décapage de la terre végétale) ;
- Décapage de la terre végétale et éventuellement tous les sols organiques ;
- Déplacements éventuels de réseaux existants (réseaux d'électricité, conduites d'eau, etc.) ;
- Installation du chantier ;
- Piquetage général (travaux topographiques pour le tracé en plan).

I.6.7 Problème du foisonnement

I.6.7.1 Définition

Lorsque l'on creuse en trou dans le sol, le volume apparent des déblais est supérieur au volume du trou. Si l'on remet les déblais en place et après compactage, l'on constate un excédent de matériaux. Ce phénomène de décompression des terres est appelé « *foisonnement* ».

I.6.7.2 Types de volumes causés par un terrassement

Les différents types de volumes causés par un terrassement sont (Figure I.19) :

Le « *volume en place* : V_p » : il correspond à l'état initial en place c'est-à-dire avant excavation ;

Le « *volume foisonné* : V_f » : il correspond à l'état foisonné c'est-à-dire après excavation ;

Le « *volume reconstitué* : V_r » : il correspond à l'état reconstitué ou compacté.

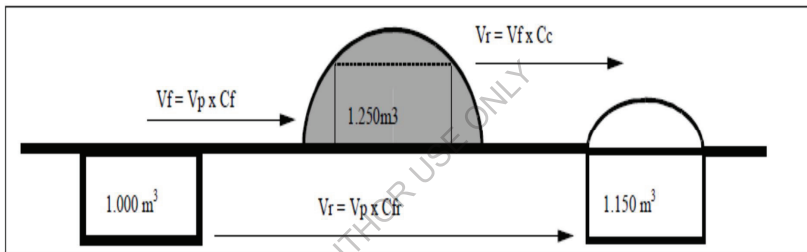


Figure I.19 – Différents types de volumes causés par un terrassement.

I.6.7.3 Coefficients relatif au terrassement

Le « *coefficient de foisonnement* : C_f » : Il permet d'évaluer le volume apparent foisonné « V_f » d'un terrain déplacé en fonction du volume en place « V_p » :

$$C_f = \frac{V_f}{V_p} \quad (\text{Eq. I.21})$$

Le « *coefficient de compactage* : C_c » : Il permet l'évaluation du volume reconstitué « V_r » de ce même volume foisonné « V_f » après sa mise en place et son compactage définitif. Il est rare d'obtenir un volume de terrain reconstitué « V_r » égal au volume initial en place « V_p » :

$$C_c = \frac{V_r}{V_f} \quad (\text{Eq. I.22})$$

Le « *coefficient de foisonnement résiduel* : C_{fr} » : Si on substitue « V_f » de l'équation (I.21) dans l'équation (I.22) on obtient :

$$V_r = V_p * C_f * C_c \quad (\text{Eq. I.23})$$

Le coefficient de foisonnement résiduel est noté « C_{fr} » :

$$C_{fr} = C_f * C_c \quad (\text{Eq. I.24})$$

Ou encore :

$$C_{fr} = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{Eq. I.25})$$

Dans le cas des terrassements routiers ou sur les chantiers de terrassement très importants, il est intéressant de prévoir l'exacte quantité à extraire pour obtenir un volume reconstitué bien précis. Cela évite les mouvements de terre inutiles et donc onéreux.

I.6.8 Pente des talus

Pour obtenir un équilibre stable, nécessaire à la bonne tenue des terres en remblais et des tranchées, il convient de donner aux talus qui limitent ces terrassements une inclinaison convenable (Figure I.20). Cette pente peut se définir :

Soit par la « *tangente de l'angle (pente)* » que fait ce talus avec l'horizontale (ex : talus à 4/5 ou à 0.80 m ou encore à 80%) ;

Soit par la « *cotangente de l'angle (inclinaison)* » dont la valeur s'exprime généralement comme celle de la tangente par une fraction (ex : talus à 3/2, 1/1, 2/3,... etc.)

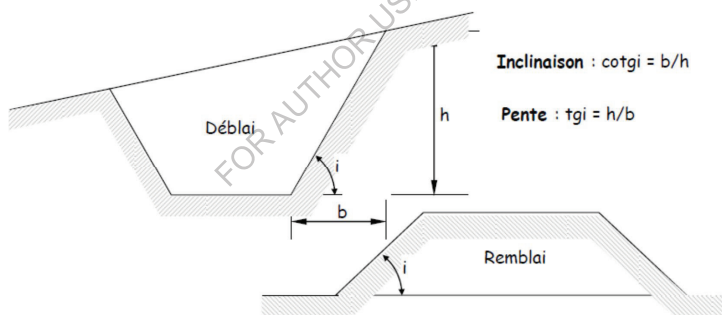


Figure I.20 – Stabilité ou équilibre des terres en remblais et des tranchées.

L'« *angle des talus : i* » doit toujours être inférieur à l'« *angle de frottement interne appelé : ϕ* », ce dernier étant caractérisé par ce que l'on appelle la pente naturelle des terres, c'est à dire, l'inclinaison que prend un talus soumis à l'action des seuls agents atmosphériques. Cet « *angle de frottement interne* » dépend essentiellement de la nature du degré de consistance et de la teneur en eau du terrain.

En terrain meubles, le degré de consistance du terrain a une grande influence sur la valeur de l'« *angle ϕ* », qui est plus grande pour les talus de déblais en terrain vierge (terrain naturel) que pour les talus de déblais en terrain rapporté et les talus de remblais. Cette différence tient au fait que le glissement, les unes sur les autres, des particules constituant une terre meuble, rencontre dans des terrains non fraîchement remués, une résistance distincte de celle provoquée par le frottement réciproque des particules. Cette résistance appelée « *Cohésion* ».

En ce qui concerne la « teneur en eau » du terrain, c'est un correctif important à la valeur de l'angle ϕ , car elle facilite le glissement des particules les unes sur les autres, en adoucissant leur frottement, ce qui a pour effet de réduire sensiblement cet angle quand le degré d'humidité est élevé. Il faut signaler cependant que les sables humides possèdent une cohésion qu'ils n'ont pas quand ils sont secs ou immergés.

Compte tenu de ces considérations, il faut donc éviter de donner aux talus une pente plus raide que celle du talus naturel de la terre correspondante possédant un degré d'humidité identique. Pratiquement, la valeur « ϕ » variant dans des limites assez étendues, il convient d'adopter pour les talus de terrassement les valeurs de l'angle « i » données dans le [Tableau I.9](#).

Tableau I.9 – Quelques valeurs usuelles (Angle du talus naturel et Coefficient de foisonnement) de certains types de terrains (Remarque : les terrains sont classés selon les difficultés d'extraction).

Désignation	Nature des terres	Angle du talus naturel	Coefficient de foisonnement
Terrain ordinaire	Sable	10 à 25°	10 à 20 %
	Gravier	30 à 40°	25 %
	Terre végétale	30 à 50°	10 à 25 %
Terrain semi-compact ou moyen	Cailloux	40 à 50°	50 %
Terrain compact	Argile	30 à 50°	25 %
	Marne	30 à 45°	25 %
Roches	Grès tendre	50 à 90°	50 %
	Roches diverses	50 à 90°	Plus de 50 %

I.7 Calcul des cubatures

I.7.1 Rappel « profil en long »

Le profil en long représente la section du sol et celle de la plate-forme de la voie de communication ou du bâtiment sur un plan vertical passant par l'axe du tracé développé ensuite sur un plan ([Figure I.21](#)).

Les abscisses sont à l'échelle des longueurs, les distances comptées horizontalement suivant l'axe à l'origine du tracé.

Les ordonnées sont à l'échelle des hauteurs, les altitudes comptées par rapport à un plan horizontal de référence (plan de comparaison)

Orientation de la gauche vers la droite.

I.7.2 Rappel « profil en travers »

Ce sont des sections transversales du sol et de ses aménagements par des plans verticaux perpendiculaires à l'axe de la voie ou du bâtiment.

Ces sections ne sont pas déformées, les échelles des longueurs et des hauteurs sont ici toujours les mêmes. Voilà un exemple du profil en travers ([Figure I.22](#)):

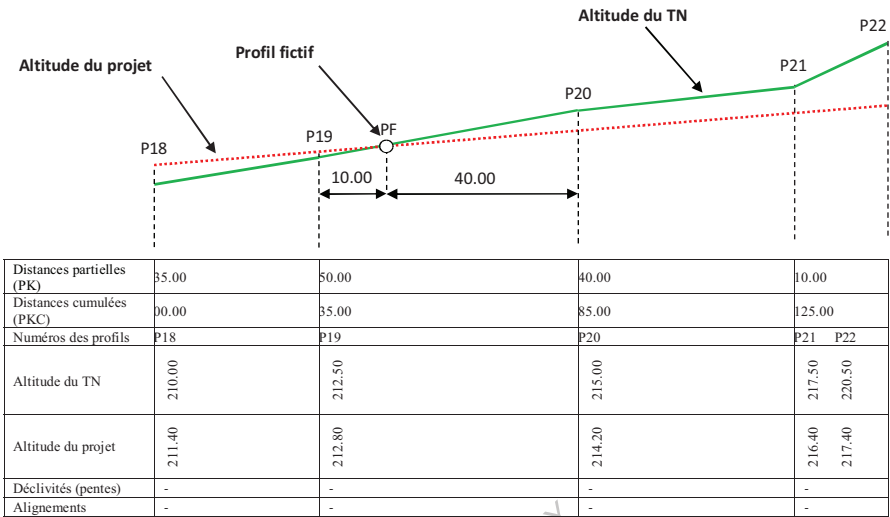


Figure 1.21 – Terrassements selon le profil en long d’un projet routier.

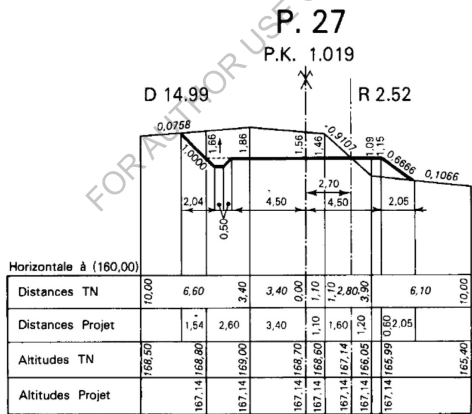


Figure 1.22 – Terrassements selon le profil en travers d’un projet routier.

1.7.3 Méthodes de calcul des cubatures

La « cubature des terrassements » est l'évaluation du « volume des terres à enlever ou à mettre en remblai » pour l'exécution du projet. Cette évaluation se fait de l'origine du projet vers l'extrémité, ce qui amène depuis un profil en travers quelconque à dénommer le profil précédent « profil arrière » et le suivant « profil avant ». Il existe trois méthodes de calcul des cubatures à savoir :

La méthode par le calcul des volumes élémentaires « des calculs longs et compliqués » ;

La méthode des aires/sections moyennes « *simple et facile* » ;
 La méthode des profils « *rarement utilisée* ».

Remarque : dans ce chapitre, on va s'intéresser seulement à la méthode des aires moyennes ou sections moyennes.

I.7.4 Calcul des cubatures par la méthode des aires moyennes

Cette méthode consiste à décomposer le profil en long en plusieurs profils transversaux là où on doit calculer les volumes de remblais ou de déblais entre deux aires (ou sections) consécutives (Figure I.23).

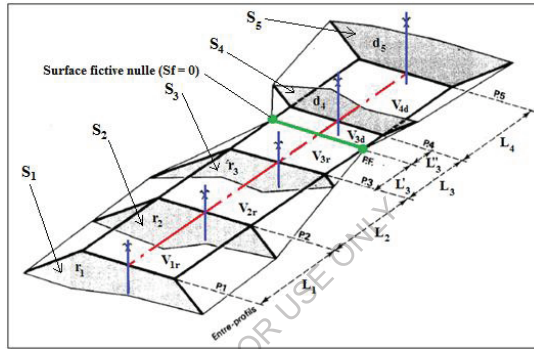


Figure I.23 – Calcul des cubatures par la méthode des aires (ou sections) moyennes.

I.7.4.1 Volume de remblais total « V_{rt} »

On applique la formule des « 3 niveaux » sur la Figure I.23 pour calculer les volumes de remblais et de déblais. Ce volume de remblai total peut être évalué par les formules ci-dessous :

Entre les deux profils P1 et P2 :

$$V_{1r} = L_1 * \frac{(S_1 + S_2)}{2} \quad (\text{Eq. I.26})$$

Entre les deux profils P2 et P3 :

$$V_{2r} = L_2 * \frac{(S_2 + S_3)}{2} \quad (\text{Eq. I.27})$$

Entre les deux profils P3 et PF :

$$V_{3r} = L'_3 * \frac{(S_3 + 0)}{2} \quad (\text{Eq. I.28})$$

Volume de remblai total dans tous les profils :

$$V_{rt} = V_{1r} + V_{2r} + V_{3r} + \dots + V_{nr} \quad (\text{Eq. I.29})$$

I.7.4.2 Volume de déblais total « V_{dt} »

Ce volume de déblais total peut être évalué par les formules ci-dessous :

Entre les deux profils PF et P4 :

$$V_{3d} = L''_3 * \frac{(0 + S_4)}{2} \quad (\text{Eq. I.30})$$

Entre les deux profils P4 et P5 :

$$V_{4d} = L_4 * \frac{(S_4 + S_5)}{2} \quad (\text{Eq. I.31})$$

Volume de remblai total dans tous les profils :

$$V_{dt} = V_{1d} + V_{2d} + V_{3d} + \dots + V_{nd} \quad (\text{Eq. I.32})$$

I.8 Conclusion

Le trafic routier et son importance dans le dimensionnement des structures de chaussées routières et ainsi que la classification, la géométrie des routes et le choix des itinéraires ont été largement présentés ci-dessus. En conclusion, la planification et la conception de routes efficaces et sûres impliquent la prise en compte de nombreux facteurs. Le trafic routier est l'un des facteurs les plus importants, car il détermine la capacité de la route et l'aménagement de la voie. La géométrie de la route, telle que la largeur de la voie, le rayon de courbure et les pentes, est également essentielle pour garantir la sécurité et le confort des usagers de la route.

Le terrassement des routes est un autre aspect crucial de la construction routière, car il assure la stabilité de la chaussée et la résistance à l'érosion. La planification du terrassement implique l'analyse des conditions du sol, la conception de pentes et la construction de murs de soutènement et de remblais pour assurer la stabilité de la chaussée.

Les ingénieurs routiers utilisent des logiciels de modélisation sophistiqués pour concevoir des routes sûres, efficaces et durables. Ces modèles prennent en compte les caractéristiques du site, le trafic prévu, les contraintes environnementales et les exigences de sécurité pour produire des plans détaillés de la géométrie de la route et du terrassement.

En fin de compte, une conception et une planification bien pensée des routes sont essentielles pour assurer la sécurité et la fluidité du trafic, tout en minimisant les coûts de construction et d'entretien. Les routes doivent être conçues pour résister à des conditions de trafic et de sol variées, tout en répondant aux besoins des communautés locales en matière de mobilité.

Dans le « *chapitre II* » suivant, nous allons présenter les différents matériaux constituant les structures de chaussées routières, les méthodes utilisées pour leur dimensionnement et ainsi les processus de leur dégradation.

CHAPITRE II : TYPES DE CHAUSSEES, MATERIAUX ET METHODES DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES ROUTIERES

II.1 Introduction

Les routes de bonne qualité sont un élément clé de succès pour le développement social et économique des pays. La maintenance de ces infrastructures pour lesquelles des investissements importants sont consentis est un défi à relever pour les pays, notamment pour ceux du tiers monde. Pour cela, la maîtrise de leur comportement (mode d'évolution et de dégradation) est un élément inévitable. La qualité de la construction des chaussées, passe d'abord par une bonne reconnaissance du sol support et un choix judicieux des matériaux à utiliser, lui permettant de résister aux agressions des agents extérieurs et aux surcharges d'exploitation. La chaussée doit permettre la circulation des véhicules dans les conditions de confort et de sécurité voulue. Si le corps de chaussée se repose sur un sous-sol présentant une portance insuffisante. On est donc amené à apporter sur le sol naturel une épaisseur quelque fois importante de matériaux choisis dont la qualité va croître au fur et à mesure qu'on se rapproche de la surface de la chaussée car les matériaux seront soumis à des pressions fortes. Le calcul et la justification des épaisseurs des différentes couches de la structure de chaussée retenue, sont fixés en fonction des paramètres fondamentaux ci-dessus :

L'environnement de la route ;

Le trafic ;

La nature du sol support ;

Les matériaux choisis ;

La durée de vie de la chaussée.

II.2 Structures de chaussées routières

II.2.1 Définition d'une chaussée

Au sens géométrique, il s'agit d'une surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules alors qu'au sens structurel, c'est l'ensemble des couches de matériaux superposées de façon à permettre la reprise des charges.

II.2.2 Principe de la constitution d'une chaussée

La chaussée est essentiellement un ouvrage de répartition des charges roulantes sur le terrain de fondation. Pour que le roulage s'effectue rapidement, sûrement et sans usure exagérée du matériel, il faut que la surface de roulement ne se déforme pas sous l'effet :

De la charge des véhicules ;

Des chocs ;

Des intempéries ;

Des efforts tangentiels dus à l'accélération, au freinage et au dérapage.

II.2.3 Différentes couches de chaussée

La chaussée routière est constituée de plusieurs couches de matériaux très spéciaux et de nature différente. Ces matériaux doivent être identifiés au niveau de laboratoire à l'aide des essais nommés « essais routiers » afin d'en décider de leur utilisation en construction routière (Figure II.1).

II.2.3.1 Couche de surface

La couche de surface est en contact direct avec le pneumatique de véhicule et la charge extérieure dont elle est composée de deux couches : (i) la couche de roulement qui est pour rôle d'encaisser les efforts de cisaillement provoqués par la circulation, d'imperméabiliser la surface de la chaussée et d'assurer la sécurité (adhérence) et le confort (peu de bruit) et (ii) la couche de liaison qui est pour rôle essentiel d'assurer une transition avec les couches inférieures plus rigides (LCPC, SETRA, 1998).

II.2.3.2 Couche de base

La couche de base (CB) est une couche intermédiaire qui permet le passage progressif entre la couche de roulement (CR) et la couche de fondation (CF). Son principal rôle est de reprendre les efforts verticaux et de répartir les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

II.2.3.3 Couche de fondation

Elle a le même rôle que celui de la couche de base. La couche de base et couche de fondation forment le « corps de chaussée ».

II.2.3.4 Couche de forme

La couche de forme (CF_r) est généralement prévue pour répondre à certains objectifs en fonction de la nature du sol support à savoir :

Cas d'un « sol rocheux » : La « CF_r » joue le rôle de nivellement afin d'aplanir la surface ;

Cas d'un « sol peu portant » (ex : sol argileux à teneur en eau élevée) : La « CF_r » assure une portance suffisante à court terme permettant aux engins de chantier de circuler librement.

Actuellement, on tient de plus en plus compte du rôle de portance à long terme apporté par la couche de forme dans le dimensionnement et l'optimisation des structures de chaussées. Eventuellement, une « couche drainante » ou « anti-contaminant » peut être intercalée entre la couche de forme et la couche de fondation qui s'appelle « sous-couche ».

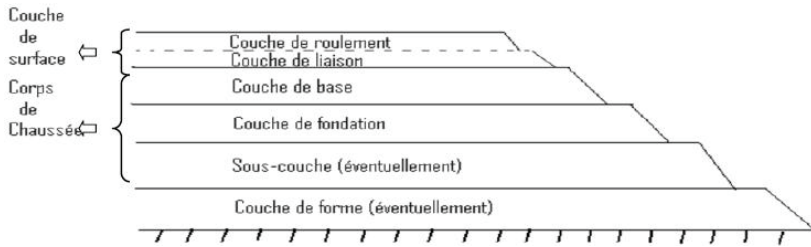


Figure II.1 – Coupe type montrant les différentes couches d'une chaussée routière (LCPC, SETRA, 1998).

II.2.3.5 Sol support de chaussée

Le sol support de chaussée est une assise de bonne qualité obtenue après terrassement et qui pour objet de supporter la structure de chaussée routière ainsi que les charges des véhicules. Dans le cas où le sol support présente une « faible capacité portante », son « remplacement » par un autre matériau de bonne qualité avec compactage ou son « amélioration » devient une solution envisageable. D'ailleurs, le sol support, dans les zones de dépression, reçoit une couche de remblai avant que la structure de chaussée soit mise en place, et cela afin de rattraper la ligne du projet ou appelé aussi la « ligne rouge » du projet. Par conséquent, l'analyse et la vérification de la stabilité du sol support « sol de fondation du remblai » au poinçonnement est indispensable. On distingue deux cas à savoir :

II.2.3.6 Stabilité du sol support au poinçonnement

II.2.3.6.1 Approche $C_{U(R)}-C_{U(SS)}$

Cette approche consiste à comparer la résistance au cisaillement non drainée du remblai « $C_{U(R)}$ » avec celle du sol support « $C_{U(SS)}$ ».

La valeur minimale de la résistance au cisaillement du sol support pour porter la charge du remblai durant et après la construction et ainsi que le poids des engins lors du terrassement peut être calculée à partir de la formule de portance classique suivante :

$$P_{\max} = 5.14 * C_U * J_C \quad \text{kPa} \quad (\text{Eq. II.1})$$

Où :

C_U : est la cohésion non drainée du remblai ;

J_C : est un facteur correcteur pour tenir compte de la pente du terrain (« $J_C = 1$ » pour un terrain plat ou sans pente ; « $J_C = 0.85$ » pour un terrain vallonné ou avec pente) ;

P_{\max} : est la valeur maximale de la charge que peut supporter le sol. Il est aussi déterminé par la formule suivante :

$$P_{\max} = H_R * \gamma_R * F_S \quad \text{kPa} \quad (\text{Eq. II.2})$$

H_R : est la hauteur du remblai ;

γ_R : est le poids volumique du remblai ;

F_S : est le coefficient de sécurité pris égale à « 1.5 ».

Pour que la stabilité au poinçonnement du sol support soit assurée, il faut que ce dernier « *sol support* » doive avoir une cohésion non drainée « C_U » supérieure ou égale à celle du remblai calculée par l'équation « *Eq. II.3* » ci-dessous :

$$C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_S}{5.14 * J_C} \quad \text{kPa} \quad (\text{Eq. II.3})$$

C'est-à-dire, si la condition « $C_{U(SS)} \geq C_{U(R)}$ » est vérifiée, on peut déclarer que la stabilité du sol support au poinçonnement est assurée.

II.2.3.6.2 Approche $C_{U(R)} - \sigma'_{P(SS)}$

Cette approche consiste à comparer la résistance au cisaillement non drainée du remblai « $C_{U(R)}$ » (déterminée par l'équation « *Eq. II.3* » ci-dessus) avec la résistance au cisaillement non drainée du sol support « $C_{U(SS)}$ » (estimée par l'équation « *Eq. II.4* » ci-dessous).

$$C_{U(\text{sol support})} = 0.3 * \sigma'_{P(SS)} \quad \text{kPa} \quad (\text{Eq. II.4})$$

Où :

$\sigma'_{P(SS)}$: est la pression de préconsolidation du sol support.

C'est-à-dire, si la condition « $C_{U(SS)} \geq C_{U(R)}$ » est vérifiée, c'est là qu'on peut déclarer que la stabilité du sol support au poinçonnement est assurée.

II.2.4 Types de chaussées routières

Du point de vue constructif les chaussées peuvent être groupées en 03 grandes catégories ([Figure II.3](#)):

- Chaussées souples ;
- Chaussées semi-rigides ;
- Chaussées rigides.

II.2.4.1 Chaussées souples

Elles constituent l'immense majorité des routes actuelles. Elles sont composées d'une fondation constituée d'un matériau non traité mais stabilisé mécaniquement par « *compactage* », d'une couche de base de matériau traité au liant hydrocarbonés et une couverture bitumineuse mince « couche de roulement » d'épaisseur de moins de 15 cm. En effet, les chaussées souples constituées par des couches superposées des matériaux non susceptibles de résistance notable à la -traction. Les couches supérieures sont généralement plus résistantes et moins déformable que les couches inférieures. Pour une assurance parfaite et un confort idéal, la chaussée exige généralement pour sa construction, plusieurs couches exécutées en matériaux différents, d'une épaisseur bien déterminée, ayant chacune un rôle aussi bien défini. En principe une chaussée souple peut avoir en ordre les 03 couches suivantes ([Figure II.3](#)) :

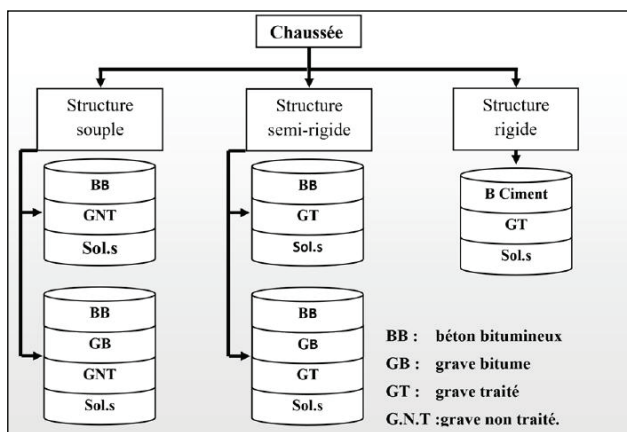


Figure II.2 – Schéma des structures principales de chaussées routières (LCPC, SETRA, 1998).

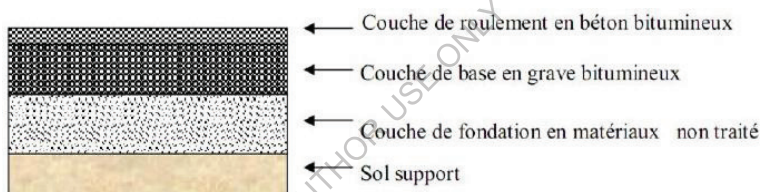


Figure II.3 – Modèle d'une chaussée souple (LCPC, SETRA, 1998).

II.2.4.2 Chaussées semi-rigides

Elle comporte une couche de surface bitumineuse repose sur une assise en matériaux traités aux liants hydraulique disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). En principe une chaussée semi-rigide peut avoir en ordre les 02 couches suivantes (Figure II.4) :

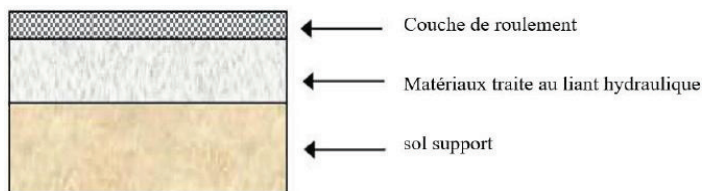


Figure II.4 – Modèle d'une chaussée semi-rigide (LCPC, SETRA, 1998).

II.2.4.3 Chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes (Figure II.5) :

Couche de forme ;
 Couche de fondation ;
 Couche de roulement en béton de ciment.

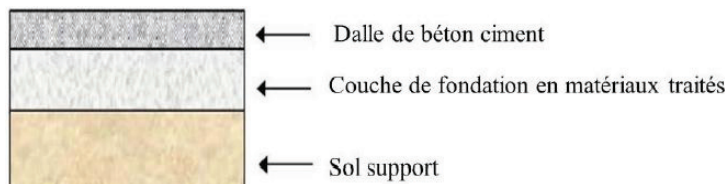


Figure II.5 – Modèle d'une chaussée rigide (LCPC, SETRA, 1998).

II.3 Matériaux constituant les chaussées routières

II.3.1 Béton bitumineux « BB »

Les bétons bitumineux sont des matériaux enrobés à chaud dont le squelette minéral est, en général, une grave concassée 0/10 ou 0/14 et, le liant, du bitume pur 40/50. Ce type de matériau est bien adapté aux couches de surface des chaussées à forts trafics en raison de ses bonnes caractéristiques mécaniques. Il est aussi bien utilisé pour les chaussées neuves qu'en renforcement. (LCPC, SETRA, 1998). Ce type de matériau est composée de :

Granulats : la granularité du squelette minéral est de classe 0/10 ou 0/14 pour des épaisseurs moyennes de couche de roulement de respectivement, 6 et 8 cm.

Teneur en fines : la fraction sableuse (passant à 0.080 mm) doit être comprise entre 6 et 10 %, Lorsque cette valeur est insuffisante pour une bonne composition du matériau, il nécessaire d'adjoindre à la grave 0 D des fines d'apport. Celles-ci doivent avoir plus de 80 % d'éléments passant au tamis 0.080 mm et 100%de passant à celui de 0.2 mm.

Bitume : le bitume utilisé est, normalement, de classe 40/50. Dans certains cas (trafic modéré, route en altitude, etc.), il est possible d'utiliser un bitume moins dur tel que le 60/70 ou 80 100 si le risque d'orniérage n'est pas trop à craindre. Les étapes de mise en oeuvre de ce béton sont les suivantes :

- Epandage : « finisseur » ;
- Compactage : « atelier vibrant en tête » ;
- Epaisseurs technologiques de mise en oeuvre : les seuils technologiques après compactage, en une seule couche sont, Epaisseur minimale = 6 cm, Epaisseur maximale = 8 cm.

Après mise en oeuvre ce béton subit une Contrôle qui portera sur toutes les étapes de la fabrication en centrale des bétons bitumineux : Stockage des matériaux, dosage des matériaux (granulat, bitume), température de malaxage des enrobés. Un contrôle de mise en oeuvre ; le contrôle portera sur :

La température d'épandage ;
 La composition de l'enrobé (pourcentage de liant et granulométrie) ;
 Le contrôle de compactage (exécution des carottages et détermination de la compacité des carottes d'enrobés bitumineux).

II.3.2 Enduit superficiel routier « ES »

L'enduit superficiel est une technique de revêtement d'entretien qui associe à la surface de la chaussée des granulats et un liant hydrocarboné. C'est une technique sans apport structurel et se caractérise par une épaisseur faible elle est destinée principalement à imperméabiliser la chaussée et à améliorer les caractéristiques de surface en liaison avec le confort et la sécurité de l'utilisateur. Cette technique d'enduits superficiels demeure la plus utilisée pour l'entretien des chaussées à moyen ou à faible trafic sur les routes nationales, en revanche les enduits superficiels ont pratiquement disparu du secteur autoroutier (CTTP, 2000).

II.3.3 Grave bitumineux « GB »

Les graves bitument 0/20 sont des enrobés bitumineux à chaud (mélange à chaud de granulats séchés et de bitume pur) (CTTP, 2000). La technique des graves bitumes est destinée à la réalisation des assises de chaussée de couche de base et couche de fondation (Réseau RP1 de classes du trafic TPL3 à TPL7). Ce matériau est composé de :

Granulats : les classes granulaires utilisées pour la fabrication des graves bitumes 0/20 sont les suivantes coupures granulométriques : 0/3, 3/8, 8/14, 14/20, (Indice de concassage $I_c = 100\%$) ;

Bitume : classe du bitume = 40/50 (pour le RP1).

Les étapes de mise en oeuvre sont : la même chose que celui des bétons bitumineux.

II.3.4 Grave laitier (GL)

Un grave laitier est un mélange effectué en centrale de malaxage continu : d'une grave reconstituée 0/D, d'un laitier granulé réactif et d'un activant basique. Ce mélange est réalisé à une teneur en eau proche de celle de l'OPM. (CTTP, 2000). Ce type de matériau est utilisée dans :

Les couches d'assises de chaussées (base, fondation) ;

Les chaussées neuves de type RP1 : réseau principal de niveau 1 (trafic : TPL3 à TPL7).

Ce type de matériau est constitué de la grave 0/D reconstituée à partir de plusieurs fractions granulométriques, favorisera l'obtention d'une granularité optimale et permettra de limiter les effets de la ségrégation lors du stockage. On aura donc intérêt à adopter 4 fractions pour une grave 0/20. La fabrication sera réalisée en centrale de malaxage automatique de type continu, elle devra être équipée des éléments suivants :

Trémies doseuses pour les gravillons et le sable ;

Trémie doseuse pour le laitier granulé ;

Silos à pulvérulents (au moins deux pour la chaux éteinte) ;

Malaxeur de type horizontal à double arbre à palettes ;

Dispositif doseur de l'eau d'ajout ;

Trémie tampon.

L'épandage de la GL sera fait à l'aide des engins suivants :

La niveleuse : pour les chantiers de petite à moyenne importance ;

Le finisseur : pour les chantiers de plus grande importance

L'épandeur à coffrages glissants : pour les chantiers de grand volume à fort débit. Le compactage fera appel aux engins suivants :

- Compacteurs vibrants ;
- Compacteurs pneumatiques lourds.

L'atelier de compactage et le nombre de passes de chaque engin sera déterminé à l'issue de la planche d'essai. Après examen visuel des différents éléments de la centrale, et des essais et mesures permettant de terminer l'état des organes de dosage de la centrale.

II.3.5 Béton de ciment goudonné (BCg)

Les chaussées modernes en béton peuvent se présenter sous différentes conceptions ; on peut citer les dalles courtes (3 à 5 m) non armées, à joints goudonnés ou non, les dalles moyennes (5 à 7 m) goudonnées ou non, les dalles épaisses (30 à 40 cm) courtes et non armées, etc. Dans le cadre du catalogue de dimensionnement des chaussées, il s'agit de dalles en béton de ciment (granulats et ciment) courtes ou moyennes non armées et goudonnées (NF P 15-301).

a)- Utilisation

- La couche de roulement et couche de base ;
- Réseau principal de niveau 1 (RP I) : Classes de trafic TPL3 à TPL7.

b)- Constituant

- Fractions granulométriques (0/5, 5/15 et 15/25) ;
- Liant (Ciment) : Ciment Portland Artificiel (CPA) ; Ciment Portland Artificiel avec ajouts (CPJ) ; Ciment résistant aux sulfates (CRS) ;
- Eau de gâchage : L'eau de gâchage devra être exempte de toute matière organique et doit être conforme à la norme NF 18-301 ;
- Les fers de liaison : doivent être conformes à la norme NF A 35-016 ;
- Les goudons doivent être conformes à la norme NF A 35-015.

La fabrication du béton (mélange, humidification et malaxage) se fera en centrale. La mise en oeuvre se fera à l'aide d'un finisseur avec un coffrage fixe ou glissant. Les seuils technologiques après compactage, en une seule couche sont :

- Épaisseur minimale : 15 cm ;
- Épaisseur maximale : 35 cm.

Le contrôle se fait pour :

- S'assurer de la bonne mise en place des berceaux et le positionnement des goudons ;
- Procéder au nettoyage des coffrages ;
- Éviter tout arrêt du bétonnage ;
- Procéder rapidement à la protection du béton avec un produit de cure (la durée de protection doit être conforme à la norme ASTM C309) ;
- Veiller au respect du délai de sciage des joints. Il doit être déterminé à partir des planches d'essais, en fonction des conditions météorologiques ;
- Procéder au nettoyage des joints avant le scellement de ces derniers.

II.3.6 Grave non traitée « GNT »

Les GNT sont définies comme étant des graves 0/D, ne comportant pas de liant. On distingue deux types de GT suivant leur mode d'élaboration :

Les GNT de type A sont obtenus en une seule fraction ;

Les GNT de type B sont des matériaux provenant du mélange d'au moins deux fractions granulométriques malaxées et humidifiées en centrale.

Les GNT sont Utilisées dans les couches d'assises de chaussées (couche de base et couche de fondation) pour le réseau RP2, et les couche de fondation pour le réseau RP1 (CTTP, 1992). Elles sont constituées de granulats de classe 0/20 et 0/31.5, Indice de concassage $I_c = 100\%$. Les GNT sont produites à partir de roches massives concassées et criblées en carrières. Les étapes de mise en oeuvre sont comme de suit (Fascicule 3) :

Epandage : Utiliser des engins produisant peu de ségrégation (épandeur, finisseur, niveleuse).

Humidification : L'arrosage lorsqu'il est nécessaire, peut être exécuté sur un matériau ayant déjà subi un premier compactage. Ce dernier doit intervenir avant la fin du compactage. La teneur en eau de mise en oeuvre doit être comprise dans l'intervalle $[\omega_{opt}-1 \text{ à } \omega_{opt}+0.5]$

Compactage : Le compactage doit être réalisé de façon énergique, pour cela, utilisé : Les compacteurs vibrants ayant une masse par centimètre de génératrice vibrante (M1/L 30Kg/cm).

Epaisseurs technologiques de mise en oeuvre : Les seuils technologiques après compactage, en une seule couche sont : Epaisseur minimale = 15 cm et Epaisseur maximale = 25 cm.

II.3.7 Tufs Calcaires (TUF)

Les tufs calcaires ou « encroûtement calcaires » sont des matériaux composés essentiellement, mais pas exclusivement de carbonate de calcium. Les tufs calcaires existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; ils sont dus à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantité plus ou moins grande de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration. Ils sont très répandus dans les zones climatiques II et III. On les rencontre dans les bassins relativement plats irrigués par les eaux de ruissellement provenant des massifs calcaires limitrophes (Alloul, 1981). On distingue généralement dans un tuf calcaire mûr trois horizons du haut en bas :

Horizon « A » : Il constitue la terre végétale dont l'épaisseur est de 20 à 30 cm.

Horizon « B » : C'est l'horizon de l'encroûtement proprement dit ; son épaisseur peut varier de 1 à 2m.

Horizon « C » : C'est le matériau d'origine dans lequel on rencontre cependant quelques nodules. Ces Tufts sont utilisés ont couches d'assises (base, fondation), pour le réseau principal de niveau 2 (RP2), et TUF1 en couche de fondation, pour le réseau principal de niveau 1 (RP1). Les matériaux utilisés ne nécessitent pas de matériel de fabrication, sauf pour les tufts élaborés ou il est prévu le concassage et criblage en 0/31.5 ou 0/20. Les étapes de mise en oeuvre :

Epandage : les matériaux seront distribués en cordons sur le sol-support de chaussée et répandus le plus souvent à la niveleuse. Les éléments les plus gros, seront triés et évacués par la niveleuse sur le bord de la chaussée.

Humidification : généralement les tufts présentent une teneur en eau à l'Optimum Proctor Modifié toujours supérieure à 12 %. Cependant l'obtention de cette teneur en eau est très

difficile dans les régions arides. Pour la mise en oeuvre, on se contentera d'une teneur en eau inférieure de 2 % à 3 % à l'OPM. L'humidification des matériaux est obtenue en place par arrosages successifs à l'aide de camions citernes de la couche répandue.

Compactage : l'utilisation d'un compacteur vibrant est souhaitable, car il permet de briser les gros éléments. Si le pourcentage des éléments supérieurs à 50 mm est important, on utilisera un premier compactage au rouleau à grille ou au rouleau à pieds clameurs. Il est nécessaire de terminer le compactage avec un compacteur à pneus.

Imprégnation : les couches de base en tufs doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse dont l'utilité est d'assurer l'accrochage de la couche de roulement, de protéger la couche de tufs des précipitations et de servir éventuellement de couche de roulement provisoire.

II.3.8 Contrôle

Le contrôle portera sur la vérification des spécifications concernant la classification des tufs (granulométrie, limites d'Atterberg, taux de carbonates) ([Fascicule 3](#)).

II.3.8.1 Contrôle de fabrication

Avant fabrication : contrôler le matériel de la chaîne de fabrication et l'installation et les réglages initiaux de la centrale pour la GNT ;

En cours de fabrication : Contrôler l'alimentation des concasseurs, la charge des cribles, la qualité de la production, et le chargement et stockage des matériaux.

II.3.8.2 Contrôle de mise en oeuvre

Il s'agit de vérifier que :

- Les modalités définies lors des planches d'essai sont bien appliquées ;
- La qualité du compactage est bonne.

II.4 Méthodes de dimensionnement des structures de chaussées routières

Le dimensionnement des chaussées, bien que fondamentalement identique à celui des autres structures de génie civil, présente des particularités liées au mode d'application des charges et au développement des différents modes de rupture. Ainsi, dimensionner une structure de chaussée revient à déterminer l'épaisseur des couches en tenant compte des conditions de trafic, de la nature du sol d'infrastructure, de la qualité des matériaux utilisés en corps de chaussée, des conditions environnementales, et de sa durée de vie. Plusieurs approches ont vu le jour ces dernières années.

II.4.1 Approches empiriques

Elles sont basées sur l'observation, ces approches renferment les méthodes CBR, CEBTP et TRRL. Ces méthodes donnent les épaisseurs des couches en fonction du sol de plateforme et du type de trafic.

II.4.1.1 Méthode CBR

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90% à 100%) de l'optimum Proctor modifié sur une épaisseur d'au moins de 15cm. La détermination de l'épaisseur totale du corps de chaussée à mettre en oeuvre s'obtient par l'application de la formule présentée ci-après.

$$e = \frac{100 + (\sqrt{P}) \left(75 + 50 \log \frac{N}{10} \right)}{I_{CBR} + 5} \quad \text{cm} \quad (\text{Eq. II.5})$$

Où :

e : est l'épaisseur équivalente de la chaussée (cm) ;

I_{CBR} : Indice CBR du sol support ;

p : est la charge par « roue » apportée par les véhicules (tonne) ;

P: est la charge par roue « $P = 6.5 \text{ t}$ » (essieu 13 t) ;

Log: logarithme décimal ;

N : il désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg et qui peut être déterminé par la formule (Eq. II.6) ci-dessous :

$$N = T_H * \%PL \quad (\text{Eq. II.6})$$

Où :

T_H : trafics prévus pour une durée de vie de 20 ans qui peut être calculé par la formule (Eq. II.7) ci-dessous :

$$T_H = \frac{T_0 * (1 + \tau)^n}{2} \quad \text{V/j} \quad (\text{Eq. II.7})$$

Où :

T_0 : trafics actuel (v/j).

n : année de prévision.

L'épaisseur équivalente (Tableau II.1) est donnée par la relation (Eq. II.8) suivante :

$$e = c_1 * e_1 + c_2 * e_2 + c_3 * e_3 \quad \text{cm} \quad (\text{Eq. II.8})$$

Où :

$c_1 \times e_1$: couche de roulement ;

$c_2 \times e_2$: couche de base ;

$c_3 \times e_3$: couche de fondation ;

c_1, c_2, c_3 : coefficients d'équivalence ;

e_1, e_2, e_3 : épaisseurs réelles des couches.

Tableau II.1 – Coefficients d'équivalence pour chaque matériau (Costet and Sanglerat, 1983).

Matériaux utilisés	Coefficient d'équivalence	Remarque
Béton bitumineux ou enrobé	2.00	Pour le calcul des épaisseurs réelles de la chaussée, on fixe « e1 », « e2 » et on calcule « e3 ». Généralement, les épaisseurs adoptées sont : BB = 6 à 8 cm (Couche de surface) GB = 8 à 15 cm (Couche de base) GC = 15 à 25 cm (Couche de fondation) TVO = 20 cm et plus
Grave ciment grave laitier	1.50	
Grave bitume	1.0 à 1.70	
Grave concassée ou gravier	1.00	
Grave roulée, grave sableuse	0.75	
Sable ciment	1.00 à 1.20	
Sable	0.50	
Tuf	0.80 à 0.90	

II.4.1.2 Method TRRL

L'abréviation « TRRL » signifie « Transportation Road Research Laboratory ». Cette méthode utilise la formule de Peltier (1953) dans sa forme simplifiée « Eq. II.5). Pour déterminer l'épaisseur de la chaussée (P étant la charge par roue). Cette méthode est utilisée au Sénégal et son emploi conduit aux mêmes conclusions que la méthode CBR.

II.4.1.3 Méthode CEBTP

Cette méthode tient compte de deux critères : (i) L'intensité du trafic (Tableau II.2) et la portance (Tableau II.3) de la plateforme et donne l'épaisseur de la couche de fondation, de la couche de base et du revêtement et (ii) L'intensité du trafic et la nature des matériaux des différentes couches afin de vérifier les spécifications pour leurs possibilités d'utilisation. Elle décrit cinq classes de trafic exprimées en nombres cumulés de passages d'un essieu équivalent de 13 tonnes, et enfin cinq classes de portance de la plateforme. C'est ainsi qu'elle donne des épaisseurs en centimètres de corps de chaussée en graveleux latéritique amélioré ou non.

Tableau II.2 – Classes de trafic définies par le CEBTP en Afrique Francophone (CEBTP, 1982).

Nombre équivalent de PL	Classe de trafic	Nombre équivalent de V/j
< 5.10	T ₁	< 300
de 5.10 ⁵ à 1.5 10 ⁶	T ₂	de 300 à 1000
de 1.5 10 ⁶ à 4.10 ⁶	T ₃	de 1000 à 3000
de 4.10 ⁶ à 10 ⁷	T ₄	de 3000 à 6000
de 10 ⁷ à 2.10 ⁷	T ₅	de 6000 à 12000

Tableau II.3 – Classes de portance de la plateforme (CEBTP, 1982).

Classes	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
CBR (%)	<5	05 - 10	10 – 15	15 - 30	> 30

II.4.1.4 Méthode CTTP

Elle est connue sous le nom « Méthode du Catalogue des Chaussées Neuves ». Les paramètres utilisés par cette méthode sont : le trafic, le sol support, l'environnement et la zone climatique (LCPC ; SETRA, 1985).

II.4.1.4.1 Le trafic

a)- Détermination du niveau de réseau principal « RP₁ »

C'est le trafic poids lourds (véhicules de charge supérieure à 3.5 tonnes). Le réseau principal noté « RP » : il se compose de route reliant :

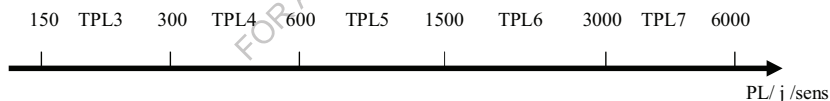
- Les chefs-lieux de wilaya ;
- Les ports, les aéroports et les postes frontaliers ;
- Les principales agglomérations et important zone industrielles.

Ce réseau principal se décompose en deux niveaux : le RP1 ($T > 1500V/J$) qui concerne les routes nationales « RN », les autoroutes et les chemins de wilaya « CW » et le RP2 ($T < 1500V/J$) qui concerne les routes ordinaires « R » et les chemins de wilaya « CW ». Cependant, le réseau secondaire « RS » se compose du reste des routes qui ne sont pas en « RP ».

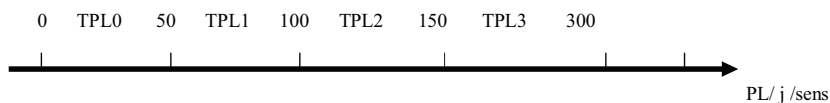
b)- Détermination de la classe de trafic « TPL_i »

Les classes sont données pour chaque niveau de réseau principal « RP1 » et « RP2 », en nombre de PL/J/sens à l'année de mise en service.

RP1 :



RP2 :



II.4.1.4.2 Détermination des classes de portance de sols

Les différentes expériences ont fait ressortir la relation :

$$EV_2 = 5 \times I_{CBR} \quad \text{MPa} \quad (\text{Eq. II.9})$$

Où :

EV_2 : est le module de sol déterminé à l'aide de l'essai à la plaque ;

I_{CBR} : Indice CBR.

Le [tableau II.4](#) regroupe les classes des sols par ordre croissant de S_3 à S_0 .

Tableau II.4 – Tableau exprimé les classe de sol en fonction de la déflexion (Costet and Sanglerat, 1983).

Classe	S3	S2	S1	S0
E (MPa)	25-50	50-125	125-200	>200

II.4.1.4.3 Détermination des classes de portance de sols support

Pour les sols sensibles à l'eau, la portance du sol support est déterminée par l'essai CBR imbibé à 4 jours pour les zones climatiques I et II alors que l'essai CBR immédiat se fait pour les zones climatiques III et IV. Cependant, pour les sols insensibles à l'eau, les sols grossiers contenant plus de 25 % d'éléments >20mm, la portance sera déterminée à partir des essais de chargement à la plaque ou des mesures de déflexions. Il existe différents types de couches de forme suivant le cas de portance du sol tassé (S_i) et la classe du sol support visée (S_j) (Tableau II.5).

Tableau II.5 – Epaisseur de couche de fondation en fonction de la portance du sol (Costet and Sanglerat, 1983).

Classe de portance du sol tassé (S_i)	Matériaux de C.F	Epaisseur de C.F	Classe portance du sol support visée (S_j)
S4	Matériau NT	50cm (en deux couches)	S3
S4	Matériau NT	35cm	S3
S4	Matériau NT	60cm (en deux couches)	S2
S3	Matériau NT	40cm (en deux couches)	S2
S3	Matériau NT	70cm (en deux couches)	S2

II.4.1.4.4 Zones climatiques

Les zones climatiques en Algérie sont mentionnées dans le tableau II.6 ci-dessus :

Tableau II.6 – Les zones climatiques de l'Algérie (NTAR -B40, 1977).

Zone climatique	Pluviométrie (mm/an)	Climat	Teq (°C)	Région
I	> 600	Très humide	20	Nord
II	350 à 600	Humide	20	Nord, hauts plateaux
III	100 à 350	Semi-aride	25	Hauts plateaux
IV	< 100	Aride	30	Sud

II.4.1.5 Inconvénients des méthodes empiriques

Comme ce sont des méthodes expérimentales, elles ont les inconvénients suivants :

Le coût est très élevé pour avoir un nombre important de sections expérimentales afin de déterminer les épaisseurs des différentes couches et les propriétés mécaniques des matériaux ;

Le temps de réponse est très long ;

Cette analyse donne des résultats qui ne peuvent pas être généralisés car ne s'applique qu'aux matériaux étudiés, qu'aux conditions d'environnement de l'expérimentation et qu'aux sols supports rencontrés.

II.4.2 Approches semi empiriques et celles dites « rationnelles »

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

Calcul des contraintes et des déformations admissibles dans la chaussée en fonction du trafic attendu (modèle de fatigue et de déformation permanente).

Calcul des épaisseurs requises pour rencontrer les critères de contraintes et/ou des déformations admissibles.

Les codes de calculs et de vérification les plus utilisés sont diffusés par le LPCP. Comme une première approximation, les matériaux utilisés dans le dimensionnement des chaussées sont souvent traités comme ayant un comportement linéaire élastique tenant compte essentiellement des modules de déformabilité « E_t » (sécant) et « E_o » (à l'origine). Les contraintes dans les matériaux linéairement élastiques sont proportionnelles aux déformations, avec une proportionnalité constante égale au module d'Young « E ».

II.4.2.1 Méthode du catalogue des structures « SETRA »

Ce catalogue des structures type neuves est établi par « SETRA » qui distingue les structures de chaussées suivant les matériaux employés (GNT, SL, GC, SB). Il considère également quatre classes de trafic selon leur importance, allant de 200 à 1500 PL/J/sens. Cette méthode tient compte des caractéristiques géotechniques du sol de fondation. Le catalogue se présente sous la forme d'un jeu de fiches classées en deux paramètres de données :

Trafic cumulé de poids lourds à la 15^{ème} année T_j .

Les caractéristiques de sol (S_j).

II.4.2.2 Détermination de la classe de trafic

La classe de trafic (TPL_i) est déterminée à partir du trafic poids lourd par sens circulant sur la voie la plus chargée à l'année de mise en service (Tableau II.7).

Tableau II.7 – La classe du trafic poids lourd (LCPC, SETRA, 1977).

Classe de trafic	Trafic poids lourds cumulé sur 20 ans
T_0	$< 3.5 \cdot 10^5$
T_1	$3.5 \cdot 10^5 < T < 7.3 \cdot 10^5$
T_2	$7.3 \cdot 10^5 < T < 2 \cdot 10^6$
T_3	$2 \cdot 10^6 < T < 7.3 \cdot 10^6$
T_4	$7.3 \cdot 10^6 < T < 4 \cdot 10^7$
T_5	$T > 4 \cdot 10^7$

Le trafic cumulé est donné par la formule suivante :

$$T_c = TPL \left[1 + \frac{(1 + \tau)^{n+1} - 1}{\tau} \right] 365 \quad \text{PL/j/sens} \quad (\text{Eq. II.10})$$

Où :

τ : est le taux d'accroissement ;

T_C : est le trafic cumulé ;

TPL : est le trafic poids lourds à l'année de mise en service ;

n : durée de vie.

II.4.2.3 Détermination de la classe du sol

Le classement des sols se fait en fonction de l'indice CBR mesuré sur éprouvette compactée à la teneur en eau optimale de Proctor modifié et à la densité maximale correspondante. Après immersion de quatre jours, le classement sera fait en respectant les seuils suivants :

Tableau II.8 – Classement de sol en fonction de l'indice de CBR (LCPC, SETRA, 1977).

Classe de sol (S_i)	Indice C.B.R
S0	> 40
S1	25 à 40
S2	10 à 25
S3	05 à 10
S4	< 05

II.4.2.2 Méthode L.C.P.C

Cette méthode « Laboratoire Central des Ponts et Chaussées » est dérivée des essais A.A.S.H.O, elle est basée sur la détermination du trafic équivalent donnée par l'expression (Eq. II.11) :

$$T_{eq} = \frac{[TJMA \times a \times ((Z + 1)^n - 1) \times 0.75 \times P \times 365]}{[(1 + Z) - 1]} \quad \text{PL/j/sens} \quad (\text{Eq. II.11})$$

Où :

T_{eq} : est le trafic équivalent par essieu de 13t ;

TJMA : est le trafic à la mise en service de la route ;

a : est le coefficient qui dépend du nombre de voies ;

z : est le taux d'accroissement annuel ;

n : est la durée de vie de la route ;

p : est le 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.

II.4.3 Approches mécanistiques

Elles sont basées sur le même principe que celles semi empiriques. Ici on étudie le sol dans son comportement réel en utilisant le module réversible. Nous passons donc du module d'Young « E » au module réversible « M_R » illustré par la Figure II.6. Ces méthodes permettent de représenter très fidèlement l'état de contraintes et les conditions de sollicitations des matériaux routiers. Nous utilisons de même un nouveau code de calcul Mich-Pave® pour l'analyse mécanistique des matériaux. Ce concept a une signification assez importante, il signifie que la trajectoire des vecteurs contraintes est bien prise en charge lors du chargement du matériau. Dans ce cas, vu la rotation des contraintes principales lorsque la chaussée est chargée par l'essieu le comportement du matériau demeure dans le domaine élastique mais suit une progression non linéaire ne serait-ce que pour le module de déformabilité.

Il est à noter que les méthodes rationnelles « semblent » apporter plus de précision que les méthodes empiriques en ce sens qu'elles prennent en compte les quelques caractéristiques intrinsèques des matériaux du corps de chaussée (module d'Young et coefficient de Poisson). Cependant elles sont étudiées sur une petite portion linéaire de la relation contrainte déformation, cause pour laquelle elles restent moins précises que celles mécanistiques.

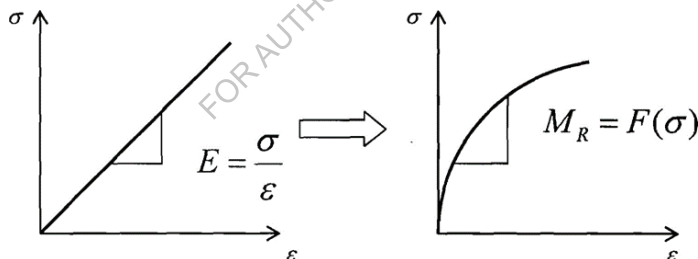


Figure II.6 – Approche mécanistique par le passage du module d'Young « E » au module réversible « M_R ».

II.5 Conclusion

Les matériaux constituant les chaussées et ainsi les différentes méthodes utilisées pour leur dimensionnement ont été largement présentés et discutés ci-dessus. En conclusion, il existe différents types de chaussées routières, chacun adapté à des conditions spécifiques telles que le volume de trafic, le type de véhicule, les conditions climatiques et géologiques. Les matériaux utilisés pour la construction des chaussées sont également variés, allant du béton au bitume en passant par les pavés. Le choix du matériau dépendra des caractéristiques spécifiques de chaque projet.

En ce qui concerne la conception et le dimensionnement des chaussées, il existe des méthodes standardisées qui prennent en compte des facteurs tels que la capacité de charge, la résistance à la

fatigue, la durée de vie prévue et les coûts de construction et d'entretien. Les ingénieurs utilisent des modèles mathématiques sophistiqués pour évaluer les contraintes et les forces qui affectent la chaussée afin d'assurer sa sécurité, sa durabilité et son efficacité.

En fin de compte, une bonne conception et un dimensionnement approprié des chaussées routières sont essentiels pour assurer la sécurité des usagers de la route et la durabilité des infrastructures routières.

Dans le « *chapitre III* » suivant, nous allons nous intéresser du comportement des chaussées routières et plus précisément leurs processus et causes de dégradation.

FOR AUTHOR USE ONLY

CHAPITRE III : COMPORTEMENT, PROCESSUS ET CAUSES DE DEGRADATION DES CHAUSSEES ROUTIERES

III.1 Introduction

La dégradation et l'usure des revêtements routiers sont le résultat de plusieurs phénomènes qui surviennent pendant la durée de vie de la chaussée. Les causes sont nombreuses et les modes de dégradation varient selon ces causes. Les sollicitations mécaniques et thermiques sont les principaux responsables de la dégradation des revêtements routiers et elles doivent être prises en considération lors de la phase de conception de la chaussée et lors du choix de ces constituants. La phase de la construction a également un impact majeur sur la durabilité de la chaussée.

Le bon compactage des couches granulaires ou des couches liées, le collage des couches d'enrobé et la bonne exécution des joints sont des conditions importantes pour avoir une route durable offrant confort et sécurité aux usagers. Il faut donc prêter une attention particulière à tous ces phénomènes pendant les phases de conception et de construction de la chaussée. La compréhension de ces modes de dégradation et d'usure est aussi importante pendant la durée de vie de la chaussée afin d'assurer un bon entretien de la chaussée et de prolonger sa durée de vie. Le choix des techniques d'entretien doit passer impérativement par une bonne analyse des causes de la dégradation constatée. Ce sujet pourrait faire l'objet d'un autre article à l'avenir.

III.2 Comportement des structures de chaussées routières

Nous avons eu, à travers les paragraphes précédents, un aperçu sur le processus de dégradation des chaussées. Cela nous a permis de voir comment les sollicitations influaient sur la destruction des chaussées et suivant le type de structure qu'on a, comment celles-ci se comportent. Il en reste maintenant de décrire suivant chaque famille de chaussée (revêtues/non revêtues) les différentes dégradations les plus fréquemment rencontrées ainsi que les dégradations sur les chaussées revêtues. Pour cela, nous nous intéresserons aux chaussées à revêtement bitumineux qui regroupent les chaussées souples et les chaussées semi-rigides, puis nous finirons par les chaussées en dalle de béton. Mais avant tout, nous allons définir une légende d'appellation pour décrire la nature et le degré de sévérité liée à la dégradation dans une chaussée.

III.2.1 Identification de dégradations et mode de rupture dans les chaussées

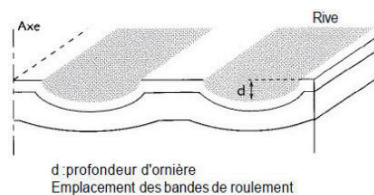
III.2.1.1 Identification des dégradations en surface des chaussées souples

Les dégradations de surfaces observées sur les structures de chaussées routières souples (couche de forme non traitée aux liants hydrauliques) peuvent être classées en quatre grandes catégories à savoir : les « *déformations* », les « *fissurations* », les « *arrachements* » et les « *mouvements de matériaux* ». (LCPC, IFSTTAR 1998).

III.2.1.1.1 Les déformations

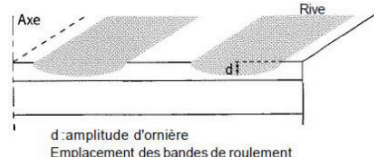
a) Ornière à grand rayon

Figure III.1 – Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est inférieure à 80 cm. Elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulement.



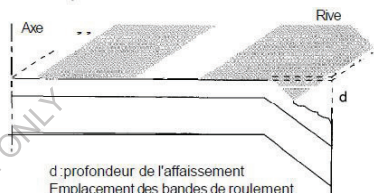
b) Ornière à petit rayon

Figure III.2 – Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80 cm. Elle peut concerner l'une ou les deux bandes de roulement.



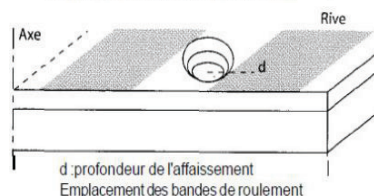
c) Affaissement de rive

Figure III.3 – Enfoncement prononcé localisé à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive.



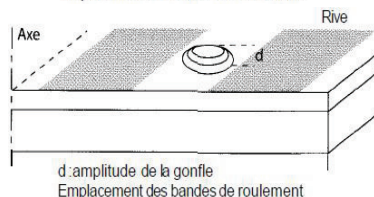
d) Affaissement hors rive

Figure III.4 – Enfoncement ponctuel, prononcé localisé à gauche ou dans la bande de roulement de rive. L'affaissement hors rive prend le nom de « flache » lorsqu'il a une forme circulaire.



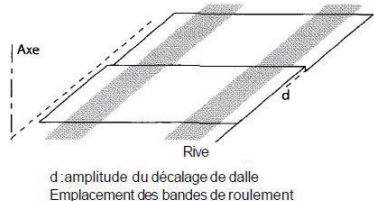
e) Gonflement

Figure III.5 – Soulèvement ponctuel, le plus souvent circulaire, de la chaussée.



f) Décalage de joint

Figure III.6 – Dénivellation verticale entre les deux lèvres d'un joint de dalle ou d'une fissure.



g) Tôle ondulée : Une ondulation régulière et rapprochée perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

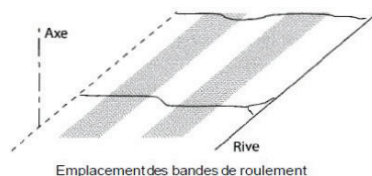
h) Flambement : Un renflement localisé par la mise en compression d'un joint de dalle.

III.2.1.1.2 Les fissurations

Une fissure est, par définition, une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée, qui est peut être causée par plusieurs facteurs.

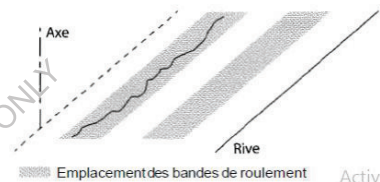
a) Fissure transversale

Figure III.7 – Fissure sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée isolée ou périodique d'espacement variable, intéressant tout ou partie de la largeur de la chaussée.



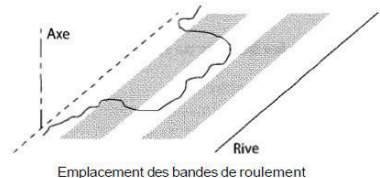
b) Fissure longitudinale dans les bandes de roulement

Figure III.8 – Fissure sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée apparaissant exclusivement dans une bande de roulement.



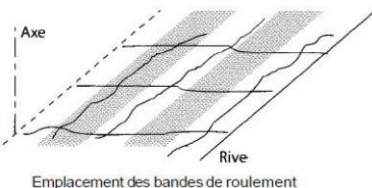
c) Fissure longitudinale non spécifique aux bandes de roulement

Figure III.9 – Fissure sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée non limitée aux bandes de roulement.



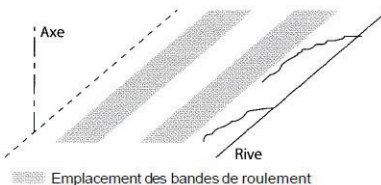
d) Fissure en « dalles »

Figure III.10 – Ensemble de fissures longitudinales et transversales se rejoignent pour former un réseau ou un maillage quasi rectangulaire de maille inférieure ou égale à 2m.



e) Fissure d'adaptation

Figure III.11 – Fissure provenant de mouvements de sols, tassement d'élargissement ou d'épaulement, retrait hydrique et glissement de remblai.



f) Fissure diverses

Figure III.12 – Fissures apparaissant d’une façon anarchique à la façon de la chaussée; elles se présentent généralement en forme « paraboliques », en « étoile » ou en « Y ».

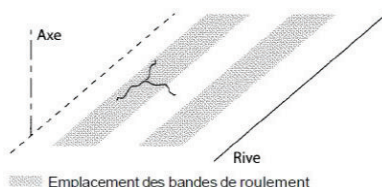
**g) Faïencage dans les bandes de roulement**

Figure III.13 – Ensemble de fissures entrelacées ou maillées (mailles fines inférieures à 30cm) formant une série de polygones et localisées dans les bandes de roulement.

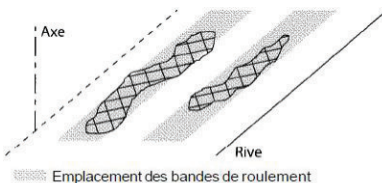
**h) Faïencage non spécifique aux bandes de roulement**

Figure III.14 – Ensemble de fissures entrelacées ou maillées soit à mailles fines (inférieures à 30cm) soit à mailles larges (supérieures à 30cm) formant une série de polygones non limités aux bandes de roulement.

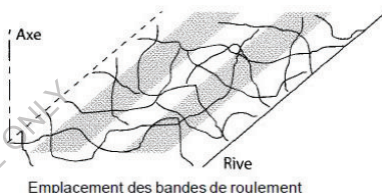
**i) Faïencage circulaire**

Figure III.15 – Ensemble de fissures entrelacées ou maillées (mailles fines inférieures à 30cm) formant une série de polygones apparaissant ponctuellement et affectant une zone sensiblement circulaire dont le diamètre est généralement inférieur à 1m.

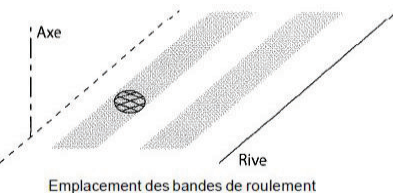
**j) Cassure d'angle**

Figure III.16 – Cassure de dalle rejoignant deux côtés adjacents et située à moins de 50cm du coin de dalle.

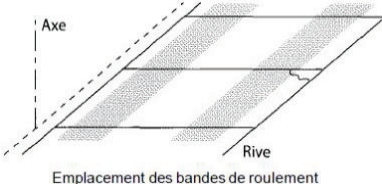
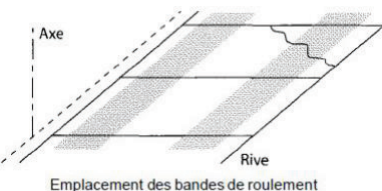
**k) Fissure oblique**

Figure III.17 – Cassure de dalle rejoignant deux côtés adjacents et située à plus de 50cm du coin de dalle.



III.2.1.1.3 Les arrachements

De nombreux types d'arrachement peuvent être observés sur la surface de la couche de roulement des chaussées routières souples, semi-rigides ou rigides.

- a) **Glaçage** : Aspect lisse et brillant de la surface de la couche de roulement résultant de l'usure des gravillons.
- b) **Plumage** : Arrachement des gravillons du revêtement.
- c) **Désenrobage** : Départ du mastic (liant et fines) autour des granulats d'une couche de roulement en enrobés.
- d) **peignage** : Départ de gravillons se développant suivant des sillons parallèles à l'axe de la chaussée.
- e) **Dégradation du joint longitudinale** : Départ de gravillons au raccordement longitudinal de deux bandes de mise en œuvre d'enduits superficiels.
- f) **Pelade** : Arrachement de la couche de roulement par plaque.
- g) **Nid de poule** : Cavité circulaire créée à la surface de la chaussée par départ de matériaux.
- h) **Tête de chat** : Pierre dure apparaissant à la surface de la chaussée après usure de la couche de roulement pour les chaussées classiques, ou du mortier pour les chaussées en béton.
- i) **Écaillage** : Désintégration superficielle localisée de la surface du béton (chaussée rigide).
- j) **Épaufrure « de bord de dalle »** : Effritement du bord de dalle au niveau du joint.
- k) **Découvrement d'armature** : Départ localisé de matériau laissant apparaître une armature (chaussées en béton armé continu).

III.2.1.1.4 Les mouvements de matériaux

Plusieurs types de mouvement de matériaux peuvent être observés sur la surface de la couche de roulement des chaussées routières souples, semi-rigides ou rigides.

- a) **Ressuage** : Remontée du liant à la surface de la chaussée recouvrant tout ou partie des granulats.
- b) **Indentation** : Enfoncement de gravillons dans l'enrobé en période chaude sous l'action du trafic.
- c) **Remontée des fines** : Apparition d'éléments fins à la surface de chaussée provenant de l'assise qui sont généralement localisées au droit de défauts de la couche de roulement (fissures, flaches, faïençages...etc.).
- d) **Rejet de pompage** : Ejection de matériaux (eau, boue...) à la surface de la chaussée lors du passage des véhicules lourds, au niveau des fissures ou des joints par suite de l'existence de cavités sous les dalles.

III.2.1.2 Identification des modes de rupture dans les chaussées semi-rigides

Plusieurs travaux de recherches ont été conduits en vue d'étudier l'effet du trafic routier sur le comportement des chaussées routières traitées aux liants hydrauliques. D'après [Gadouri et al. \(2019\)](#), les dégradations en profondeur observées dans les structures de chaussées routières semi-rigides (couche de forme traitées aux liants hydrauliques), causées principalement par le trafic du poids lourd, sont nombreuses. En effet, les échantillons des deux sols traités au laboratoire ont mis en évidence la présence de plusieurs types de ruptures causées par l'application d'une charge de compression verticale à savoir ([Tableau III.1](#)):

Tableau III.1 – Les six principaux modes de rupture observés dans les échantillons de sol–chaux–pouzzolane naturelle (PN) lors des essais de compression simple pour les couches de forme routières (Gadouri et al. 2019).



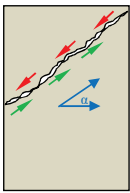


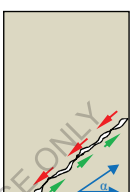


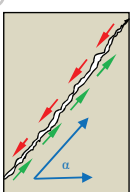
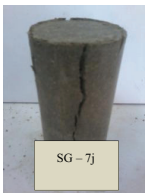
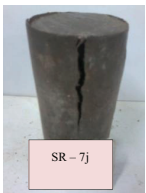
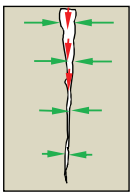




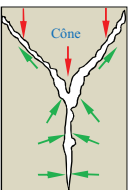


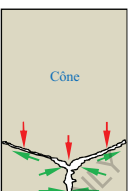


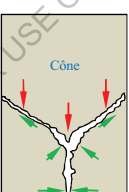


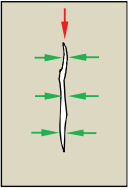

Mode de rupture		Six principaux modes de rupture observés lors des tests de compression simple (toutes les images présentées ci-dessous ont été sélectionnées au hasard parmi les 432 éprouvettes de sols traités)		Modèles schématiques des différents modes de rupture	Référence du mode de rupture	Description et observations
		Eprouvettes de "sol gris, SG"	Eprouvettes de "sol rouge, SR"			
Rupture par cisaillement (RC)	Rupture par cisaillement jusqu'à la tête de l'éprouvette (RCT)				RCT	Ces modes de rupture (RCT, RCP et RCPT) sont caractérisés par des fissures inclinées observées en tête de l'éprouvette (RCT, α entre 30° et 45°) et sur ses pieds (RCP, α entre 30° et 45°) ou entre eux (RCPT, α entre 45° et 60°).
	Rupture par cisaillement au pied de l'éprouvette (RCP)				RCP	Il convient de noter que ce mode de rupture (avec différents cônes) n'a été observé que dans les échantillons de sols argileux non stabilisés et les échantillons de SG et de SR stabilisés par PN seul lors de la cure avec et sans Na ₂ SO ₄ .
	Rupture par cisaillement du pied jusqu'à la tête de l'éprouvette (RCPT)				RCPT	Ces types de rupture peuvent être observés dans la majorité des sols utilisés comme matériaux de construction pour les ouvrages en terre notamment pour les « <i>chaussées routières</i> ».
Rupture par cisaillement vertical (RCV)					RCV	Ce mode de rupture (RCV) est caractérisé par des fissures verticales en lettre "I" qui ont été observées dans les échantillons de SG et de SR stabilisés à la chaux seule ou en combinaison avec la PN pour une période de durcissement très courte. Ces éprouvettes ont une ductilité élevée.
Rupture par éclatement brusque (REB)				Destruction totale (rupture aléatoire)	REB	Ce mode de rupture (REB) est produit avec une vitesse élevée en raison de la grande rigidité des éprouvettes. Il a été observé dans les échantillons du SG stabilisés à la chaux ou Chaux–NP avec et sans CaSO ₄ ·2H ₂ O et dans le SR avec ou sans CaSO ₄ ·2H ₂ O ou 2 % de Na ₂ SO ₄ après une période de durcissement plus longue.

Tableau III.1 – Suite (Gadouri et al. 2019).

Mode de rupture		Six principaux modes de rupture observés lors des tests de compression simple (toutes les images présentées ci-dessous ont été sélectionnées au hasard parmi les 432 éprouvettes de sols traités)		Modèles schématiques des différents modes de rupture	Reference du mode de rupture	Description et observations
		Eprouvettes de "sol gris, SG"	Eprouvettes de "sol rouge, SR"			
Rupture par poinçonnement (RP)	Rupture par poinçonnement à la tête de l'éprouvette (RPT)				RPT	Ces modes de rupture (RPT, RPP et RPM) se caractérisent par des fissures en lettre « Y » développées par la formation d'un cône de poinçonnement qui accélère la détérioration de l'éprouvette par pénétration lors de l'essai en compression simple. Ce cône s'est avéré avoir un pic très pointu avec une grande rigidité qui peut facilement perforer la partie inférieure de l'éprouvette. Il convient de noter que ce mode de rupture (avec différents cônes) n'a été observé que dans les échantillons de SG non stabilisés, SG stabilisés à la chaux seule ou Chaux-PN avec et sans Na ₂ SO ₄ et également dans les échantillons de SR stabilisés à la chaux seule avec et sans CaSO ₄ ·2H ₂ O.
	Rupture par poinçonnement au pied de l'éprouvette (RPP)				RPP	
	Rupture par poinçonnement au milieu de l'éprouvette (RPM)				RPM	
Rupture par flambement (RF)					RF	Ce mode de rupture (RF) est caractérisé par des fissures verticales qui sont initialement apparues au milieu de l'éprouvette et accompagnées d'une forte dilatation due à la charge verticale appliquée (force de compression).
Rupture par expansion interne (REI)		Ce type de rupture n'a pas été observé dans le système SG-Chaux-PN		Destruction totale (rupture aléatoire)	REI	Ce mode de rupture (REI) n'a été observé que dans les échantillons de SR stabilisés en présence de 6% de Na ₂ SO ₄ qui est provoqué par la formation de nouvelles phases expansives (ettringite de formation secondaire) pour une durée de durcissement plus longue. Cependant, ce type de rupture n'a pas été observé dans les éprouvettes de SG-Chaux-PN en raison de la formation d'une ettringite primaire dont elle n'est pas expansive.

III.2.2 Critères et mode d'évaluation de dégradations des chaussées

III.2.2.1 Critères d'évaluation

L'évaluation des chaussées repose sur une série de mesures et d'observations visuelles qui permettent d'établir la condition de la structure, de diagnostiquer les causes des dégradations apparentes et de cibler les solutions de réhabilitation les plus appropriées. Lorsqu'il s'agit de mesures telles que les caractéristiques géométriques ou physiques de la chaussée, il est plus facile de fixer des critères qui servent de base à l'évaluation et à la réhabilitation. Lorsqu'il s'agit d'observations visant à caractériser des dégradations de surface et l'état de la chaussée, l'établissement de tels critères devient plus difficile (MTQ, AIMQ 2002).

Afin de d'envisager cette difficulté, il est très nécessaire de formaliser la caractérisation des défauts de surface des chaussées et d'en faire une synthèse qui pourrait être accessible au personnel concerné par cette activité : cette synthèse, basée notamment sur une série de photos et de croquis, permet de catégoriser les dégradations de surface sur des chaussées souples et d'obtenir une façon d'en mesurer l'étendue et la sévérité de manière objective, cohérente et harmonisée aux procédures actuelles les plus courantes. Le tout vise à améliorer les communications et à faciliter les comparaisons en uniformisant les dénominations et les types de mesures des dégradations. Chacune des dégradations est décrite de façon générale et fait l'objet d'une fiche présentant la liste des causes les plus probables de la dégradation, la description des trois états de sévérité (faible, moyen et majeur). De façon générale, pour chaque dégradation, les trois états de sévérité incluent les notions suivantes :

Faible : Ce niveau correspond au stade initial de la dégradation : les premiers indices apparaissent parfois de façon intermittente sur un segment de route et l'évaluateur doit être attentif pour y déceler les symptômes de détérioration. Cet état est souvent difficile à percevoir pour un observateur se déplaçant en véhicule à une vitesse de l'ordre de 50 km/h. À la vitesse maximale permise, le confort au roulement n'est pas altéré ou il est très peu.

Moyen : Cet état désigne une dégradation continue et facilement perceptible pour un observateur se déplaçant à une vitesse de l'ordre de 50 km/h. À la vitesse maximale permise, le confort au roulement est sensiblement diminué par la plupart des dégradations.

Majeur : Cet état indique que la dégradation est accentuée et évidente, même pour un observateur se déplaçant à la vitesse maximale permise. Le confort au roulement est généralement diminué et, dans certains cas, la sécurité à la vitesse maximale permise peut être compromise. Une intervention de réfection ou de correction devrait être envisagée dans les meilleurs délais possibles lorsque cet état est atteint.

III.2.2.2 Mode d'évaluation

La norme PP44-01 de l'AASHTO « *Quantifying Cracks in Asphalt Pavement Surface* » vise à simplifier la classification des fissures et ainsi à assurer des résultats plus cohérents de mesures dans le temps et plus fiables pour les besoins de gestion des chaussées. La base de cette norme a été retenue pour une partie du bloc portant sur la fissuration. Le concept consiste à diviser chaque voie auscultée en « 5 » bandes, soit « 2 » bandes pour les pistes de roues et « 3 » bandes hors pistes de roues. En tenant compte de la direction du trafic, la bande numéro « 1 » est du côté gauche et la bande numéro « 5 » est du côté droit de la voie auscultée (Figure III.18).

Sur cette base, un taux de fissuration pour chaque bande peut être établi à partir des fissures détectées en longueur et en largeur. Les fissures en piste de roues sont principalement associées aux sollicitations du trafic et aux dégradations par fatigue alors que les fissures dans les autres bandes sont attribuables à des causes plus variées, comme le gel et le vieillissement, ou à des défauts de construction. On doit cependant noter que souvent en milieu urbain ou dans le cas de géométries particulières présentant des voies larges, le principe des bandes d'auscultation par voie pour la fissuration peut s'avérer difficile d'application et même inapproprié.



Figure III.18 – Détails des bandes d'auscultation pour la fissuration (dégradation) (MTQ-AIMQ 2002).

III.3 Processus et causes de dégradation des chaussées

III.3.1 Définition

Le processus de dégradation des chaussées est un phénomène bien connu mais difficile à décrire ou à maîtriser. En effet, les chaussées sont soumises à diverses sollicitations dont les effets directs ne sont pas toujours connus. Et plus, d'autres facteurs tels que les familles de chaussées concernées (revêtue/non revêtue) ainsi que le comportement des différents types de structures sous sollicitations viennent favoriser ou réduire les risques de dégradation des chaussées. Cela contribue à avoir pour chaque type de chaussée son propre processus de dégradation.

Sous l'effet des charges des véhicules et du climat, les chaussées routières peuvent se dégrader avec le temps et donc il faut les entretenir pour assurer un niveau de service adéquat pour les utilisateurs de la route. Cependant recenser et décrire ne suffisent pas, il convient aussi de classer ces dégradations et d'en apprécier les causes tout en donnant une définition précise aux différents défauts et les d'illustrer par des exemples photographiques types et en présentant les causes les plus probables de ces dégradations. D'ailleurs, le bon dimensionnement des chaussées routières est aussi un facteur clé pour assurer une infrastructure sécurisée et durable où il existe plusieurs méthodes de dimensionnement basant sur des critères différents.

III.3.2 Types de dégradations

Les dégradations les plus couramment rencontrées se classent en deux grandes familles :

les dégradations structurelles et les dégradations superficielles. Les premières apparaissent au sein de la structure de chaussée ou de son support et remettent en cause le patrimoine ;

Les secondes prennent naissance dans la couche de surface de la chaussée et affectent d'abord ses qualités superficielles.

III.3.2.1 Les dégradations structurelles « Type A »

Elles caractérisent un état structurel de la chaussée, soit lié à l'ensemble des couches et du sol, soit seulement lié à la couche de surface. Ce sont des dégradations issues d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée. On y trouve essentiellement les déformations et les fissurations par fatigue.

III.3.2.2 Les dégradations non structurelles « Type B »

Encore appelées dégradations superficielles, elles engendrent des réparations qui généralement ne sont pas liées à la capacité structurelle de la chaussée. Leur origine est soit un défaut de mise en oeuvre, soit un défaut de qualité d'un produit, soit une condition locale particulière que le trafic peut accentuer. Dans les dégradations de « type H », on distingue: Les fissurations (hors fatigue), les arrachements et les mouvements de matériaux.

III.3.3 Causes de dégradations par types de chaussée

Dès sa mise en service, la route se dégrade. Lorsque la couche de roulement est en terre, les désordres sont souvent spectaculaires, et leur développement est particulièrement rapide. Cela est bien connu. Ce qui l'est moins, c'est que les chaussées pourvues d'un revêtement hydrocarboné s'usent également et que pas plus que les premières, elles ne sauraient se passer d'une surveillance et de soins attentifs. Quant aux chaussées en béton, elles sont moins susceptibles aux effets des intempéries que les deux premières mais se dégradent elles aussi à des degrés moins élevés. Dans un cas comme dans l'autre, ces désordres varient beaucoup, dans leur forme et leur ampleur, avec le climat, les sols, la circulation et les caractéristiques géométriques de la route.

III.3.3.1 Cas de chaussées revêtues

III.3.3.1.1 Chaussées souples

Elles transmettent faiblement les contraintes engendrées par la circulation en ne les atténuant jusqu'à un niveau compatible avec la portance du sol. Dans ces conditions, la répétition de ces contraintes va entraîner une déformation plastique de l'assise granulaire et/ou du sol et se traduit par des déformations permanentes en surface. En période pluvieuse, on peut observer une élévation de la teneur en eau du support localisée sur les bords de chaussée. La faible rigidité de ces chaussées les rend sensibles à la réduction de portance due à l'élévation de la teneur en eau du support qui en résulte.

La couverture bitumineuse reposant sur un support peu rigide, est sollicitée à sa base par des efforts de traction-flexion. Leur répétition peut conduire à sa rupture. Ainsi, le processus de dégradation de ces types de chaussées comportera donc:

L'apparition de déformations permanentes (flaches, affaissements de nape et ornières) qui croissent en gravité et en étendue ;

L'apparition d'une fissuration longitudinale dans les bandes de roulement, qui se ramifie, se dédouble et évolue vers un faïençage.

La fissuration favorise les infiltrations d'eau qui amplifient la réduction de portance du support en période pluvieuse, donc aggravent les déformations permanentes ; ces infiltrations d'eau accélèrent également l'évolution de la fissuration en provoquant l'épaufrure des bords de fissure, des arrachements puis des nids de poule.

En outre, quelle que soit la nature du revêtement (enduit superficiel ou tapis d'enrobés), cette dernière s'use sous le trafic et le temps. Les efforts tangentiels engendrés par le trafic entraînent l'usure des couches de roulement hydrocarbonées par arrachement de gravillons ou du liant. Cette usure est aggravée par le vieillissement du liant sous l'effet du climat. Ce vieillissement fragilise le liant et le rend sujet à la rupture éventuellement sous le seul effet des variations de températures; il peut se traduire par l'apparition d'une fissuration superficielle anarchique.

III.3.3.1.2 Chaussées semi-rigides

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

L'interface couche de roulement-couche de base et la partie supérieure de la couche de base constituent des zones sensibles qui supportent des contraintes normales et de cisaillement importantes et qui peuvent présenter des caractéristiques plus faibles que le reste de la structure en raison des conditions de mise en oeuvre; celles-ci entraînent une plus grande sensibilité de cette zone aux agressions du trafic et du climat.

Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes au retrait thermique et au retrait de prise. Le retrait provoque des fissurations transversales qui, sans dispositions constructives, remontent à travers la couche de roulement. Celles-ci apparaissent en surface avec des espacements réguliers et une ouverture variant avec la température entre quelques dixièmes de millimètres et quelques millimètres. Souvent franches lors de leur apparition en surface, les fissures de retrait tendent à se dédoubler et se ramifier sous l'effet du trafic. En l'absence de colmatage de ces fissures, l'eau pénètre dans la structure, ce qui peut provoquer une diminution de la qualité du collage entre la couche de roulement et l'assise. Il s'en suit une aggravation de la fissuration puis de la dégradation de la partie supérieure de l'assise. Ces phénomènes s'accompagnent de remontée de boues puis d'affaissements et de nids de poule.

En outre, la faible capacité de déformation de ces assises les rend très sensibles aux mouvements, même faibles de leur support qui conduiront à la fissuration de l'assise (tassements, retrait hydrique du sol ...). Quant au revêtement, il est de même nature que pour les chaussées souples et l'on assiste pratiquement aux mêmes phénomènes. Cependant, sa faible épaisseur amplifie ces phénomènes et peut conduire à une dégradation rapide de la surface de la chaussée.

III.3.3.1.3 Chaussées rigides

Les chaussées en béton de ciment possèdent des avantages incontestables en raison de leur bon comportement sous les charges lourdes durant les périodes de température élevée. Par contre, elles sont plus sensibles aux tassements différentiels de l'infrastructure en raison du risque de fissuration et de

rupture des dalles rigides. Sur les routes à trafic élevé, elles nécessitent l'utilisation de granulats durs et résistants bien au polissage, faute de quoi la sécurité des usagers ne peut être assurée à longue échéance. En effet, à cause du module d'élasticité élevé du béton de ciment, les efforts induits par le trafic sont essentiellement repris en flexion par la couche de béton. Les contraintes de compression transmises au sol sont faibles.

Cependant, lors de la prise et des variations de température, le béton subit des phases de retrait. La fissuration correspondante est généralement contrôlée soit par la réalisation de joints transversaux, soit par la mise en place d'armatures continues longitudinales.

Les dégradations évoluent vers des remontées de particules fines dans les joints des dalles sous l'effet du trafic et de l'affaiblissement de l'assise par les pénétrations d'eau ; c'est le phénomène de pompage ou « *pumping* ».

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

III.3.3.2 Cas de chaussées non revêtues

Du fait de leur surface de roulement moins protégées que celles de chaussées revêtues, leur mode de dégradation est directement lié à l'action de deux de leurs principaux agresseurs : le trafic et l'eau.

III.3.3.2.1 Action des véhicules

Il existe une distinction à faire entre les effets de surface et ceux qui affectent les couches inférieures de la chaussée. Sur les routes non revêtues, les premiers sont d'autant plus sensibles que la cohésion de la couche de roulement est plus faible, c'est-à-dire qu'elle est formée de matériaux moins plastiques et plus secs. Les matériaux fins se trouvent dans le tourbillon de poussière soulevé par les véhicules en mouvement. Les plus gros restent sur la plateforme où ils forment la tôle ondulée.

Rapidement, des frayées longitudinales se forment dans lesquels les véhicules sont canalisés, ce qui accentue le processus et conduit à un profil en W caractéristique des chaussées usées. Ces frayées compromettent en outre rapidement l'assainissement et il arrive même souvent que dans les terrains sableux, la chaussée se retrouve rapidement en dessous du terrain naturel.

Suivant la largeur de la plate-forme, il se forme des bourrelets de plus en plus hauts et qui rendent les croisements de plus en plus dangereux. Le processus est particulièrement rapide sur les chaussées dont la pente transversale excède 4%, ce qui incite les véhicules à se maintenir au voisinage de son axe.

Quant aux virages, ils constituent des zones soumises à des efforts tangentiels particulièrement importants surtout quand ils sont à court rayon. Il arrive très fréquemment que les matériaux chassés vers l'extérieur y constituent un bourrelet qui vient s'installer sur la sur-largeur, en interdisant l'utilisation par une augmentation de la pente du versant. Le phénomène est encore accusé par les petites ravines transversales qui sont la maladie commune de tous les virages.

III.3.3.2.2 Action de l'eau

Tout sol non imbibé a en général une bonne portance et sa plasticité même élevée n'est pas une gêne pour la circulation. Par contre, certains matériaux très plastiques tels que l'argile portée à imbibition deviennent glissants et s'effondrent par manque de portance. Il y'a lieu de remarquer deux phénomènes:

- Les eaux stagnantes ;
- Les eaux de ruissellement.

a)- Les eaux stagnantes

Elles pénètrent dans la masse des remblais soit par la partie supérieure (eau de pluies) soit par la partie inférieure (remontées capillaires). Elles modifient ainsi les caractéristiques mécaniques des sols, altèrent leur résistance, provoquent des désordres internes tels que les tassements, les glissements et voire l'effondrement de remblais considérés comme stables.

b)- Les eaux de ruissellement

Elles sont généralement animées de grandes vitesses et érodent la surface de la chaussée. Les ravinements causés par ces eaux sont d'autant plus importants que la vitesse de celles-ci est grande et que les terrains manquent de cohésion.

III.3.4 Autres causes de dégradations

Les chaussées évoluent et se dégradent essentiellement sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont également liés à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en oeuvre. Certains désordres consécutifs à l'instabilité du support de la chaussée (remblais ou terrain naturel) peuvent apparaître indépendamment du trafic et du climat.

III.3.4.1 Le trafic

L'usure de la couche de roulement est la conséquence directe des efforts de cisaillements qui se manifestent au contact des pneumatiques. Elle entraîne essentiellement des pertes de matériaux, le polissage des granulats, la diminution de la rugosité. Elle dépend du trafic mais elle est également fonction de la croissance des véhicules et se trouve aggravée par la présence des poids lourds.

La fatigue des couches inférieures au contraire résulte des efforts verticaux de transmission des charges à la couche de fondation. La répétition des contacts inter granulaires entraîne des effets d'attrition, la production de fines et l'augmentation de la plasticité. La couche de roulement devenant moins rigide, les déformations sous charges augmentent, deviennent irréversibles, et il en résulte sa destruction plus ou moins rapide.

Ces phénomènes de fatigue sont fonction non seulement du nombre de répétitions des charges mais aussi et surtout des charges sur essieux. Le respect de la limitation des charges à l'essieu revêt donc d'une importance capitale pour une bonne exploitation de la route en adéquation avec les hypothèses de dimensionnement.

III.3.4.2 Les conditions climatiques

Le paramètre le plus nuisible sur le corps de chaussée est la présence de l'eau. L'eau pénètre dans le corps de chaussée par infiltration, par percolation et par remontées capillaires.

Nous savons que la teneur en eau d'un sol si elle est trop élevée peut provoquer des désordres importants en modifiant la portance ou en favorisant l'attrition de certains granulats comme les latérites. Les matériaux traités aux liants hydrauliques sont particulièrement sensibles au phénomène

de désenrobage. En effet, l'eau peut s'interposer entre les granulats et les liants lorsque la qualité du collage entre ces corps n'est pas suffisante. Aussi, quand les accotements ne sont pas protégés, des ravinements sont très probables par l'effet du ruissellement. Il se manifeste sur les bords de la chaussée, perpendiculairement à son axe, lorsque la pente transversale est trop forte.

En outre, nous savons que les revêtements bitumineux sont très sensibles aux variations de températures. Ainsi, l'exposition à des températures élevées, non prises en compte dans le choix d'un bitume, pourra entraîner un vieillissement rapide de ce dernier.

III.3.4.3 La qualité des matériaux

Elle est d'une importance capitale car il est difficile de faire une route de qualité à partir de matériaux aux caractéristiques médiocres. Les dégradations liées à la mauvaise qualité des matériaux peuvent être causées par:

- Une granulométrie incorrecte ;
- Un pourcentage élevé d'éléments roulés ;
- Une dureté des granulats insuffisante ;
- Des granulats sales (matières végétales) ;
- Un polissage rapide des granulats de fabrication défectueuse (spécialement pour les enrobés) ;
- Un pourcentage de liants ou de fines incorrect ;
- Un malaxage insuffisant.

III.3.4.4 La mise en oeuvre

Même si la qualité du liant et des granulats est excellente, le dimensionnement bien fait, une mauvaise réalisation au cours de la mise en oeuvre, de la manutention ou lors du compactage pourra se traduire par un ouvrage fini d'une qualité médiocre. Ainsi, divers défauts de mise en oeuvre peuvent conduire à des dégradations aux conséquences variées:

- Défauts de compacité aux accotements : il y'a affaissement sous la charge des poids lourds; il en résulte après un fluage de la couche de base ;
- Poches de points faibles en couche de base : il en résulte une cassure du revêtement plus rigide et une formation de nids de poule ou de flaches ;
- Défaut de compacité sur l'assise et sur la plateforme : la conséquence immédiate est l'existence de poches de points faibles conduisant à des orniérages ou pelades ;
- Mauvais accrochage du revêtement sur la couche de base : il peut donner lieu à un faïençage de la chaussée, à une pelade du revêtement ;
- Compactage excessif des couches de chaussées: il peut donner des ornières.

III.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'exposer dans leur plus grande majorité les dégradations et mode de rupture dans les chaussées revêtues. Ainsi, pour les chaussées à revêtement bitumineux, nous avons reflété la lumière sur le processus et les causes de dégradation des chaussées routières.

En conclusion, nous pouvons dire que les chaussées routières sont soumises à des contraintes importantes qui peuvent les dégrader avec le temps. Les causes de ces dégradations sont multiples et peuvent être liées à des facteurs externes tels que les conditions climatiques ou la charge des véhicules,

ainsi qu'à des facteurs internes tels que la qualité des matériaux utilisés ou la conception de la chaussée.

Cependant, grâce aux avancées technologiques et à l'expérience accumulée dans le domaine de la construction routière, il est possible de concevoir et de construire des chaussées plus résistantes et durables. De plus, la maintenance régulière des chaussées existantes permet de prévenir et de traiter les dégradations avant qu'elles ne deviennent trop importantes.

Il est donc essentiel de prendre en compte les processus de dégradation des chaussées routières dans leur conception, leur construction et leur maintenance, afin d'assurer la sécurité et le confort des usagers de la route, ainsi que la durabilité des infrastructures routières.

FOR AUTHOR USE ONLY

EXERCICES & APPLICATIONS

Chapitre I : Exercices & Applications

I.1 Calcul du trafic routier

Exercice 1 :

Considérons les données du trafic routier qui sont requises auprès de la direction des travaux publics de la Wilaya de Tlemcen (Algérie). En se basant sur les données reportées dans le [Tableau 1.1](#) ci-dessous :

- 1- Calculer le trafic journalier moyen annuel (TJMA) à l'année de mise en service (TJMA₂₀₁₄) et également après 20 ans de service (TJMA_h ou TJMA₂₀₃₄)?
- 2- Calculer le trafic effectif (T_{eff}) à l'année horizon (T_{eff2034})?
- 3- Déterminer le débit de pointe horaire normal à l'année horizon (Q₂₀₃₄)?
- 4- Calculer la capacité théorique (C_{th})?
- 5- Calculer le débit horaire admissible (Q_{adm})?
- 6- Vérifier si le débit de pointe horaire normal à l'année horizon (Q₂₀₃₄) est inférieur au débit horaire admissible (Q_{adm})?
- 7- Dédurre le nombre de voies de la route considérée?
- 8- Calculer le débit de saturation (Q_{sat})?
- 9- Dédurre l'année de saturation de la voie (n)?

Tableau 1.1 – Données du trafic routier.

Données et caractéristiques	Valeurs
Vitesse de base (V _B) ou vitesse de référence (V _r)	80 Km/h
TJMA ₂₀₁₁ (2011 est l'année du comptage)	2500 V/j
Année de mise en service	2014
Le taux d'accroissement annuel du trafic (τ)	4%
Le pourcentage de poids lourds (Z)	25 %
La durée de vie du projet (2034 est l'année horizon)	20 ans
Catégorie	C1
Environnement	E2
Coefficient d'équivalence pour le poids lourd (p)	6

Exercice 02 :

Considérons les résultats du trafic routier fournis par la DTP (**D**irection des **T**ravaux **P**ublics) en vue de construire une chaussée routière (assurant la liaison entre deux centres d'industrie de transformation pour une durée de vie estimée de 20 ans) dans une région présentant une dénivelée cumulée moyenne «*dh/L*» comprise entre 1.5% et 4% et une sinuosité (*s*) dont l'intervalle est de $0.1 < s \leq 0.3$. Le trafic journalier moyen annuel compté à l'année 2008 est de 3500 v/j avec un taux d'accroissement annuel

de 4% et un pourcentage des poids lourds de 30%. Cependant, l'année de mise en service est prévue pour l'année 2012. Prenez $P = 6$.

- 1- Déterminer l'environnement et la catégorie de cette chaussée routière?
- 1- Calculer le TJMA à l'année de mise en service et à l'année horizon $TJMA_h$?
- 2- Calculer le trafic effectif à l'année horizon?
- 3- Déterminer le débit de pointe horaire normal à l'année horizon?
- 4- Calculer la capacité théorique?
- 5- Calculer le débit horaire admissible?
- 6- Vérifier si le débit de pointe horaire normal à l'année horizon est inférieur au débit horaire admissible?
- 7- Dédire le nombre de voies de la route considérée?
- 8- Calculer le débit de saturation?
- 9- Dédire l'année de saturation de la voie?

I.2 Calcul des raccordements

Exercice 01 :

En se basant sur les coordonnées des points A, S et D présentés dans le [Tableau I.2](#) pour effectuer un raccordement des deux tronçons comme mentionné sur la convexe en [Figure I.1](#).

Tableau I.2 – Coordonnées des points A, S et D.

Rayon convexe de $R=7500m$		
Coordonnées des points	X (m)	Z (m)
Point « A »	7400	873.44
Point « S »	7675	878.43
Point « D »	7900	874.99

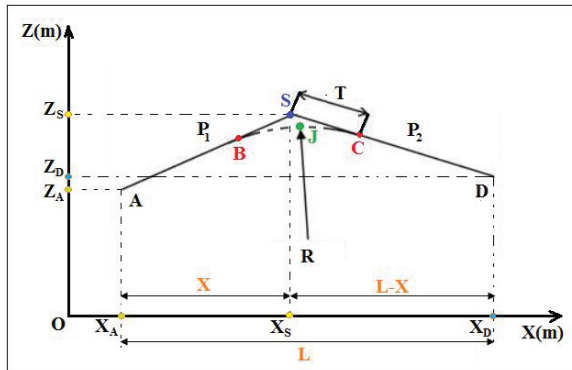


Figure I.1 – Convexe de raccordement.

- 1- Calculer les deux pentes $P_{1(AS)}$ et $P_{2(DS)}$?
- 2- Calculer la tangente « T » et la flèche « H »?

- 3- Déterminer les coordonnées des points de tangentes B, C et J?
- 4- Dédire la distance horizontale entre les deux points B et C?
- 5- Donner le tracé en plan de cette convexe de raccordement en adoptant une échelle représentative à savoir :

- En abscisse : 1 cm (sur la carte) \longrightarrow 1000m (sur terrain)
- En ordonnée : 1 cm (sur la carte) \longrightarrow 100m (sur terrain)

Exercice 02 :

Soit les coordonnées des points A, S et D présentés dans le [Tableau I.3](#), on veut effectuer un raccordement des deux tronçons comme mentionné sur la concave en [Figure I.2](#).

Tableau I.3 – Coordonnées des points A et D.

Rayon concave de R=8000m		
Coordonnées des points	X (m)	Z (m)
Point « A »	93	1096.8
Point « S »	500.6	1092
Point « D »	635.52	1094

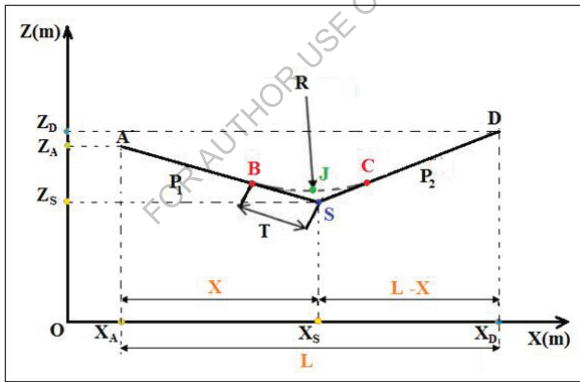


Figure I.2 – Concave de raccordement.

- 1- Calculer les deux pentes $P_{1(AS)}$ et $P_{2(DS)}$?
- 2- Calculer la tangente « T » et la flèche « H »?
- 3- Déterminer les coordonnées des points de tangentes B, C et J?
- 4- Dédire la distance horizontale entre les deux points B et C?
- 5- Donner le tracé en plan de cette convexe de raccordement en adoptant une échelle représentative à savoir :

- En abscisse : 1 cm (sur la carte) \longrightarrow 100m (sur terrain)
- En ordonnée : 1 cm (sur la carte) \longrightarrow 100m (sur terrain)

I.3 Calcul des terrassements

Exercice 01 :

La réfection (réparation) de la pelouse (gazon) du stade omnisports de la ville de Saint-Pierre en France nécessite la mise en place de 3000 m^3 de terre végétale de bonne qualité. Ce volume de terre végétale représente la quantité finale en place après compactage ou reconstitution (volume reconstitué V_r). Sachant que le coefficient de foisonnement de la terre végétale est de « $C_f = 1.25$ » et le coefficient de compactage est de 0.92.

- 1- Quel doit être le volume foisonné « V_f »?
- 2- Calculer le volume en place « V_p » à transporter au stade?

Exercice 02 :

La zone de stockage (2) des matériaux en remblai à mettre en place pour construire une plateforme de bâtiments par compactage fait un volume de 3261 m^3 (Figure I.3). Ce volume de matériaux en remblai représente la quantité finale en place après décapage « V_f ». Sachant que le foisonnement des matériaux en remblai est de « 25% » et le résidu après compactage est de 8%.

- 1- Quel doit être le volume reconstitué tout en déduisant la valeur de la longueur « a »?
- 2- Calculer le volume en place « V_p » à excaver tout en déduisant la valeur de la longueur « b »?
- 3- Calculer la hauteur du remblai « h » dans la zone de stockage?

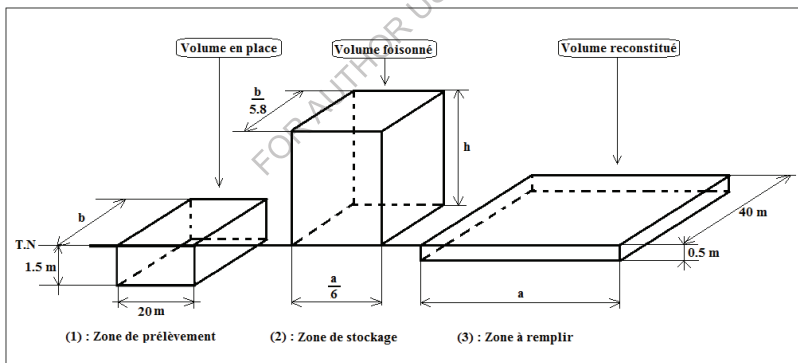


Figure I.3 – Construction d'une plateforme de bâtiments par l'utilisation des matériaux en remblai.

I.4 Calcul des cubatures

Exercice 01 :

Considérant une partie du profil en long d'une structure autoroutière « 2*2 voies » (Figure I.4). En se basant sur les données géométriques mentionnées dans la figure ci-dessous pour :

- 1- Calculer le volume de remblais total « V_{rt} »?
- 2- Calculer le volume de déblais total « V_{dt} »?

- 3- Déterminer la hauteur moyenne du remblai « h_{moy-r} » entre les deux profils P1 et P2 sachant que la largeur de la plateforme de la chaussée routière est de $b=20m$ qui repose sur un sol support de base $B=40m$? Déduire la pente du talus de remblai?
- 4- Déterminer l'emprise moyenne du déblai « B_{moy-d} » entre les deux profils P4 et P5 sachant que la hauteur moyenne du déblai $h_{moy-d}=14m$? Déduire la pente du talus de déblai?

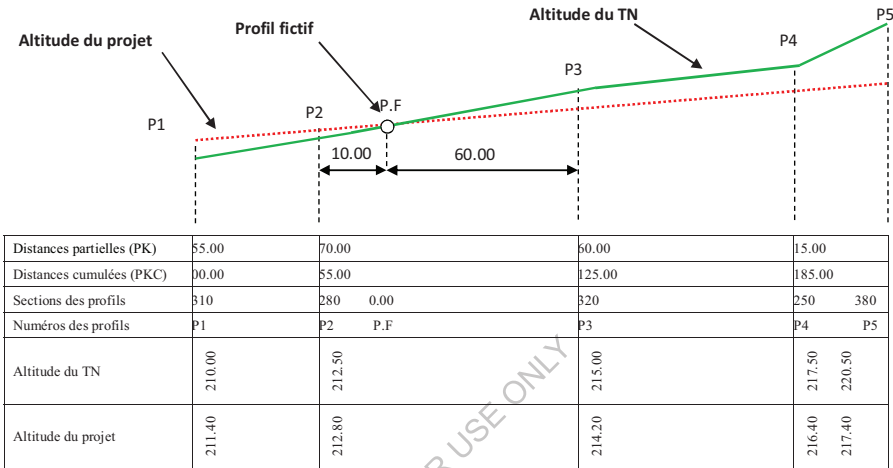


Figure 1.4 – Calcul des cubatures de déblai/remblai.

Exercice 02 :

La Figure 1.5 représente une combinaison d’une partie du profil en long et des profils en travers d’une chaussée autoroutière « 2*3 voies ». Les dimensions géométriques de cette autoroute sont reportées sur la figure ci-dessous.

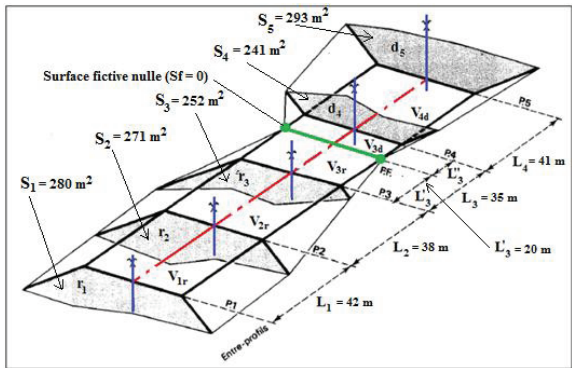


Figure 1.5 – Combinaison du profil en long et des profils en travers pour le calcul des cubatures.

- 1- Calculer le volume de remblais entre les profils suivants :

- a- Entre les deux profils P1 et P2
 - b- Entre les deux profils P2 et P3
 - c- Entre les deux profils P3 et PF (Remarque : «PF» est le profil fictif)
- 2- Déduire le volume de remblais total « V_{rt} »
- 3- Calculer le volume de déblais entre les profils suivants :
- a- Entre les deux profils PF et P4
 - b- Entre les deux profils P4 et P5
- 4- Déduire le volume de déblais total « V_{dt} »
- 5- Pour des raisons économiques (surcoût dû au transport), on veut réutiliser le déblai décapé à partir des deux profils (PF-P4) et (P4-P5) en tant qu'un matériau de remblai.
- a- Calculer (en tonne) le poids du remblai « P_s » nécessaire pour atteindre la densité sèche maximale « $\gamma_{dmax} = 16.5 \text{ kN/m}^3$ »?
 - b- Déduire (en tonne) le poids d'eau « P_w » nécessaire pour atteindre densité sèche maximale sachant que la teneur en eau optimale « $W_{opt} = 20\%$ »?

Chapitre II : Exercices & Applications

II.1 Vérification de la stabilité d'un sol support au poinçonnement

Exercice 1 :

Dans un projet routier, nous voulons vérifier la stabilité d'un sol support (marne jaunâtre compacte) au poinçonnement qui peut être causé par une couche de remblai (argile rougeâtre). Le remblai, reposant sur un terrain plat, a une hauteur maximale de $H_R = 14 \text{ m}$ et un poids volumique de $\gamma_R = 19.5 \text{ kN/m}^3$. Cependant, les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande et de compressibilité à l'œdomètre réalisés sur la marne jaunâtre compacte ont présenté une cohésion non drainée (C_u) et une pression de préconsolidation (σ'_p) de l'ordre de 100 kPa et 300 kPa, respectivement.

- 1- Vérifier la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande ? (Prenez $F_s = 1.5$)
- 2- Vérifier la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de compressibilité à l'œdomètre ? (Prenez $F_s = 1.5$)
- 3- On voudrait adopter un coefficient de sécurité de $F_s = 2$, que devrait-elle donc la valeur minimale de la cohésion non drainée (C_u) du sol support de remblai pour que la stabilité au poinçonnement soit assurée ?

Exercice 2 :

Dans un projet de remblai, nous voulons vérifier la stabilité d'un sol support (argile compacte) au poinçonnement qui peut être causé par une argile grisâtre utilisée en tant qu'un matériau de remblai. L'argile grisâtre, reposant sur un terrain en pente nécessitant une correction, a une hauteur maximale de $H_R = 13.5 \text{ m}$ et un poids volumique de $\gamma_R = 20 \text{ kN/m}^3$. Cependant, les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande et de compressibilité à l'œdomètre réalisés sur l'argile compacte ont présenté une cohésion non drainée (C_u) et une pression de préconsolidation (σ'_p) de l'ordre de 110 kPa et 350 kPa, respectivement.

- 1- Vérifier la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande ? (Prenez $F_s = 1.5$ et $J_c = 0.85$)
- 2- Vérifier la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de compressibilité à l'œdomètre ? (Prenez $F_s = 1.5$)
- 3- On voudrait adopter un coefficient de sécurité de $F_s = 2$, que devrait-elle donc la valeur minimale de la cohésion non drainée (C_u) du sol support de remblai pour que la stabilité au poinçonnement soit assurée ?

II.2 Dimensionnement des structures de chaussées routières

Exercice 1 :

Considérons les données ci-dessous du trafic routier qui sont requises auprès de la direction des travaux publics de la Wilaya d'El-Bayadh. Nous volons réaliser une chaussée routière en se basant sur la **méthode CBR**. On donne : $Z (\%PL) = 30\%$; $I_{CBR} = 8.43$; $\tau = 4\%$ et $P = 6.5$.

- 1- Calculer le trafic prévu (T_H) pour une durée de vie de 20 ans sachant que T_0 (ou $T_{JMA_{2015}}$) = 8800 v/j?
- 2- Déterminer le nombre moyen journalier (N) des véhicules supérieur à 1500 kg (soit 1.5 t) à l'année horizon (2035)?
- 3- Déterminer l'épaisseur totale du corps de chaussée et en déduire l'épaisseur réelle de la couche de fondation en se basant sur la méthode CBR ?

On fixe $e_1 = 7$ cm et $e_2 = 12$ cm à savoir : la couche de surface est un « Béton bitumineux, (BB) », la couche de base est une « Grave concassée, (GNT) » et la couche de fondation est un « Tuf ».

Exercice 2 :

On se basant sur les données de l'exercice 1 ci-dessus qui sont requises auprès de la direction des travaux publics de la Wilaya d'El-Bayadh. Nous volons réaliser une chaussée routière mais cette fois-ci en se basant sur la **méthode CTTT**. On donne : $Z (\%PL) = 30\%$; $I_{CBR} = 8.43$ et T_0 (ou $T_{JMA_{2015}}$) = 8800 v/j.

- Faites vos calculs et ainsi l'analyse des données et dites nous quelle est la structure de chaussée la plus adéquate selon les principes de la méthode CTTT ?

Exercice 3 :

On se basant sur les données de l'exercice 1 ci-dessus qui sont requises auprès de la direction des travaux publics de la Wilaya d'El-Bayadh. Nous volons réaliser une chaussée routière mais cette fois-ci en se basant sur la **méthode SETRA**. On donne : $Z (\%PL) = 30\%$; $I_{CBR} = 8.43$; $\tau = 4\%$ et T_0 (ou $T_{JMA_{2015}}$) = 8800 v/j.

- Faites vos calculs et ainsi l'analyse des données et dites nous quelle est la structure de chaussée la plus adéquate selon les principes de la méthode SETRA ?

SOLUTIONS DES EXERCICES & APPLICATIONS

I.1 Calcul du trafic routier

Solution exercice 1 :

1- Trafic journalier moyen annuel (TJMA) à l'année de mise en service (TJMA₂₀₁₄)

$$\text{On a : } TJMA_{2014} = TJMA_{2011} * (1 + \tau)^n$$

$$\text{AN : } TJMA_{2014} = 2500 * (1 + 0.04)^3 = 2813 \text{ v/j}$$

$$TJMA_{2014} = 2813 \text{ v/j}$$

2- Trafic journalier moyen annuel après 20 ans de service (TJMA₂₀₃₄)

$$\text{On a : } TJMA_{2034} = TJMA_{2014} * (1 + \tau)^n$$

$$\text{AN : } TJMA_{2034} = 2813 * (1 + 0.04)^{20} = 6164 \text{ v/j}$$

$$TJMA_{2034} = 6164 \text{ v/j}$$

3- Trafic effectif (T_{eff}) à l'année horizon (T_{eff2034})

$$\text{On a : } T_{\text{eff}2034} = [(1 - Z) + P * Z] * TJMA_{2034}$$

$$\text{AN : } T_{\text{eff}} = [(1 - 0.25) + 6 * 0.25] * 6164 = 13869 \text{ uvp/j}$$

$$T_{\text{eff}2034} = 13869 \text{ uvp/j}$$

4- Débit de pointe horaire normal à l'année horizon (Q₂₀₃₄)

$$\text{On a : } Q_h = (1/n) * T_{\text{eff}}$$

$$\text{Donc, } Q_{2034} = (1/n) * T_{\text{eff}2034}$$

$$\text{AN : } Q_{2034} = 0.12 * 13869 = 1665 \text{ uvp/h}$$

$$Q_{2034} = 1665 \text{ uvp/h}$$

5- Capacité théorique effective du profil en travers pour un écoulement en régime stable

$$\text{On a : } C_{th} \geq Q_h / K1 * K2$$

$$\text{A.N : } C_{th} \geq 1665 / 0.85 * 0.99$$

$$C_{th} \geq 1979 \text{ uvp/h}$$

6- Débit horaire admissible

$$\text{On a : } Q_{adm} = K1 * K2 * C_{th}$$

$$\text{A.N : } Q_{adm} = 1979 * 0.85 * 0.99 = 1666 \text{ uvp/h}$$

$$Q_{adm} = 1666 \text{ uvp/h}$$

7- Nombre de voies

$$\text{On a : } N = S * (Q_h / Q_{adm}) \text{ et } S = 2/3$$

$$N = 0.67 * (1665/1666)$$

$$N = 0.67 \text{ voie par sens}$$

$$\text{Donc : } N = 1 * 2 \text{ voies}$$

8- Débit de saturation

$$\text{On a : } Q_{sat} = 4 * Q_{adm}$$

$$\text{A.N : } Q_{sat} = 4 * 1666 = 6664 \text{ uvp/h}$$

$$Q_{sat} = 6664 \text{ uvp/h}$$

9- Année de saturation

$$\text{On a : } n = \ln(Q_{sat} / Q_h) / \ln(1 + \tau)$$

$$\text{A.N : } n = \ln(6664/1665)/\ln(1+0.04) = 1.39/0.039 = 35.64 = 36$$

Donc : $n = 36$

Alors : la route sera saturée à l'année 2050.

Solution exercice 02 :

1- Trafic journalier moyen annuel (TJMA) à l'année de mise en service (TJMA₂₀₁₂)

$$\text{On a : } TJMA_{2012} = TJMA_{2008} * (1 + \tau)^n$$

$$\text{AN : } TJMA_{2012} = 3500 * (1 + 0.04)^4 = 4379.55 \text{ v/j}$$

$$TJMA_{2012} = 4380 \text{ v/j}$$

2- Trafic journalier moyen annuel après 20 ans de service (TJMA₂₀₃₂)

$$\text{On a : } TJMA_{2032} = TJMA_{2012} * (1 + \tau)^n$$

$$\text{AN : } TJMA_{2032} = 4380 * (1 + 0.04)^{20} = 9210.37 \text{ v/j}$$

$$TJMA_{2032} = 9211 \text{ v/j}$$

3- Trafic effectif (T_{eff}) à l'année horizon (T_{eff2034})

$$\text{On a : } T_{\text{eff}2032} = [(1 - Z) + P * Z] * TJMA_{2032}$$

$$\text{AN : } T_{\text{eff}} = [(1 - 0.3) + 6 * 0.3] * 9211 = 15636.3 \text{ uvp/j}$$

$$T_{\text{eff}2034} = 15637 \text{ uvp/j}$$

4- Débit de pointe horaire normal à l'année horizon (Q₂₀₃₄)

$$\text{On a : } Q_h = (1/n) * T_{\text{eff}}$$

$$\text{Donc, } Q_{2032} = (1/n) * T_{\text{eff}2032}$$

$$\text{AN : } Q_{2032} = 0.12 * 15637 = 1876.44 \text{ uvp/h}$$

$$Q_{2032} = 1877 \text{ uvp/h}$$

5- Capacité théorique effective du profil en travers pour un écoulement en régime stable

$$\text{On a : } C_{th} \geq Q_h / K1 * K2$$

$$\text{A.N : } C_{th} \geq 1877 / 0.85 * 0.99$$

$$\text{Donc : } C_{th} \geq 2231.54 \text{ uvp/h}$$

$$\text{Alors : } C_{th} \geq 2232 \text{ uvp/h}$$

6- Débit horaire admissible

$$\text{On a : } Q_{adm} = C_{th} * K1 * K2$$

$$\text{A.N : } Q_{adm} = 2232 * 0.85 * 0.99 = 1687.21 \text{ uvp/h}$$

$$Q_{adm} = 1688 \text{ uvp/h}$$

7- Nombre de voies

$$\text{On a : } N = S * (Q_h / Q_{adm}) \text{ et } S = 2/3$$

$$N = 0.67 * (1877/1688)$$

$$N = 0.75 \text{ voie par sens}$$

$$\text{Donc : } N = 1 * 2 \text{ voies}$$

8- Débit de saturation

$$\text{On a : } Q_{sat} = 4 * Q_{adm}$$

$$\text{A.N : } Q_{sat} = 4 * 1688 = 6752 \text{ uvp/h}$$

$$Q_{sat} = 6752 \text{ uvp/h}$$

9- Année de saturation

$$\text{On a : } n = \ln(Q_{sat} / Q_h) / \ln(1 + \tau)$$

$$\text{A.N : } n = \ln(6752/1877)/\ln(1+0.04) = 1.39/0.039 = 8.04 \text{ ans}$$

$$\text{Donc : } n = 9 \text{ ans}$$

Alors : la route sera saturée à l'année 2021.

I.2 Calcul des raccordements

Solution exercice 01 :

1- Pentes $P_{1(AS)}$ et $P_{2(DS)}$

a) $P_{1(AS)} = \dots ?$; On a: $P_{1(AS)} = [(Z_S - Z_A) / (X_S - X_A)] * 100$

A.N : $P_{1(AS)} = [(878.43 - 873.44) / (7675 - 7400)] * 100 = 1.815\%$

Donc : $P_{1(AS)} = 1.815\%$

b) a) $P_{2(DS)} = \dots ?$

On a: $P_{2(DS)} = [(Z_S - Z_D) / (X_S - X_D)] * 100$

A.N : $P_{2(DS)} = [(878.43 - 874.99) / (7675 - 7900)] * 100 = -1.528\%$

Donc : $P_{2(DS)} = -1.528\%$

2- Tangente « T » et la flèche « H »

a) $T = \dots ?$; On a: $T = (R / 2) * [Abs(P_1) + Abs(P_2)]$

A.N: $T = (7500 / 2) * [Abs(0.01815) + Abs(-0.1528)] = 125.625 \text{ m}$

Donc : $T = 125.625 \text{ m}$

b) $H = \dots ?$; On a: $H = T^2 / 2R$

A.N : $H = 125.625^2 / 2 * 7500 = 1.052 \text{ m}$

Donc: $H = 1.052 \text{ m}$

3- Coordonnées des points de tangentes B, C et J

a) Cordonnées du point « B »

$B(X_B, Z_B) \dots ?$

On a: $B(X_B, Z_B) \begin{cases} X_B = X_S - T \\ Z_B = Z_S - T * P_1 \end{cases}$

A.N: $B(X_B, Z_B) \begin{cases} X_B = 7675 - 125.625 = 7549.38 \text{ m} \\ Z_B = 878.43 - 125.625 * 0.01815 = 876.14 \text{ m} \end{cases}$

Donc : $B(7549.38 ; 876.14) \text{ m}$

b) Cordonnées du point « C »

On a: $C(X_C, Z_C) \begin{cases} X_C = X_S + T \\ Z_C = Z_S + T * P_2 \end{cases}$

A.N: $C(X_C, Z_C) \begin{cases} X_C = 7675 + 125.625 = 7860.63 \text{ m} \\ Z_C = 878.43 + 125.625 * (-0.01528) = 876.51 \text{ m} \end{cases}$

Donc : $C(7860.63 ; 876.51) \text{ m}$

c) Cordonnées du point « J »

On a: $J(X_J, Z_J) \begin{cases} X_J = X_B + R * P_1 \\ Z_J = Z_B + R * (P_1)^2 - [(R * P_2)^2 / 2R] \end{cases}$

A.N: $J(X_J, Z_J) \begin{cases} X_J = 7549.38 + 7500 * 0.01815 = 7685.88 \text{ m} \\ Z_J = 876.14 + 7500 * (0.01815)^2 - [(7500 * (-0.01528))^2 / 2 * 7500] = 877.02 \text{ m} \end{cases}$

Donc : $C(7685.88 ; 877.02) \text{ m}$

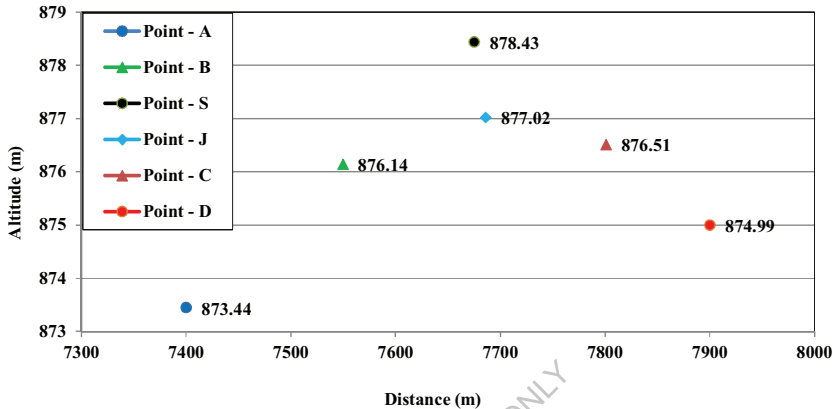
4- Distance horizontale entre les deux points B et C

On a: $BC = X_C - X_B$

A.N: $BC = 7800.63 - 7549.38 = 251.25 \text{ m}$

Donc : $BC = 251.25 \text{ m}$

5- Tracé en plan de cette convexe de raccordement



Solution exercice 02 :

1- Pentes $P_{1(AS)}$ et $P_{2(DS)}$

a) $P_{1(AS)} = \dots ?$; On a: $P_{1(AS)} = [(Z_S - Z_A) / (X_S - X_A)] * 100$

A.N : $P_{1(AS)} = [(2092 - 2096.8) / (1500.6 - 1093)] * 100 = - 1.178\%$

Donc : $P_{1(AS)} = - 1.178\%$

b) a) $P_{2(DS)} = \dots ?$

On a: $P_{2(DS)} = [(Z_S - Z_D) / (X_S - X_D)] * 100$

A.N : $P_{2(DS)} = [(2092 - 2094) / (1500.6 - 1635.5)] * 100 = 1.483\%$

Donc : $P_{2(DS)} = 1.483\%$

2- Tangente « T » et la flèche « H »

a) $T = \dots ?$; On a: $T = (R / 2) * [Abs(P_1) + Abs(P_2)]$

A.N: $T = (8000 / 2) * [Abs(- 0.1178) + Abs(0.1483)] = 106.4 \text{ m}$

Donc : $T = 106.4 \text{ m}$

b) $H = \dots ?$; On a: $H = T^2 / 2R$

A.N : $H = 106.4^2 / 2 * 8000 = 0.71 \text{ m}$

Donc: $H = 0.71 \text{ m}$

3- Coordonnées des points de tangentes B, C et J

a) Cordonnées du point « B »

$B(X_B, Z_B) \dots ?$

On a: $B(X_B, Z_B) \begin{cases} X_B = X_S - T \\ Z_B = Z_S - T * P_1 \end{cases}$

A.N: $B(X_B, Z_B) \begin{cases} X_B = 1500.6 - 106.4 = 1394.2 \text{ m} \\ Z_B = 2092 - 106.4 * (- 0.01178) = 2093.25 \text{ m} \end{cases}$

Donc : $B(1394.2; 2093.25) \text{ m}$

b) Cordonnées du point « C »

$$\text{On a: } C(X_C, Z_C) \begin{cases} X_C = X_S + T \\ Z_C = Z_S + T * P_2 \end{cases}$$

Donc : C(1607 ; 2093.58) m

c) Cordonnées du point « J »

$$\text{On a: } J(X_J, Z_J) \begin{cases} X_J = X_B + R * P_1 \\ Z_J = Z_B + R * (P_1)^2 - [(R * P_2)^2 / 2R] \end{cases}$$

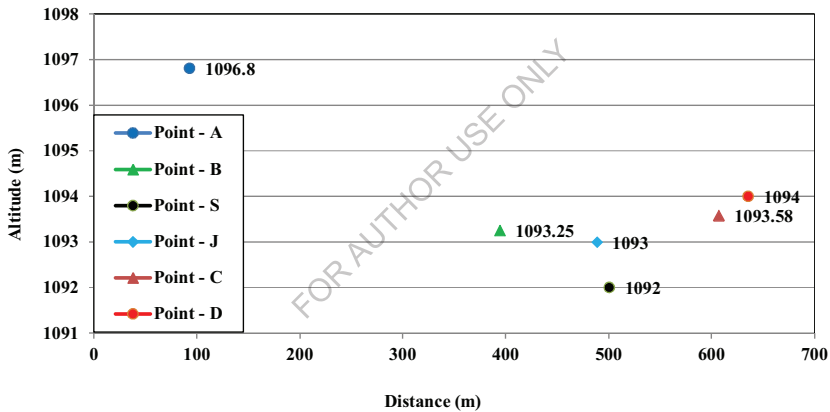
Donc : C(1488.44 ; 2093.01) m

4- Distance horizontale entre les deux points B et C

On a: $BC = X_C - X_B$

A.N: $BC = 1607 - 1394.2 = 212.8$ m

Donc : $BC = 212.8$ m

5- Tracé en plan de cette convexe de raccordement**I.3 Calcul des terrassements****Solution exercice 01 :****1- Volume foisonné « V_f »**

$V_f = \dots ?$

On a : $V_f = C_c * V_r$ ce qui implique que: $V_f = V_r / C_c$; à savoir que : $C_c = 0.92$

A.N: $V_f = 3000 / 0.92 = 3260 \text{ m}^3$

Donc : $V_f = 3260 \text{ m}^3$

2- Volume en place « V_p »

$V_p = \dots ?$

On a : $V_f = V_p * C_{fr}$ ce qui implique que: $V_p = V_f / C_{fr}$

On a aussi : $C_{fr} = C_f * C_c$ où : $C_f = 1.25$ et $C_c = 0.92$ ce qui implique que : $C_{fr} = 1.25 * 0.92 = 1.15$

A.N : $V_p = 3000 / 1.15 = 2608.7 \text{ m}^3$

Donc : $V_p = 2608.7 \text{ m}^3$

Solution exercice 02 :**1- Volume reconstitué « Vr » et la longueur « a »**a) $V_r = \dots ?$ On a : $V_r = C_c * V_f$; $V_f = 3300 \text{ m}^3$; $C_c = \dots ?$ A.N : $C_c = 1 - 0.08 = 0.92$ A.N : $V_r = 0.92 * 3300 = 3036 \text{ m}^3$ Donc : $V_r = 3036 \text{ m}^3$ b) $a = \dots ?$ On a : $V_r = a * 0.5 * 40$ A.N : $a = V_r / 20 = 151.8 \text{ m}$ Donc : $a = 151.8 \text{ m}$ **2- Volume en place « Vp » et la longueur « b »**a) $V_p = \dots ?$ On a : $V_r = V_p * C_{fr}$ ce qui implique que : $V_p = V_r / C_{fr}$ On calcul d'abord C_{fr} : $C_{fr} = C_c * C_r = 0.92 * 1.25 = 1.15$ A.N : $V_p = 3036 / 1.15 = 2640 \text{ m}^3$ Donc : $V_p = 2640 \text{ m}^3$ b) $b = \dots ?$ $V_p = b * 1.5 * 20$ A.N : $b = V_p / 30 = 88 \text{ m}$ Donc : $b = 88 \text{ m}$ **3- Hauteur du remblai « h » dans la zone de stockage**On a : $V_r = (a/6) * h * (b/5.8)$ ce qui implique que : $h = (V_r * 34.8) / (a * b)$ A.N : $h = (3300 * 34.8) / (151.8 * 88) = 114840 / 13358.4 = 8.6 \text{ m}$ Donc : $h = 8.6 \text{ m}$ **I.4 Calcul des cubatures****Solution exercice 01 :****1- Volume de remblais total « Vrt »**

Volumes de remblais concernés sont notés:

a) V_{r1} (entre P1 et P2)On a : $V_{r1} = L_1 * \frac{S_1 + S_2}{2}$ AN : $V_{1r} = 55 * \frac{310 + 280}{2} = 16255 \text{ m}^3$ $V_{1r} = 16255 \text{ m}^3$ b) V_{2r} (entre P2 et PF)On a : $V_{2r} = L'_2 * \frac{S_1 + S_2}{2}$ AN : $V_{2r} = 10 * \frac{280 + 0}{2} = 1400 \text{ m}^3$ $V_{2r} = 9800 \text{ m}^3$ Alors le volume de remblai total « V_{rt} » se calcule comme suit : $V_{rt} = V_{1r} + V_{2r} + \dots + V_{nr}$ A.N : $V_{rt} = 16255 + 1400 = 17655 \text{ m}^3$

Donc : $V_{rt} = 17655 \text{ m}^3$

2- Volume de déblais total « V_{dt} »

Volumes de déblais concernés sont notés:

a) V_{3d} (entre les deux profils PF et P3)

$$\text{On a : } V_{3d} = L''_2 * \frac{0+S_3}{2}$$

$$\text{AN : } V_{3d} = 60 * \frac{0+320}{2} = 9600 \text{ m}^3$$

$$V_{3d} = 9600 \text{ m}^3$$

b) Entre les deux profils P3 et P4

$$\text{On a : } V_{4d} = L_3 * \frac{S_3+S_4}{2}$$

$$\text{AN : } V_{4d} = 60 * \frac{320+250}{2} = 17100 \text{ m}^3$$

$$V_{4d} = 17100 \text{ m}^3$$

c) Entre les deux profils P4 et P5

$$\text{On a : } V_{5d} = L_4 * \frac{S_4+S_5}{2}$$

$$\text{AN : } V_{5d} = 15 * \frac{250+380}{2} = 5475 \text{ m}^3$$

$$V_{4d} = 5475 \text{ m}^3$$

Alors le volume de déblais total « V_{dt} » se calcule comme suit :

$$\text{On a : } V_{dt} = V_{3d} + V_{4d} + \dots + V_{nd}$$

$$\text{AN : } V_{dt} = 9600 + 17100 + 5475 = 32175 \text{ m}^3$$

$$V_{dt} = 32175 \text{ m}^3$$

3- On cherche à calculer :

a) Hauteur moyenne du remblai « h_{moy-r} » entre les deux profils P1 et P2 sachant que la largeur de la plateforme de la chaussée routière est de $b=20\text{m}$ qui repose sur un sol support de base $B=40\text{m}$

$h_{moy-r} = (h_{1r} + h_{2r})/2$ à savoir :

Au point P1, On a : h_{1r} = Altitude du projet – Altitude du TN

$$\text{A.N : } h_{1r} = 211.4 - 210 = 1.4 \text{ m}$$

Donc : $h_{1r} = 1.4 \text{ m}$

Au point P2, On a : h_{2r} = Altitude du projet – Altitude du TN

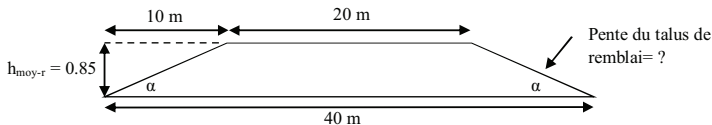
$$\text{A.N : } h_{2r} = 212.8 - 212.5 = 0.3 \text{ m}$$

Donc : $h_{2r} = 0.3 \text{ m}$

$$\text{A.N : } h_{moy-r} = (1.4 + 0.3)/2 = 0.75 \text{ m}$$

$$h_{moy-r} = 0.85 \text{ m}$$

b) Pente du talus de remblai



$$\text{Tang } \alpha = h_{moy-r}/10 = 0.85/10 = 0.085$$

Donc : la pente du talus de remblai $\alpha = 4.86^\circ$

4- On cherche à calculer :

a) Emprise moyenne du déblai « B_{moy-d} » entre les deux profils P4 et P5 sachant que la hauteur moyenne du déblai $h_{moy-d} = 14 \text{ m}$.

On a : la superficie d'un trapèze se calcule comme suit :

$$S_{\text{moy-d}} = h_{\text{moy-d}} * (b + B_{\text{moy-d}}) / 2$$

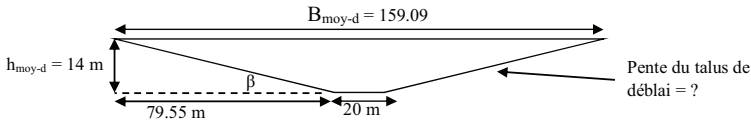
Ça veut dire : $B_{\text{moy-d}} = (2 * S_{\text{moy-d}} - h_{\text{moy-d}} * b) / h_{\text{moy-d}}$; sachant que: $S_{\text{moy-d}} = (S_4 + S_5) / 2$

$$\text{A.N: } S_{\text{moy-d}} = (250 + 380) / 2 = 315 \text{ m}^2$$

$$\text{A.N: } B_{\text{moy-d}} = (2 * 315 - 2.2 * 20) / 2.2 = 159.09 \text{ m}$$

$$\text{Alors: } B_{\text{moy-d}} = 159.09 \text{ m}$$

b) Pente du talus de déblai



$$\text{Tang } \beta = h_{\text{moy-d}} / 123.18 = 14 / 123.18 = 0.176$$

Donc : la pente du talus de déblai $\beta = 9.98^\circ$

Solution exercice 02 :

1- Volume de remblais entre les profils suivants :

a) Entre les deux profils P1 et P2

$$\text{On a : } V_{1r} = L_1 * \frac{S_1 + S_2}{2}$$

$$\text{AN : } V_{1r} = 42 * \frac{280 + 271}{2} = 11571 \text{ m}^3$$

$$V_{1r} = 11571 \text{ m}^3$$

b) Entre les deux profils P2 et P3

$$\text{On a : } V_{2r} = L_2 * \frac{S_2 + S_3}{2}$$

$$\text{AN : } V_{2r} = 38 * \frac{271 + 252}{2} = 9937 \text{ m}^3$$

$$V_{2r} = 9937 \text{ m}^3$$

c) Entre les deux profils P3 et PF (Remarque : «PF» est le profil fictif)

$$\text{On a : } V_{3r} = L'_3 * \frac{S_3 + 0}{2}$$

$$\text{AN : } V_{3r} = 20 * \frac{252 + 0}{2} = 2520 \text{ m}^3$$

$$V_{3r} = 2520 \text{ m}^3$$

2- Volume de remblais total «V_{rt}»

$$\text{On a : } V_{rt} = V_{1r} + V_{2r} + V_{3r} + \dots + V_{nr}$$

$$\text{AN : } V_{rt} = 11571 + 9937 + 2520 = 24028 \text{ m}^3$$

$$V_{rt} = 24028 \text{ m}^3$$

3- Volume de déblais entre les profils suivants :

a) Entre les deux profils PF et P4

$$\text{On a : } V_{3d} = L''_3 * \frac{0 + S_4}{2}$$

$$\text{AN : } V_{3d} = 15 * \frac{0 + 241}{2} = 1807.5 \text{ m}^3$$

$$V_{3d} = 1807.5 \text{ m}^3$$

b) Entre les deux profils P4 et P5

$$\text{On a : } V_{4d} = L_4 * \frac{S_4 + S_5}{2}$$

$$\text{AN : } V_{4d} = 41 * \frac{241 + 293}{2} = 10947 \text{ m}^3$$

$$V_{4d} = 10947 \text{ m}^3$$

4- Volume de déblais total «V_{dt}»

$$\text{On a : } V_{dt} = V_{3d} + V_{4d} + \dots + V_{nd}$$

$$\text{AN : } V_{dt} = 1807.5 + 10947 = 12754.5 \text{ m}^3$$

$$V_{dt} = 12754.5 \text{ m}^3$$

5- Pour des raisons économiques (surcoût dû au transport), on veut réutiliser le déblai décapé à partir des deux profils (PF-P4) et (P4-P5) en tant qu'un matériau de remblai.

a) Poids du remblai «Ps» nécessaire pour atteindre la densité sèche maximale «γ_{dmax} = 16.5 kN/m³»

$$\text{On a : } \gamma_{dmax} = \frac{P_s}{V} \text{ et } P_s = V * \gamma_{dmax}$$

$$\text{AN : } P_s = 24028 * 16.5 = 396462 \text{ KN}$$

$$\text{Donc : } P_s = 39646.2 \text{ t}$$

b) Poids d'eau «P_w» nécessaire pour atteindre densité sèche maximale sachant que la teneur en eau optimale «W_{opt} = 20%»

$$\text{On a : } W_{opt} = \frac{P_w}{P_s} \text{ et } P_w = P_s * W_{opt}$$

$$\text{AN : } P_w = 396462 * 0.2 = 79292.4 \text{ KN}$$

$$\text{Donc : } P_w = 7929.24 \text{ t}$$

Chapitre II : Exercices & Applications

II.1 Vérification de la stabilité d'un sol support au poinçonnement

Solution exercice 1 :

1- Vérification de la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

La valeur minimale de la résistance au cisaillement du sol support pour porter la charge du remblai durant et après la construction et ainsi que le poids des engins lors du terrassement peut être calculée à partir de la formule de portance classique suivante :

$$C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_S}{5.14 * J_C}$$

Pour que la stabilité au poinçonnement du sol support soit assurée; il faut que ce dernier « sol support » doive avoir une cohésion non drainée « C_{U(SS)} = 100 kPa » supérieure ou égale à celle du remblai « C_{U(R)} » calculée par l'équation ci-dessus :

$$\text{On a : } C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_S}{5.14 * J_C} ; \text{ avec } J_C = 1 \text{ (car le remblai repose sur un terrain plat) et } F_S = 1.5.$$

$$\text{A.N : } C_{U(\text{remblai})} = \frac{14 * 19.5 * 1.5}{5.14 * 1} = 79.5 \text{ kPa}$$

$$\text{Donc : } C_{U(\text{remblai})} = 79.5 \text{ kPa}$$

D'après le résultat obtenu, il est très clair que la condition « C_{U(SS)} ≥ C_{U(R)} » est vérifiée, donc on peut déclarer que la stabilité du sol support au poinçonnement est assurée.

2- Vérification de la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de compressibilité à l'œdomètre

Cette approche consiste à comparer la résistance au cisaillement non drainée du remblai « $C_{U(R)}$ » (déterminée par l'équation précédente ci-dessus) avec la résistance au cisaillement non drainée du sol support « $C_{U(SS)}$ » estimée par l'équation ci-dessous :

$$C_{U(\text{Sol support})} = 0.3 * \sigma'_p(SS)$$

$$\text{A.N : } C_{U(\text{Sol support})} = 0.3 * 300 = 90 \text{ kPa}$$

Donc : $C_{U(\text{Sol support})} = 90 \text{ kPa}$; on sait aussi que : $C_{U(\text{remblai})} = 79.5 \text{ kPa}$

D'après le résultat obtenu, il est très clair que la condition « $C_{U(SS)} \geq C_{U(R)}$ » est vérifiée, donc on peut déclarer que la stabilité du sol support au poinçonnement est assurée.

3- Valeur minimale de la cohésion non drainée du sol support ($C_{U(SS)}$) de remblai pour que la stabilité au poinçonnement soit assurée pour un $F_s = 2$

Pour que la stabilité au poinçonnement du sol support soit assurée; il faut que ce dernier « sol support » doive avoir une cohésion non drainée « $C_{U(SS)} = 100 \text{ kPa}$ » supérieure ou égale à celle du remblai « $C_{U(R)}$ » calculée par l'équation ci-dessus :

On a: $C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_s}{5.14 * J_C}$; avec $J_C = 1$ (car le remblai repose sur un terrain plat) et $F_s = 2$.

$$\text{A.N: } C_{U(\text{remblai})} = \frac{14 * 19.5 * 2}{5.14 * 1} = 106.22 \text{ kPa}$$

$$\text{Donc : } C_{U(\text{remblai})} = 106.22 \text{ kPa}$$

Alors : pour que la stabilité au poinçonnement soit assurée; la valeur minimale de la cohésion non drainée du sol support ($C_{U(SS)}$) de remblai devrait être nettement supérieure à 106.22 kPa.

Solution exercice 2 :

Dans un projet de remblai, nous voulions vérifier la stabilité d'un sol support (argile compacte) au poinçonnement qui peut être causé par une argile grisâtre utilisée en tant qu'un matériau de remblai. L'argile grisâtre, reposant sur un terrain en pente nécessitant une correction, a une hauteur maximale de $H_R = 13.5 \text{ m}$ et un poids volumique de $\gamma_R = 20 \text{ kN/m}^3$. Cependant, les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande et de compressibilité à l'œdomètre réalisés sur la marne jaunâtre compacte ont présenté une cohésion non drainée (C_U) et une pression de préconsolidation (σ'_p) de l'ordre de 110 kPa et 350 kPa, respectivement.

1- Vérification de la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande

La valeur minimale de la résistance au cisaillement du sol support pour porter la charge du remblai durant et après la construction et ainsi que le poids des engins lors du terrassement peut être calculée à partir de la formule de portance classique suivante :

$$C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_s}{5.14 * J_C}$$

Pour que la stabilité au poinçonnement du sol support soit assurée; il faut que ce dernier « sol support » doive avoir une cohésion non drainée « $C_{U(SS)} = 110 \text{ kPa}$ » supérieure ou égale à celle du remblai « $C_{U(R)}$ » calculée par l'équation ci-dessus :

$$\text{On a: } C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_S}{5.14 * J_C} ; \text{ avec } J_C = 0.85 \text{ (car le remblai repose sur un terrain pentu) et } F_S = 1.5.$$

$$\text{A.N: } C_{U(\text{remblai})} = \frac{13.5 * 20 * 1.5}{5.14 * 0.85} = 92.7 \text{ kPa}$$

$$\text{Donc : } C_{U(\text{remblai})} = 92.7 \text{ kPa}$$

D'après le résultat obtenu, il est très clair que la condition « $C_{U(SS)} \geq C_{U(R)}$ » est vérifiée, donc on peut déclarer que la stabilité du sol support au poinçonnement est assurée.

2- Vérification de la stabilité du sol support de remblai au poinçonnement en se basant sur les résultats de l'essai de compressibilité à l'œdomètre

Cette approche consiste à comparer la résistance au cisaillement non drainée du remblai « $C_{U(R)}$ » (déterminée par l'équation précédente ci-dessus) avec la résistance au cisaillement non drainée du sol support « $C_{U(SS)}$ » estimée par l'équation ci-dessous :

$$C_{U(\text{Sol support})} = 0.3 * \sigma'_{P(SS)}$$

$$\text{A.N : } C_{U(\text{Sol support})} = 0.3 * 350 = 105 \text{ kPa}$$

$$\text{Donc : } C_{U(\text{Sol support})} = 105 \text{ kPa ; on sait aussi que : } C_{U(\text{remblai})} = 92.7 \text{ kPa}$$

D'après le résultat obtenu, il est très clair que la condition « $C_{U(SS)} \geq C_{U(R)}$ » est vérifiée, donc on peut déclarer que la stabilité du sol support au poinçonnement est assurée.

3- Valeur minimale de la cohésion non drainée du sol support ($C_{U(SS)}$) de remblai pour que la stabilité au poinçonnement soit assurée pour un $F_S = 2$

Pour que la stabilité au poinçonnement du sol support soit assurée; il faut que ce dernier « sol support » doive avoir une cohésion non drainée « $C_{U(SS)} = 110 \text{ kPa}$ » supérieure ou égale à celle du remblai « $C_{U(R)}$ » calculée par l'équation ci-dessus :

$$\text{On a: } C_{U(\text{remblai})} = \frac{H_R * \gamma_R * F_S}{5.14 * J_C} ; J_C = 1 \text{ (car le remblai repose sur un terrain plat) et } F_S = 2.$$

$$\text{A.N: } C_{U(\text{remblai})} = \frac{13.5 * 20 * 2}{5.14 * 0.85} = 123.6 \text{ kPa}$$

$$\text{Donc : } C_{U(\text{remblai})} = 123.6 \text{ kPa}$$

Alors : pour que la stabilité au poinçonnement soit assurée; la valeur minimale de la cohésion non drainée du sol support ($C_{U(SS)}$) de remblai devrait être nettement supérieure à 123.6 kPa. Dans ce cas là, le sol support ne sera plus stable vis-à-vis le poinçonnement du fait que sa cohésion non drainée est nettement inférieure à 123.6 kPa.

II.2 Dimensionnement des structures de chaussées routières

Solution exercice 1 :

1- Trafic prévu T_H (ou $TJMA_{2035}$) pour une durée de vie de 20 ans

$$T_H = \dots ?$$

$$\text{On a : } T_H = \frac{T_0 \cdot (1 + r)^n}{2} ; TJMA_{2015} (T_0) = 8800 \text{ v/j et } r = 4\%$$

$$\text{A.N : } T_H = \frac{8800 \cdot (1 + 0.04)^{20}}{2} = 8085.62 \text{ v/j}$$

$$\text{Donc : } T_H = 8086 \text{ v/j}$$

2- Nombre moyen journalier (N) des véhicules supérieur à 1500 kg à l'année horizon (2035)

$$N = \dots ?$$

$$\text{On a : } N = T_H \cdot \%PL \text{ et } T_H = 8086 \text{ v/j}$$

$$\text{A.N : } N = 8086 \cdot 0.3 = 2425.8 \text{ PL/J/sens}$$

$$\text{Donc : } N = 2426 \text{ PL/J/sens}$$

3- Epaisseur totale du corps de chaussée et l'épaisseur réelle de la couche de fondation**a) Epaisseur totale du corps de chaussée**

$$e = \dots ?$$

$$\text{On a : } e = \frac{100 + (\sqrt{P}) \left(75 + 50 \log \frac{N}{10} \right)}{I_{CBR} + 5} ; I_{CBR} = 8.43 ; P = 6.5 \text{ et } N = 2426 \text{ PL/J/sens}$$

$$\text{A.N : } e = \frac{100 + (\sqrt{6.5}) \left(75 + 50 \log \frac{2426}{10} \right)}{8.43 + 5} = 44.37 \text{ cm}$$

$$\text{Donc : } e = 45 \text{ cm}$$

b) Epaisseur réelle de la couche de fondation

$$e_3 = \dots ?$$

$$\text{On a : } e = c_1 \cdot e_1 + c_2 \cdot e_2 + c_3 \cdot e_3 ; e_1 = 7 \text{ cm et } e_2 = 12 \text{ cm}$$

On a aussi les coefficients d'équivalence suivants :

$C_1 = 2$ pour la couche de surface car elle est réalisée avec des BB ;

$C_2 = 1$ pour la couche de base car elle est réalisée avec une grave concassée (GNT) ;

$C_3 = 0.85$ (on prend la moyenne) pour la couche de fondation car elle est réalisée avec des Tuf.

$$\text{A.N : } 45 = 2 \cdot 7 + 1 \cdot 12 + 0.85 \cdot e_3 = 22.35 \text{ cm}$$

$$\text{Donc : } e_3 = 23 \text{ cm}$$

Solution exercice 2 :

- Calculs et analyse des données et proposition de la structure de chaussée la plus adéquate selon les principes de la méthode du catalogue des chaussées neuves (CTTP)

a) Détermination de la classe du trafic

$$\text{Classe } TPL_i \dots ?$$

$$\text{On a : } TPL = \frac{T_0 \cdot \%PL}{2} ; \%PL = 0.3 ; T_0 \text{ (ou } TJMA_{2015}) = 8800 \text{ v/j}$$

$$\text{A.N : } TPL_{2015} = \frac{8800 \cdot 0.3}{2} = 1320 \text{ PL/J/sens}$$

Donc : $TPL = 1320 \text{ PL/J/sens}$

Il est clair que $TPL = 1320 \text{ PL/J/sens}$ est situé entre 600 et 1500 PL/J/sens, cela signifie qu'il s'agit de la classe TPL5 qui correspond au réseau principal 1 RP1.

b) Détermination de la classe du sol support

$EV_2 = \dots ?$

On a : $EV_2 = 5 \times I_{CBR}$ et $I_{CBR} = 8.43$.

A.N : $EV_2 = 5 \times 8.43 = 42.15 \text{ MPa}$

Donc : $EV_2 = 42.15 \text{ MPa}$

Alors : le sol support de la chaussée est classé comme : « S₃ »

c) Zone climatique du projet routier

Le projet routier sera réalisé dans la Wilaya d'El-Bayadh et selon la carte climatique de l'Algérie, cette dernière se trouve dans la région des hauts plateaux (climat semi-aride), ce qui correspond à la zone climatique III avec une pluviométrie variant de 100 à 350 mm/an et une température équivalente de 25°C.

d) Analyse des résultats

Par conséquent, selon les fiches structures pour le RP1, on obtient la structure suivante : 7cm BB + 20cm GB + 30cm Tuf + 40cm TVO (en deux couches).

Solution exercice 2 :

- Calculs et analyse des données et proposition de la structure de chaussée la plus adéquate selon les principes de la méthode SETRA

a) Calcul du trafic poids lourds à l'année de mise en service TPL_{2015}

$T_c = \dots ?$

On détermine d'abord : $TJMA_{2015} = \dots ?$ et $TJMA_{2035} = \dots ?$

On a : $TPL = \frac{8800 \times 0.3}{2}$; %PL = 0.3 ; T_0 (ou $TJMA_{2015}$) = 8800 v/j

A.N : $TPL_{2015} = \frac{8800 \times 0.3}{2} = 1320 \text{ PL/J/sens}$

Donc : $TPL = 1320 \text{ PL/J/sens}$

On a aussi : $TPL_{2035} = TPL_{2015} \times (1 + \tau)^n$

A.N : $TPL_{2035} = 1320 \times (1 + 0.04)^{20} = 2892.28 \text{ PL/J/sens}$

Donc : $TPL_{2035} = 2893 \text{ PL/J/sens}$

D'autre part on a : $T_c = TPL \left[1 + \frac{(1+\tau)^{n+1} - 1}{\tau} \right] 365$

A.N : $T_c = 2893 \left[1 + \frac{(1+0.04)^{20+1} - 1}{0.04} \right] 365 = 1.9 \times 10^8 \text{ PL/J/sens}$

Donc : $T_c = 1.9 \times 10^8 \text{ PL/J/sens}$, cela signifie que le trafic est classé en T₅.

b) Détermination de la classe du sol support

On a : $I_{CBR} = 8.43$, cela signifie que le sol support de la chaussée est classé en S₃.

c) Analyse des résultats

Par conséquent, en se basant sur les deux classes T₅ et S₃ et selon le règlement B60-61, on obtient la structure suivante : 8cm BB + 20cm GB + 40cm TUF (en deux couches).

CONCLUSION GENERALE

Ce livre offre une exploration approfondie et complète du domaine des routes et des chaussées routières. À travers les différents chapitres, nous avons examiné en détail le trafic routier, la géométrie et le terrassement des routes, les types de chaussées ainsi que les matériaux et les méthodes de dimensionnement.

Nous avons également étudié le comportement des chaussées routières, les processus de dégradation et les causes qui peuvent influencer leur durabilité et leur performance. Cette analyse approfondie nous a permis de mieux comprendre les défis auxquels sont confrontées les routes et les chaussées, et d'explorer les solutions possibles pour les préserver et les améliorer.

De plus, ce livre propose une approche pratique en offrant des exercices et des applications concrètes, accompagnés de leurs solutions. Ces exercices permettent aux lecteurs de mettre en pratique les connaissances acquises et d'approfondir leur compréhension des concepts présentés.

En parcourant cet ouvrage, les lecteurs ont pu acquérir une vision globale du domaine des routes et des chaussées routières, ainsi qu'une solide base de connaissances techniques. Qu'il s'agisse d'étudiants en génie géotechnique, de professionnels du domaine ou de toute personne intéressée par les infrastructures routières, ce livre vise à fournir les outils nécessaires pour comprendre, concevoir et maintenir des chaussées routières durables et efficaces.

En conclusion, nous espérons que ce livre a répondu aux attentes des lecteurs et qu'il leur a apporté une compréhension approfondie des aspects clés liés au trafic routier, à la géométrie et au terrassement des routes, aux types de chaussées, aux matériaux et méthodes de dimensionnement, ainsi qu'au comportement, aux processus et aux causes de dégradation des chaussées routières. Que ce livre serve de référence précieuse et d'outil pratique pour tous ceux qui souhaitent s'engager dans le domaine des infrastructures routières ou approfondir leurs connaissances existantes.

En outre, il est important de mentionner que ce livre est le premier volet d'une série qui couvrira de manière exhaustive le domaine des routes et des chaussées routières. La suite de ce livre explorera les essais routiers de laboratoire et in-situ réalisés sur sols et bétons bitumineux, les méthodes d'évaluation des dégradations ainsi que les méthodes de formulation des bétons bitumineux.

Le prochain volet de cette série offrira une perspective approfondie sur les essais réalisés en laboratoire et sur le terrain, visant à évaluer les propriétés des matériaux utilisés dans la construction des chaussées routières. Nous examinerons les différentes techniques et normes utilisées pour tester la résistance, la durabilité et la performance des matériaux, afin de garantir la qualité des chaussées.

De plus, nous aborderons les méthodes d'évaluation des dégradations des chaussées routières, en mettant l'accent sur les techniques de surveillance, les inspections visuelles et les méthodes de diagnostic. Nous explorerons les outils et les technologies utilisés pour évaluer l'état des chaussées, détecter les dommages et prendre des mesures correctives appropriées.

Enfin, nous nous pencherons sur les méthodes de formulation des bétons bitumineux, qui constituent l'un des éléments clés dans la construction des chaussées. Nous étudierons les propriétés des différents constituants, les techniques de mélange et les procédures de fabrication pour obtenir des bétons bitumineux performants et durables.

La publication de cette suite permettra aux lecteurs de poursuivre leur apprentissage et d'approfondir leur expertise dans le domaine des routes et des chaussées routières. Ils pourront ainsi acquérir une compréhension globale des essais, des évaluations et des méthodes de formulation essentielles pour concevoir, construire et entretenir des infrastructures routières de haute qualité.

Nous espérons que cette série de livres continuera à fournir des connaissances approfondies, des perspectives pratiques et des outils précieux pour les professionnels, les chercheurs et les étudiants intéressés par le domaine des routes et des chaussées routières.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Alloul, B. (1981).** Étude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux en vue de leur valorisation en technique routière. Thèse de Doctorat, Université Paris IV.
2. **Asphalt Institute (1997).** Mix Design Methods. Manual Series No.2 (MS-02). Asphalt Institute, Lexington, KY.
3. **Asphalt Institute (2001).** Superpave Mix Design. Superpave Series No.2 (SP-02). Asphalt Institute, Lexington, KY.
4. **ASTM D4318 (2000).** Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils. Annual book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, USA, 04:08, doi: 10.1520/D4318.
5. **ASTM D698 (2000).** Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort. Annual book of ASTM Standards, American Society of Testing and Materials, USA, 04:08.
6. **Atterberg, A. (1911).** The behaviour of clays with water, their limits of plasticity and their degrees of plasticity. Internationale Mitteilungen fur Bodenkunde, vol. 1, p. 10–43.
7. **BLPC (1998).** Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées.
8. **Bonaquist R.F., Christensen D.W., Stump W. (2003).** Simple performance tester for Superpave mix design: first article development and evaluation. NCHRP report 513, Washington D.C.
9. **CEBTP-LCPC (1985).** Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux. République Française, Ministère des relations extérieures coopération et développement, 166p.
10. **Centre de Recherches Routières, CRR (1987).** Code de bonne pratique pour la formulation des enrobes bitumineux denses. Recommandations C.R.R. – R 61/87.
11. **Centre de Recherches Routières, CRR (1997).** Code de bonne pratique pour la formulation des enrobes bitumineux denses. Recommandations C.R.R. – R 69/97.
12. **Coquand, R. (1969).** Routes-Vol. 1: Circulation-trace-construction; Vol. 2: Construction et entretien. Paris: Eyrolles. Pp. 285.
13. **Costet, J and Sanglerat, G. (1983).** Cours pratique de mécanique des sols. 4ème trimestre: Dunod, Pp. 442.
14. **CTTP (1995).** Guide de l'entretien routier. Contrôle technique des travaux publics, Algérie.
15. **CTTP (1996).** Guide de réhabilitation des routes. Contrôle technique des travaux publics, Fascicule 01, Algérie.
16. **CTTP (2000).** Recommandation algérienne sur l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux à chaud.
17. **EN 933-2 (2020).** Tests for geometrical properties of aggregates - Part 2: Determination of particle size distribution - Test sieves, nominal size of apertures.
18. **EN 933-8 (1999).** Tests for geometrical properties of aggregates — Part 8: Assessment of fines — Sand equivalent test, Directive 89/106/EEC, corpus technique CEN/TC. p. 154.

19. **Fascicule 3 (2015)**. Catalogue de dimensionnement des Chaussées Neuves Fascicule3 Fiches Techniques de Dimensionnement. Pp. 68-73.
20. **Gadouri, H, Harichane, K, and Ghrici, M. (2019)**. Effect of sulphates and curing period on stress-strain curves and failure modes of soil-lime-natural pozzolana mixtures. *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(9), 1130-1148.
21. **Joeffroy, G. and Sauterey, R. (1991)**. Dimensionnement des chaussées. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Pp. 173-174.
22. **Joubert, P et al. (2006)**. Application du modèle GiRR pour la programmation de travaux d'entretien au Monténégro. Laboratoire central des ponts et chaussées (LCPC), Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, (BLPC). n°265, Pp. 61-87.
23. **LCPC (1991)**. La méthode VIZIR : Méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LPCP), Paris, Pp. 63.
24. **LCPC-GTR (2000)**. Réalisation des remblais et de couches de forme. Fascicule 1, Principes généraux, Cerema, France.
25. **LCPC-IFSTTAR (1998)**. Catalogue des dégradations de surface des chaussées. Institut Français des sciences et techniques des réseaux, de l'Aménagement et des transports (IFSTTAR). Laboratoire centrale des ponts et chaussées (LCPC), n° 58, Boulevard Lefebvre-75732, Paris, CEDEX 15.
26. **LCPC-SETRA (1985)**. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en sables traités aux liants hydrauliques. Paris : Bagnex, France.
27. **LCPC-SETRA (1998)**. Catalogue des structures types de chaussées neuves. Paris : ministres de l'équipement des transports et du logement ; Bagnex, Pp. 297.
28. **LCPC-SETRA (2000)**. Guide des terrassements routiers : Réalisation des remblais et des couches de forme. Guide technique, France.
29. **LCPC-VIZIR (1991)**. Méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier, 64p.
30. **MTQ-AIMQ (2002)**. Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples (MIDCS). Ministère des transports de Québec (MTQ), Association des ingénieurs municipaux du Québec (AIMQ), Pp. 58, Québec, Canada.
31. **NF EN 933-8 (1999)**. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats – Partie 8 : Évaluation des fines — Équivalent de sable, Paris, Association Française de Normalisation (AFNOR). remplace les normes expérimentales françaises P. 18-597, P. 18-598.
32. **NF P 15-301 (2015)**. Liants hydrauliques - Définition - Classification et spécifications des ciments.
33. **NF P 94-093 (2014)**. Sols : reconnaissance et essais — Détermination des caractéristiques de compactage d'un sol par l'essai Proctor normal et Proctor modifié.
34. **NF P 98-253-1 (1991)**. Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés, partie 1 : Essai d'orniérage. p. 11, France.
35. **NF P94-051 (1993)**. Sols : Reconnaissance et essais - Détermination des limites d'Atterberg - Limite de liquidité à la coupelle - Limite de plasticité au rouleau.
36. **Norme Suisse VSS SN 640 925a (1997)**. Relevé et évaluation de l'état des routes. Suisse.
37. **NTAR-B40 (1977)**. Normes technique d'aménagement des routes (NTAR) : Etudes générales techniques et économiques des aménagements routiers. Niveau de service et normes, Ministre des Travaux Publics, Algérie. <https://genieciviletravauxpublics.blogspot.com/2012/09/normes-techniques-algerienne-b-40.html>.

38. **Perret J., Dumont A.-G., Turtzschy J.-C., Ould-Henia M., (2001).** Evaluation des performances de nouveaux revêtements : 1^{ère} partie : enrobés à haut module. Rapport OFROU n° 1000.
39. **WesTrack Forensic Team Consensus Report “WTFTCR” (2001).** Superpave mixture design guide. Washington D.C.
40. **XP P 18-540 (1997).** Granulats : Définitions, conformité et spécifications. AFNOR, P 18-540, ICS:91.100.20, France.

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**More
Books!**

yes
I want morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at
www.morebooks.shop

Achetez vos livres en ligne, vite et bien, sur l'une des librairies en ligne les plus performantes au monde!

En protégeant nos ressources et notre environnement grâce à l'impression à la demande.

La librairie en ligne pour acheter plus vite
www.morebooks.shop



info@omniscryptum.com
www.omniscryptum.com

OMNIScriptum



FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY