

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Civil

Laboratoire de Génie Sismique et de Dynamique des Structures



# Thèse de Magister en Génie Civil Option : Structures

Présentée par :  
**TCHAMAKDJI Mounir**  
Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'E.N.P

Intitulée

**Comportement non-linéaire des chaussées  
souples et effets des conditions d'interface :  
Application à la construction routière en Algérie**

Soutenu publiquement le **28/05/2012** devant le jury composé de :

<b>Président :</b>	<i>Mr. M. BOUABDALLAH</i>	<i>Professeur,</i>	<i>ENP</i>
<b>Directeur de Thèse :</b>	<i>Mr. B. TILIOUINE</i>	<i>Professeur,</i>	<i>ENP</i>
<b>Examineurs :</b>	<i>Mr. M. HAMMOUTENE</i>	<i>Professeur,</i>	<i>ENP</i>
	<i>Mr. A. BELAKROUF</i>	<i>M.C.A,</i>	<i>UMBB</i>
<b>Invités :</b>	<i>Mr. A. BOUDJELLALI</i>	<i>Expert,</i>	<i>CTTP</i>
	<i>Mr. A. FAHAM</i>	<i>Expert,</i>	<i>CTTP</i>

**ENP 2012**

## ملخص

يهدف البحث التالي تحقيق ثلاث أهداف رئيسية. الأول هو نموذج تقريبي للسلوك الميكانيكي اللاخطي للمواد المحلية المشكّلة من الحصى غير المعالجة و إدماج حساب خطي مكافئ من أجل تحليل وتشكيل الطرق المرنة السائدة بالجزائر، أما الهدف الثاني فيتعلق بمدى حساسية معايير التشكيل مع تغير خصائص الطرق المرنة، بينما الهدف الأخير فيكمن في البحث عن سلوك هياكل الطرق المرنة على مستوى التماس لمختلف الطبقات المشكّلة لهذه الطرق.

إن تطبيق نموذج خطي مكافئ يعطي قيم لمعايير التشكيل أكبر (وبالتالي عمر اصغر) وهذا مقارنة مع النموذج الخطي مستقلا عن شروط التماس في مختلف الطبقات المكونة. وبالمقابل مكنتنا هذه الدراسة من إدراك أهمية الخصائص الميكانيكية للمواد المحلية المشكّلة لهياكل الطرق وكذلك استعمالها في إطار منهجية التشكيل التدريجي للطرق حتى يتسنى لنا تخفيض كلفة انجاز الطرق.

مفاتيح : الطرق المرنة، لا خطي، شروط التماس.

## Résumé

La présente recherche vise trois objectifs principaux. Le premier consiste à modéliser le comportement mécanique non-linéaire des matériaux locaux Granulaires Non-Traités et à introduire un calcul linéaire équivalent en vue de l'analyse et du dimensionnement des chaussées souples utilisées en construction routière en Algérie. Le deuxième objectif a trait à une investigation de la sensibilité des critères de dimensionnement aux variations des caractéristiques des chaussées souples. Enfin, le dernier objectif vise à mieux appréhender l'effet des conditions d'interface sur le comportement et la durée de vie des structures de chaussées souples.

L'application d'un modèle linéaire équivalent conduit à des valeurs de critères de dimensionnement supérieures (et par suite des durées de vie inférieures) à celles fournies par le modèle linéaire, indépendamment des conditions d'interface des couches constitutives. En outre, cette étude a permis de souligner l'importance qu'il convient d'accorder à une meilleure connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux locaux constitutifs des corps de chaussées, ainsi que leur utilisation dans le cadre d'une méthodologie de dimensionnement rationnel des chaussées, ce qui devrait permettre de réduire de façon substantielle le coût de construction des routes.

Mots clés : chaussées souples, non linéaire, conditions d'interface

## Abstract

The present research work has three main objectives. The first is to model the nonlinear mechanical behavior of local Unbound Granular Materials and to introduce an equivalent linear calculation for the analysis and design of flexible pavements used in road construction in Algeria. The second objective relates to a sensitivity investigation of the design criteria to the variations of the mechanical properties in flexible pavements. The last objective is to better understand the effects of interface conditions on the structural behavior and design life of flexible pavements. The application of the equivalent linear model leads to values of design criteria greater (and hence to lower design life) than those provided by the linear model regardless of the interface conditions of the constitutive layers. Furthermore, this study has highlighted the importance of a better knowledge of the mechanical properties of local materials used as base and subbase- layers, and to their utilisation as part of a rational design methodology of pavement structures, which should make it possible to reduce substantially the cost of road construction.

Key words: flexible pavements, nonlinear, interface conditions.

# REMERCIEMENTS

---

*Nos remerciements s'adressent tout d'abord au **BON DIEU** qui nous a permis d'accomplir ce modeste travail. Par la suite, ils s'adressent à Monsieur professeur **Boualem TILIOUINE** notre président de thèse et monsieur **SANDJAK Khaled** notre Co-encadreur à l'Ecole Nationale Polytechnique. Tout au long de ce travail, ils ont su nous apporter un soutien constant, une disponibilité, une écoute, une confiance et des conseils précieux et avisés à la hauteur de leurs compétences et de leurs qualités humaines.*

*Enfin, nos remerciements s'adressent aussi aux enseignants et aux personnels de l'Ecole Nationale Polytechnique.*

**Mounir TCHAMAKDJI**

## DEDICACES

---

*Je dédie ce travail à :*

*Mes chers parents ;*

*Ma petite famille ;*

*Mes frères et sœurs (notamment Ahmed) ;*

*Toute ma famille ;*

*Mes amis.*

***Mounir***

## Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE INTRODUCTIF.....	3
Introduction.....	3
PARTIE 1.....	3
1. Constitution des structures de chaussée.....	6
2. Différents types de structures de chaussée.....	4
3. Méthode de dimensionnement des structures de chaussée.....	5
3.1. L'approche empirique.....	6
3.2. L'approche théorique.....	10
4. Les modèles de la mécanique des chaussées.....	11
4.1. Le modèle monocouche de Boussinesq (1885).....	11
4.2. Les Modèles bicouches.....	12
4.3. Modèle de WESTERGAARD (1927).....	13
4.4. Modèle de HOGG(1938).....	14
4.5. Modèle multicouche de Burmister.....	14
5. Modèles numériques.....	15
PARTIE 2.....	16
1. Les chaussées souples.....	16
2. Caractéristiques des chaussées souples.....	17
3. Critères de dimensionnement des chaussées souples.....	17
3.1. Hypothèse d'élasticité.....	17
3.2. Fatigue des matériaux.....	18
4. Paramètre de dimensionnement des chaussées souple.....	18
4.1. Matériaux de chaussée souple.....	19
4.2. Le trafic.....	21
Conclusion.....	23

CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE .....	24
Introduction .....	24
1. Constitution des structures de chaussée.....	24
1.1. Constitution du réseau routier national .....	24
1.2. Choix du niveau de réseau principal .....	24
1.3. Choix des structures types par niveau de réseau principal.....	25
2. Détermination de la classe de trafic (TPLi).....	26
2.1. Définition du poids lourd .....	26
2.2. Répartition transversale du trafic .....	26
2.3. Détermination de la classe de trafic (TPLi) .....	26
3. Détermination de la portance de sol-support de chaussée.....	27
3.1. Détermination des classes de portance des sols .....	27
3.2. Détermination de la classe de portance de sol-support de chaussée .....	28
4. Choix de la couche de roulement .....	31
5. Options retenues par le maitre de l’ouvrage.....	32
6. Données d’entrées du dimensionnement .....	32
6.1. Durée de vie .....	32
6.2. Risque de calcul .....	33
6.3. Données climatiques .....	34
6.4. Trafic.....	33
6.5. Sol-support.....	38
6.6. Conditions aux interfaces.....	39
6.7. Matériaux .....	39
7. Présentation des matériaux utilisés dans la structure de chaussée.....	44
7.1. Matériaux traités aux bitumes .....	44
7.2. Matériaux traités aux liants hydrauliques .....	46
7.3. Matériaux non traités .....	50
8. Présentation des matériaux utilisés dans la structure de chaussée.....	54
CHAPITRE III : MODELISATIONS DES STRUCTURES DES CHAUSSEES.....	57
Introduction .....	57
1. Calcul linéaire.....	57
1.1. Structure et fonctionnalités du logiciel .....	57
1.2. Démarche générale du dimensionnement rationnel des chaussées .....	60
1.3. Principe de modélisation de la structure de chaussée .....	64

2. Calcul linéaire équivalent .....	66
2.1. Comportement non linéaire des graves non traitées GNT .....	66
2.2. Calcul linéaire et linéaire équivalent des chaussées souples .....	70
CHAPITRE IV : ETUDE PARAMETRIQUE.....	74
Introduction .....	74
1. Structures de chaussées souples analysées .....	74
2. Caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs .....	75
3. Investigations numériques .....	76
4. Résultats et discussions .....	76
CHAPITRE V : EFFETS DES CONDITIONS D'INTERFACE SUR LE COMPORTEMENT DES STRUCTURES DES CHAUSSES SOUPLES .....	79
Introduction .....	79
1. Caractéristique des matériaux des structures de chaussées .....	79
2. Résultats numériques et discussion .....	80
Conclusion.....	83
Conclusion générale. ....	84

# Liste des Figures

Figure N°1-1 : <i>Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches</i> .....	4
Figure N°1-2 : <i>Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq</i> .....	11
Figure N°1-3 : <i>Modèle bicouche</i> .....	13
Figure N°1-4 : <i>schéma du modèle de Westergaad</i> .....	13
Figure N°1-5 : <i>schéma du modèle de Hogg</i> .....	14
Figure N°1-6 : <i>Schéma du modèle de Burmister</i> .....	15
Figure N°1-7 : <i>Déformations prises en compte pour le dimensionnement des chaussées souples</i> .....	16
Figure N°2-1 : <i>détermination de la classe de portance de sol-support</i> .....	30
Figure N°2-2 : <i>Action de contraintes sur une éprouvette</i> .....	55
Figure N°2-3 : <i>Cellule triaxiale de l'appareil TCR d'après Hornych</i> .....	56
Figure N°3-1 : <i>Illustration d'un modèle type de calcul</i> .....	59
Figure N°3-2 : <i>Démarche générale du dimensionnement mécanique</i> .....	63
Figure N°3-3 : <i>Variation de la pression moyenne en fonction de l'épaisseur de la couche de roulement</i> .....	72
Figure N°4-1 : <i>Modèle de structure de chaussée analysée</i> .....	75
Figure N°5-1 : <i>Durée de vie (hypothèse de ruine par orniérage) obtenue pour les deux modèles du calcul pour différentes conditions d'interface</i> .....	82
Figure N°5-2 : <i>Durée de vie (hypothèse de ruine dans le cas de fissuration par fatigue) obtenue pour les deux modèles du calcul pour différentes conditions d'interface</i> .....	82
Figure N°5-3 : <i>Durée de vie de calcul obtenue pour les deux modèles de calcul pour différentes conditions d'interface.</i> .....	82

## Liste des Tableaux

Tableau N°1-1 : Principales structures types de chaussée.....	5
Tableau N°1-2 : Méthodes de dimensionnement : types d'essieu standard et performance du support. ....	9
Tableau N°1-3 : Méthodes de dimensionnement : performance mécanique des couches de chaussée.....	10
Tableau N°1-4 : Composition des mélanges bétons bitumineux et enrobés denses .....	20
Tableau N°2-1 : Structures types disponibles dans le dimensionnement .....	25
Tableau N°2-2 : Classes de trafic $TPL_i$ adoptées .....	26
Tableau N°2-3 : Classes de portance des sols $S_i$ .....	27
Tableau N°2-4 : plage de portance probable des sols.....	27
Tableau N°2-5 : classes de portance de sol-support .....	29
Tableau N°2-6 : sur classement avec couche de forme en matériau non traité .....	30
Tableau N°2-7 : sur classement avec couche de forme en sols fins traités à la chaux.....	31
Tableau N°2-8 : durée de vie adoptée .....	33
Tableau N°2-9 : risques adoptés pour le réseau RP1.....	34
Tableau N°2-10 : risque adoptés pour le réseau RP2 .....	34
Tableau N°2-11 : zones climatiques de pluviométrie .....	35
Tableau N°2-12 : choix des températures équivalentes.....	35
Tableau N°2-13 : valeurs du facteur de cumul $C$ .....	37
Tableau N°2-14 : valeurs du coefficient d'agressivité $A$ .....	37
Tableau N°2-15 : classes de portance à long terme du sol-support.....	38
Tableau N°2-16 : synthèses des hypothèses sur les conditions de collage.....	39
Tableau N°2-17 : performances mécaniques des matériaux bitumineux .....	40

Tableau N°2-18 : <i>Performances mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques</i> .....	40
Tableau N°2-19 : <i>performances mécaniques des matériaux non traités</i> .....	40
Tableau N°2-20 : <i>quelques valeurs de <math>t=f(r\%)</math></i> .....	42
Tableau N°2-21 : <i>spécifications des granulats</i> .....	44
Tableau N°3-1 : <i>Définitions de <math>S_{maxj}</math> par rapport les différentes natures des matériaux</i> .....	60
Tableau N°3-2 : <i>Valeurs des paramètres de dimensionnement (hypothèse linéaire)</i> .....	71
Tableau N°3-3 : <i>Modules de rigidité et coefficient de Poisson proposés pour un calcul linéaire équivalent (pour une épaisseur de couche bitumineuse égale à 6cm)</i> . ....	72
Tableau N°3-4 : <i>Valeurs des paramètres de dimensionnement pour un calcul non linéaire équivalent</i> .....	73
Tableau N°3-5 : <i>Comparaison des résultats entre les deux modèles de calcul (linéaire et non linéaire-équivalent)</i> .....	73
Tableau N°4-1 : <i>Principaux résultats de l'étude paramétrique</i> .....	77
Tableau N°5-1 : <i>Caractéristiques mécaniques des matériaux de la structure de chaussée</i> .....	79
Tableau N°5-2 : <i>les différents cas de conditions d'interfaces</i> .....	74
Tableau N°5-3 : <i>résultats des différents cas de conditions d'interfaces pour un calcul linéaire</i> .....	81
Tableau N°5-4 : <i>résultats des différents cas de conditions d'interfaces pour un calcul linéaire-équivalent</i> .....	81

## **Introduction générale :**

Le développement des infrastructures routières revêt un caractère économique et stratégique important. En Algérie, le réseau national, à l'instar de nombreux réseaux routiers dans le monde, est constitué principalement de structures de chaussées souples. Des statistiques récentes révèlent que pratiquement seule la moitié du réseau routier national revêtu présente un état relativement satisfaisant. La nécessité de remédier aux insuffisances structurelles de ce réseau d'une part, et l'importance de la route en tant que mode de transport dominant d'autre part, soulignent le degré d'urgence qu'il convient d'accorder au développement des méthodes modernes de caractérisation des matériaux locaux et d'analyse du comportement des structures de chaussées [24].

Dans l'analyse et le dimensionnement des structures de chaussées souples, on utilise des modèles avec des degrés de sophistication variés [16, 20, 26, 28]. L'approche simple la plus souvent utilisée, est l'analyse élastique linéaire des systèmes multicouches [4, 8, 25]. Cette méthode est bien adaptée à l'étude des structures comportant des matériaux d'assise rigide, c'est à dire des matériaux dont le comportement peut être considéré comme élastique et linéaire. Il est toutefois important de noter que des écarts importants ont été relevés entre les déformations observées et celles calculées dans les structures de chaussées souples faisant appel à des matériaux non traités. Tel est le cas des graves non-traitées (GNT). Ces désaccords sont imputés au fait que les caractéristiques mécaniques des matériaux non liés dépendent de l'état de contrainte dans la structure de chaussée, et qu'ils ont par voie de conséquence un comportement non linéaire [16, 22, 27].

Divers modèles ont été développés pour modéliser le comportement réversible non-linéaire des matériaux granulaires constituant le corps de chaussée dans une structure de chaussées souples, mais le modèle le plus efficace demeure le modèle de Boyce. Il présente l'avantage d'être en accord avec les résultats d'essais réalisés à l'aide de l'appareil triaxial à chargements répétés et offre un compromis satisfaisant entre simplicité et précision dans la modélisation. En outre la production sans cesse croissante d'ordinateurs de plus en plus performants conjuguée à une amélioration continue de la connaissance des propriétés mécaniques des matériaux a induit un besoin pressant pour le développement de codes de calcul d'analyse non-linéaire par éléments finis et de dimensionnement rationnel des chaussées souples

Dans ce cadre, la présente recherche vise trois objectifs principaux. Le premier consiste à modéliser le comportement mécanique non-linéaire des matériaux locaux Granulaires Non-Traités et à introduire un calcul linéaire équivalent en vue de l'analyse et du dimensionnement des chaussées souples utilisées en construction routière en Algérie. Le deuxième objectif a trait à une investigation de la sensibilité des critères de dimensionnement aux variations des caractéristiques des chaussées souples. Enfin, le dernier objectif vise à mieux appréhender l'effet des conditions d'interface sur le comportement et la durée de vie des structures de chaussées souples

A cet effet, nous présentons dans ce qui suit, dans une première phase, une étude analytique du comportement mécanique non linéaire des graves non-traitées basée sur l'utilisation du modèle non-linéaire de Boyce dont les paramètres sont déterminés au préalable à partir d'essais de mesure réalisés à l'aide de l'appareil triaxial à chargements répétés de l'organisme national du contrôle des travaux publics(CTTP).Un calcul non linéaire équivalent est introduit en vue de l'analyse et du dimensionnement des chaussées souples constituées d'assises de base et de fondations en matériaux granulaires locaux couramment utilisés en construction routière en Algérie. Une abaque de calcul est également développé à cet effet.

Dans une deuxième phase, une étude de la sensibilité des critères de dimensionnement aux variations possibles des caractéristiques des couches de chaussées souples (notamment épaisseurs de la couche bitumineuse, des couches granulaires et de leurs rigidités) est examinée. Plusieurs investigations numériques ont été effectuées sur une structure de chaussée type constituée de couches d'assises granulaires à base de matériaux locaux. Deux modèles de comportement mécaniques des matériaux granulaires sont utilisés.

Enfin, dans une troisième phase, l'influence des conditions d'interface sur les critères de dimensionnement et la performance structurale des chaussées (performance vis-à-vis des phénomènes de fatigue des matériaux et à l'orniérage) est examinée en considérant aussi bien un comportement linéaire que non linéaire des matériaux locaux.

Enfin des conclusions et des recommandations d'intérêt pratique pour la profession sont formulées.

## CHAPITRE INTRODUCTIF

### Introduction

Ce chapitre introductif sera consacré essentiellement, d'une part, pour la constitution des chaussées ainsi que les différents types de structure. Ensuite des méthodes de dimensionnement empiriques sont alors dressées avant de donner un historique sommaire des modèles de mécanique de chaussées. Et pour les structures de chaussées souples, leurs caractéristiques et les critères de dimensionnement d'autre part.

### PARTIE 1 :

#### 1. Constitution des structures de chaussée

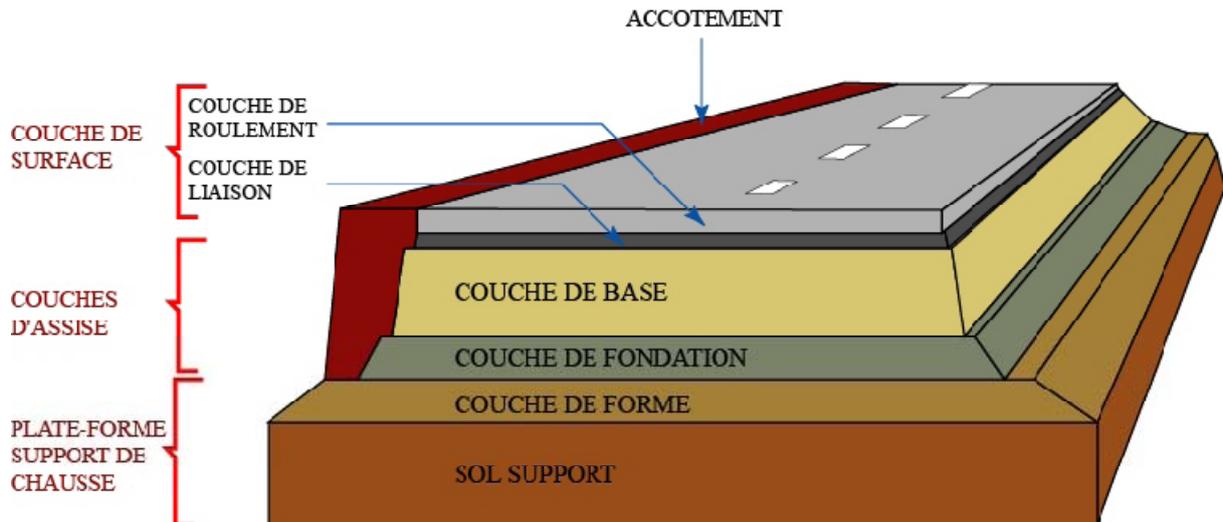
Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support (Figure 1.1).

Vis-à-vis de la description adoptée par la méthode de dimensionnement française, établie par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et le Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA), on associe à chacune des couches une fonction [29].

**Le sol support** : est généralement surmonté d'une *couche de forme* pour former un ensemble appelé *plate-forme support de chaussée*. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée. Pendant la phase de travaux, la couche de forme a pour rôle d'assurer une qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour la réalisation du corps de chaussée. Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, la couche de forme permet d'augmenter la capacité portante de la plate-forme support de chaussée.

**Les couches d'assise** : sont généralement constituées d'une *couche de fondation* surmontée d'une *couche de base*. Elles apportent à la structure de chaussée l'essentiel de sa rigidité et répartissent (par diffusion latérale) les sollicitations, induites par le trafic, sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

**La couche de surface** : est formée d'une *couche de roulement* surmontant éventuellement une *couche de liaison* intermédiaire. La couche de roulement assure la fonction d'étanchéité des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau ; et à travers ses caractéristiques de surface, elle garantit la sécurité et le confort des usagers [2,3].



**Figure 1.1 :** Coupe type d'une structure de chaussée et terminologie des différentes couches

Suivant la nature des matériaux, leur localisation dans la structure de chaussée et le niveau de trafic, on répertorie différents types de structures que l'on présente dans le paragraphe suivant.

## 2. Différents types de structures de chaussée

Il existe une grande diversité de chaussées. Ainsi, le choix d'un type de chaussée peut être fonction de la durée de vie de la route, des sollicitations auxquelles la dite chaussée sera soumise après mise en service, et/ou coût de réalisation. Il paraît utile de faire la distinction entre les différentes natures des structures de chaussées que l'on peut classer en deux principaux groupes:

- Les assises non traitées constituées de matériaux à granulométrie continue appelés graves.
- Les assises traitées pour lesquelles la granulométrie des matériaux est également continue mais dans lesquelles pour améliorer la stabilité et la résistance mécanique, on ajoute un liant soit hydraulique, soit hydrocarboné.

Selon le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) on peut distinguer plusieurs types de structures de chaussée. Une présentation sommaire des principales structures types est donnée dans le Tableau 1.1. Pour chaque type de structure, des exemples sont donnés dans le guide technique sur la conception et le dimensionnement des structures de chaussée [2], ainsi que dans le catalogue des structures types de chaussées neuves [11].

**Tableau 1.1** : Principales structures types de chaussée

Structures types	Nature des couches			Commentaires
	Surface	Base	Fondation	
<b>Souples</b>	Bitumineuse	Graves Non Traitées(GNT)		Epaisseur totale de la structure comprise entre 300 et 600 mm
<b>Bitumineuses épaisses</b>	Matériaux bitumineux			Epaisseur des couches d'assise comprise entre 150 et 400 mm
<b>Semi-rigides</b>	Bitumineuse	MTLH		Epaisseur des couches d'assise comprise entre 200 et 500 mm
<b>Rigides</b>	Béton de ciment (150 à 400 mm d'épaisseur)	- soit en MTLH - soit en GNT - soit bitumineuse		Couche de forme en MTLH Dispositions particulières (dalle goujonnées ou non, béton armé continu, etc.) afin d'assurer une continuité mécanique au franchissement d'une fissure due au retrait du béton
<b>Mixtes</b>	Matériaux bitumineux	MTLH		Rapport de 0,5 entre l'épaisseur de matériaux bitumineux et celle de la structure de chaussée
<b>Inverses</b>	Bitumineuse	GNT	MTLH	Epaisseur de la GNT (environ 120 mm)

Outre les principales structures types de chaussée présentées au Tableau 1.1, on trouve *les* chaussées à structure composite. Elles sont récentes (début des années 1990), innovantes et offrent un bon compromis entre qualité technique et économie en combinant la durabilité des bétons de ciment avec la souplesse et la capacité d'adaptation des matériaux bitumineux. Deux types de structures sont proposés : le béton de ciment mince collé, qui représente une technique d'entretien superficiel des structures bitumineuses, et le béton armé continu sur une couche bitumineuse de type grave bitume.

La conception d'une structure de chaussée passe par un problème d'optimisation technique et économique dont la recette diffère suivant le pays. Dans ce qui va suivre, nous nous intéressons à la présentation des méthodes de dimensionnement de structures de chaussée.

### 3. Méthode de dimensionnement des structures de chaussée

#### Introduction

Sous l'effet des sollicitations externes (environnementales, conditions de chargements, etc.), les structures de chaussées sont soumises à des phénomènes complexes (mécaniques, thermiques, physiques et chimiques) qui apparaissent souvent de manière couplée.

Le but de dimensionnement des chaussées est de concevoir une structure capable de supporter un trafic pour une durée de vie fixée. Plusieurs approches ont été développées à cet effet, à savoir : l'approche empirique et l'approche théorique [29].

### **3.2. L'approche empirique**

Devant la complexité des problèmes observés, les méthodes de dimensionnement développées sont basées sur des règles empiriques tirées de l'observation du comportement en service des structures de chaussée ou de sections expérimentales. Cette méthode présente des limites qui sont d'autant plus visibles que de nouveaux types de structures et des matériaux plus performants se développent et que le trafic est en constante augmentation. Un développement de méthodes de dimensionnement plus rationnelles apparaît donc nécessaire. Cette nécessité a conduit au développement et à l'application dès les années 1970 de la méthode rationnelle française, et plus récemment, le développement aux Etats-Unis dans le cadre du programme SHRP (*Strategic Highway Research Program* 1988-1993, poursuivi après 1996), de la méthode « Superpave » et la mise en place du guide de dimensionnement AASHTO 2002. On présente ci-après les concepts des méthodes de dimensionnement des structures de chaussées adoptées en France, aux Etats-Unis et au Royaume-Uni.

Les principales sollicitations auxquelles sont soumises les structures routières sont liées aux contraintes imposées par le passage des véhicules et aux effets engendrés par les variations de température.

#### **3.2.1 La méthode française de dimensionnement [LCPC – SETRA]**

Les fondements de la méthode de dimensionnement des chaussées ont été dégagés dès le début des années 1970. Dans la démarche adoptée, la détermination des épaisseurs des différentes couches de chaussée ainsi que leurs caractéristiques mécaniques des matériaux relève, soit d'une approche expérimentale empirique, soit de calculs de vérification (méthode rationnelle). Par opposition aux modèles empiriques, ces méthodes rationnelles font appel à l'utilisation combinée de modèles mécaniques et de données expérimentales. C'est par le biais de modèles de calculs qu'est vérifié le dimensionnement de la structure vis-à-vis des critères de durabilité.

D'un point de vue mécanique, la démarche de la méthode française de dimensionnement peut être scindée en deux étapes. Dans une première étape, il convient de calculer, sous l'effet de l'essieu standard de référence de 130 KN (Tableau 1.2), la réponse d'une structure de chaussée choisie à priori (type de structure, matériaux et épaisseurs des couches constitutives). Ce calcul repose sur l'évaluation, sous l'effet d'une charge circulaire appliquée à la surface d'un massif multicouche, les champs de contraintes maximales dans les couches de matériaux et de sol. Dans ce calcul, la charge appliquée symbolise l'action de l'essieu de référence, et le modèle semi-analytique de Burmister, développé aux Etats-Unis à partir de

1943 [9], est utilisé pour obtenir la réponse mécanique. Dans une seconde étape, il s'agit de calculer les valeurs de sollicitations admissibles des matériaux de la structure, en fonction de leur localisation dans la structure, de leurs modes de dégradation (rupture

Par fatigue des couches en matériaux liés et orniérage du sol et des couches en matériaux non liés), et du trafic cumulé (nombre de poids lourds) devant circuler sur la chaussée pendant sa durée de vie sur une plate-forme donnée (Tableau 1.2). La structure convient si les sollicitations induites par le passage de l'essieu de référence restent inférieures ou égales aux sollicitations admissibles pour chaque couche (Tableau 1.3). Le choix de la structure finale se fait par calculs itératifs. Le calcul des valeurs admissibles s'appuie sur le comportement en fatigue des matériaux liés, traduisant la rupture d'une éprouvette en laboratoire pour l'application d'un grand nombre de cycles de sollicitations, et sur le caractère plastique des matériaux non liés, expliquant l'apparition de déformation permanente [10, 21].

### **3.2.2 .La méthode de dimensionnement [AASHTO]**

La méthode américaine de dimensionnement des chaussées AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) est basée sur une analyse empirique des résultats des essais de l'AASHTO Road test réalisés à la fin des années 1950 sur plus de 500 sections tests de chaussées. A l'heure actuelle, la dernière version du guide de dimensionnement date de fin 2002, mais la version de 1993 reste encore la plus utilisée. Dans cette version de 1993, aussi bien pour les chaussées souples que rigides, le dimensionnement se fait à l'aide d'équations de régression traduites sous forme d'abaques et de formules (Tableau 1.3) permettant de choisir l'épaisseur de la chaussée en fonction du trafic cumulé considéré et la dégradation de la qualité d'usage de la route. La notion de qualité d'usage de la route est définie par l'indice PSI (Present Service ability Index) qui varie de zéro (chaussée impossible à circuler) à six (chaussée en parfait état). Cette échelle a été déterminée sur la base des dégradations de la chaussée et de leurs effets perçus par les usagers. Les données de trafic sont converties en nombre cumulé d'essieux standards W18 (Tableau 1.2). Enfin, pour une structure de chaussée choisie, un nombre structurel SN (Structural Number) est calculé et comparé à sa valeur minimale. Cette valeur minimale correspond à la somme pondérée des épaisseurs des différentes couches, et tient compte de la nature des matériaux et des conditions de drainage de chaque couche.

D'un point de vue mécanique, on remarque que la méthode américaine de dimensionnement AASHTO n'aborde pas, de manière explicite, la modélisation du plan de contact entre deux

couches de matériaux. On peut cependant comprendre que dans cette méthode, le fait de pouvoir déterminer une épaisseur globale des couches bitumineuses sous-entend l'hypothèse qu'un collage parfait se développe à l'interface des couches en contact. En effet, l'épaisseur globale de ces couches dépend en partie de la rigidité globale de cet ensemble. Celle-ci est plus grande lorsque les couches sont parfaitement collées entre elles. Cependant, si cette hypothèse de collage parfait n'est pas satisfaite sur chantier, le fonctionnement mécanique de la chaussée est modifié.

### **3.2.3. La méthode anglaise de dimensionnement [DMRB]**

La méthode anglaise de dimensionnement est essentiellement empirique. Elle est basée sur l'interprétation du comportement de sections tests de chaussée. Au fil des années, les principes de la méthode de dimensionnement ont été remis à jour à travers des rapports de recherche du TRRL (« Transport and Road Research Laboratory » actuel TRL, « Transport and Research Laboratory ») pour prendre en compte l'augmentation de l'agressivité des véhicules et du trafic. Ces rapports ont servi de base à l'établissement du catalogue de dimensionnement des routes et des ponts DMRB (Design Manual for Roads and bridges). Le DMRB synthétise les résultats de recherche du TRL et permet de dimensionner facilement une structure à l'aide de graphes. Dans cette méthode, le traitement des données du trafic ne prend en compte que le nombre de véhicules commerciaux, et chaque catégorie de véhicules est ramenée à un nombre d'essieux standards équivalent. Le dimensionnement de la plateforme support de chaussée [17,34] s'appuie sur la valeur de CBR (Californian Bearing Ratio), un minimum de 15% est requis sous la structure de chaussée (Tableau 1.2), et en dessous de cette valeur, une couche en matériaux granulaire est ajoutée. Le dimensionnement proprement parlé est traité dans le deuxième chapitre. Les structures envisagées sont flexibles, semi-rigides ou rigides. Pour chaque type de structure, la lecture d'un graphe donne directement l'épaisseur des couches en fonction du trafic (exprimé en million d'essieux équivalent) et du type de matériaux.

Cependant, même si la méthode anglaise de dimensionnement est très simple d'utilisation, elle ne permet pas le dimensionnement de cas non standard faisant intervenir de nouveaux matériaux ou conditions particulières. Achimatos fait remarquer que dans la méthode anglaise, le comportement en fatigue des couches liées n'est pas considéré comme le critère dimensionnant car la méthode considère que la ruine des chaussées en matériaux bitumineux est due à la fissuration par le haut.

D'un point de vue mécanique, on remarque que la méthode anglaise DMRB n'aborde pas, de manière explicite, la modélisation du plan de contact entre deux couches de matériaux. La

méthode fait l'hypothèse qu'un collage parfait se développe à l'interface de deux couches bitumineuses. Dans le Tableau 1.2 présenté ci-après, on recense différents types d'essieux standards adoptés par les méthodes de dimensionnement des chaussées. L'essieu standard est toujours de type simple à roues jumelées. La charge est uniformément répartie sur des disques circulaires symbolisant les empreintes des pneumatiques. Au niveau européen, un groupe de travail a cherché à recenser et comparer les différentes méthodes de dimensionnement. Une première étape a été franchie et traite de l'harmonisation des dimensions maximales et poids maximaux des véhicules pouvant circuler à l'intérieur de la communauté européenne. La directive européenne 96/53/CE de juillet 1996 fixe la charge maximale de l'essieu simple à 115 kN.

**Tableau 1.2:** *Méthodes de dimensionnement : types d'essieu standard et performance du support*

<b>Méthode</b>	<b>Française LCPC/SETRA</b>	<b>Américaine AASHTO</b>	<b>Anglaise DMRB</b>	<b>Hollandaise</b>	<b>Shell SPDM</b>	<b>Européenne 95/53/CE</b>
<b>Trafic : essieu standard</b>	Essieu simple à roues jumelées de 130 kN	Essieu simple à roues jumelées de 18 kip (82 kN)	Essieu simple à roues jumelées de 80 kN	Essieu simple à roues jumelées de 100 kN	Essieu simple à roues jumelées de 80 kN	Essieu simple à roues jumelées de 110 kN
<b>Performance de la plateforme</b>	3 niveaux : PF2 (50 MPa), PF3 (120 MPa), PF4 (200 MPa)	Valeur du module élastique entre 1 et 40 kpsi (7-276 MPa)	CBR <sub>min</sub> =1 5%	3 niveaux : 50 MPa, 100 MPa, ou 150 MPa	Non disponible	Non disponible

**Tableau 1.3:** Méthodes de dimensionnement : performance mécanique des couches de chaussée

Méthode	Lois de fatigue – Critères dimensionnant	Paramètres
Française [LCPC/SETRA]	Rupture par fatigue des matériaux liés : $\epsilon_t \leq \epsilon_6(\theta_{eq}, f) \cdot \left(\frac{TCEi}{10^6}\right)^b \cdot K\theta \cdot Kr \cdot Kc$	$\epsilon_t$ : déformation horizontale à la base de la couche ; $\epsilon_6(\theta_{eq}, f)$ : déformation à appliquer pour provoquer une rupture du matériau à $10^6$ cycles ; TCEi : trafic en nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée K $\theta$ : facteur lié à la température Kr : facteur lié au risque et aux dispersions Kc : facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement observé sur chaussées A : égale à 0,016 pour les faibles trafics et 0,012 dans le cas contraire
	Déformation permanente des couches en matériaux non liés :  $\epsilon_z \leq A \cdot (TCEi)^{-0,235}$	
Américaine [AASHTO]	$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN + 1) - 0,20$  $+ \frac{\log\left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5}\right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \cdot \log_{10}(M_r) - 8,07$	W18 : nombre équivalent d'essieux standard ; ZR*S0 : facteur de fiabilité ; SN : nombre structurel ; Mr : module élastique de la plate-forme. ; $\Delta PSI$ : variation de l'indice de qualité de la route

### 3.3 L'approche théorique

L'approche théorique s'intéresse en premier lieu à établir un modèle de chaussée qui reproduit au mieux le fonctionnement mécanique et l'état de contrainte de la structure sous l'effet d'un chargement donné (trafic). Il s'agit d'une branche particulière de la mécanique des Milieux Continus, dite « mécanique des chaussées ».

La première étape dans cette approche est d'établir expérimentalement, les lois de comportement des matériaux et d'en déduire leurs caractéristiques mécaniques qui seront utilisés dans la formulation mathématique du problème posé.

Une seconde étape du modèle mécanique a pour but de déterminer les contraintes et les déformations dans les matériaux de chaussées et le sol support, ces dernières sont alors comparées aux contraintes et déformations admissibles.

#### 4. Les modèles de la mécanique des chaussées

##### Introduction

La mécanique de chaussées porte principalement sur la compréhension du fonctionnement des structures et sur les règles de dimensionnement. On définit alors le niveau de sollicitation de la structure à l'aide d'un modèle. Ce dernier doit représenter de façon réaliste le fonctionnement de la structure. Sans qu'il soit question ici de présenter toutes les méthodes, on indiquera seulement les plus importantes, notamment par chronologie, le modèle monocouche, le modèle bicouche, le modèle multicouches et les modèle numériques

##### 4.1. Le modèle monocouche de Boussinesq (1885)

Dans le cas où le corps de chaussée n'est pas trop différent du sol naturel, on peut considérer que la pression se répartit de la même manière que dans un sol. Ceci conduit à considérer la structure de chaussée comme un massif semi-infini et proposer une méthode simple de dimensionnement. Avec l'hypothèse d'isotropie et d'élasticité linéaire, ce problème a été résolu par Boussinesq .

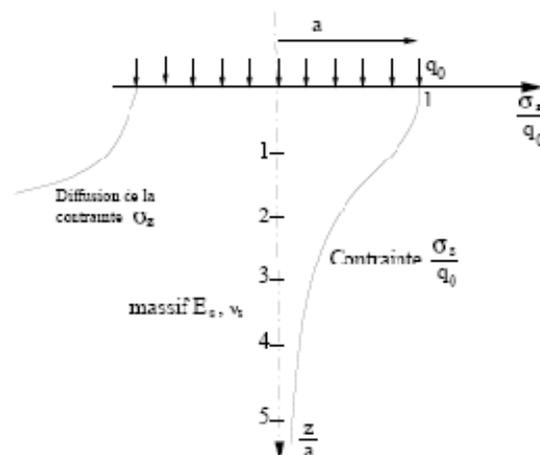


Figure 1.2. Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq

Pour une charge d'intensité  $q_0$  appliquée sur un cercle de rayon  $a$ , le déplacement, la contrainte verticale et radiale en un point sur l'axe de la charge situé à une profondeur  $z$  sont déterminés par la formule ci-dessous :

Grâce aux résultats de Boussinesq, on peut trouver l'épaisseur  $H$  de la chaussée où la pression verticale ne dépasse pas la valeur admissible du sol. Ce modèle est simple et facile à utiliser.

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

Toutefois, son application au dimensionnement de la chaussée présente les inconvénients suivants :

- Le champ d'application de ce modèle est limité (au cas où le corps de chaussée n'est pas trop différent du sol support).
- Il ne caractérise pas le comportement des structures multicouches.
- La contrainte  $\sigma_z$  ne dépend pas du module  $E_2$  du sol support.
- Il conduit à des structures non économiques dès que la contrainte admissible du sol devient relativement faible.

#### 4.2 .Les Modèles bicouches

Les modèles bicouche dépendent du rapport de rigidité du corps de chaussée et du sol support

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

Lorsque la contrainte admissible du sol-support est faible, d'après le modèle monocouche, l'épaisseur de la chaussée sera forte. Ceci peut être coûteux. Pour diminuer cette épaisseur, il est nécessaire d'augmenter le module de la couche de chaussée, en traitant le corps granulaire ou la couche de chaussée par un liant hydraulique (ciment, laitier, etc.). Cependant, l'augmentation de la rigidité de la chaussée modifie son fonctionnement mécanique. Effectivement, la couche de chaussée fléchit sous la charge appliquée ; ce fléchissement est accompagné de contraintes de traction à la base de la chaussée (figure 1.3)

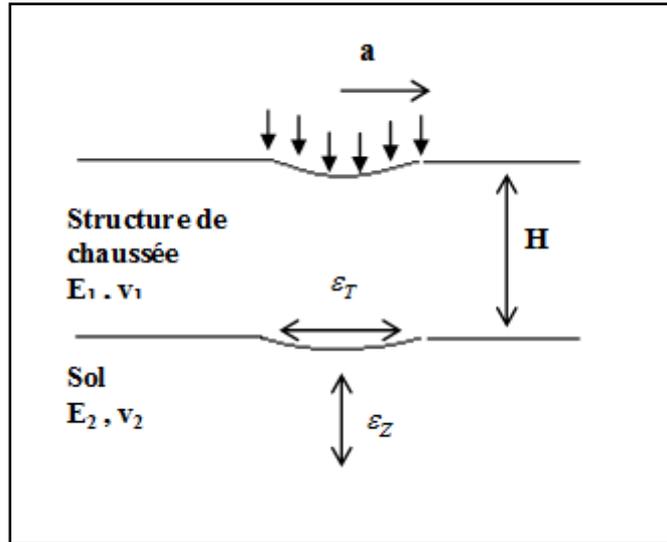


Figure 1.3. *Modèle bicouche*

Alors, dans le dimensionnement de la chaussée, hormis la condition de contrainte admissible à la surface du sol-support, nous devons vérifier aussi le critère de déformation de traction à la base de la couche de chaussée. Parmi les solutions théoriques, on peut citer la solution de Westergaard (1927) et de Hogg (1938).

#### 4.3 .Modèle de WESTERGAARD(1927)

Westergaard a considéré la chaussée comme une plaque mince placée sur un massif de winkler c'est-à-dire un assemblage de ressort indépendant. Mathématiquement le problème est résolu par l'équation de Lagrange pour les plaques minces.

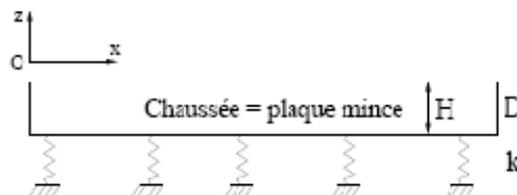
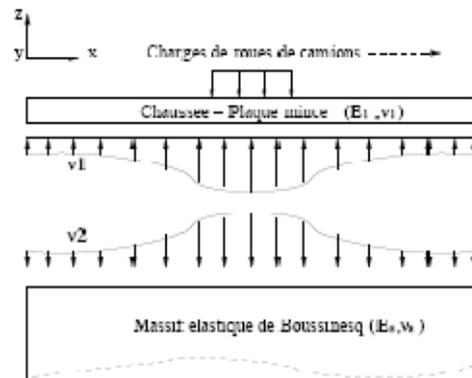


Figure 1.4 *schéma du modèle de Westergaard*

#### 4.4. Modèle de HOGG(1938)

Le modèle de fondation de Hogg est schématisé sur la figure 1.5. La chaussée représentée par une plaque mince ( $E_l, \nu_l$ ) est posée sur un massif infini de type Boussinesq ( $E_s; \nu_s$ ).



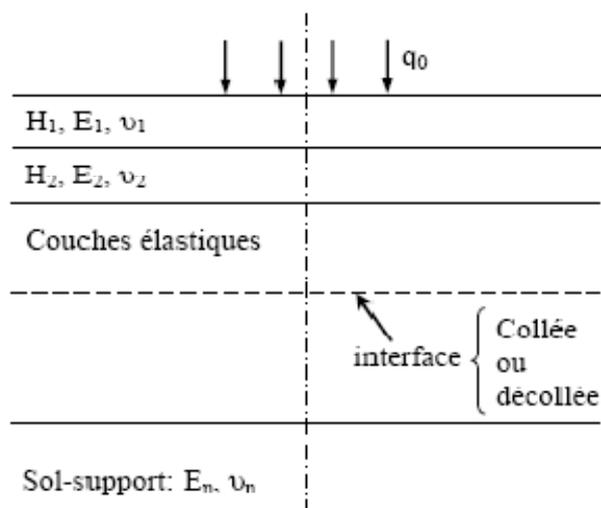
**Figure 1.5 :** Schéma du modèle de Hogg

Ce modèle présente encore les inconvénients suivants :

- Les cisaillements ne sont pas pris en compte à l'interface chaussée-sol, ce qui influence beaucoup les résultats.
- Il ne peut pas représenter un complexe de type multicouche de chaussée.

#### 4.5 .Modèle multicouche de Burmister

Les modèles bicouches ne reproduisent pas la nature multicouche de la chaussée et ne modélisent pas correctement le comportement mécanique des couches de chaussées (hypothèse de plaque). Partant de ces remarques, Burmister a traité le problème général à  $n$  couches infinies dans le plan et reposant sur le sol infini de Boussinesq (Figure 1.6).



**Figure 1.6 :** Schéma du modèle de Burmister [Burmister. 1943]

Par rapport aux modèles précédents, le modèle multicouche de Burmister présente plusieurs avantages, puisque :

- Toutes les couches sont traitées comme des solides élastiques (on évite l'hypothèse de plaque),
- les interfaces entre les couches peuvent être collées ou décollées, et une même structure peut comporter des couches collées et des couches décollées,
- Le cas de charges multiples : jumelages, essieux tandem ou tridem peut être traité en additionnant les effets de charges élémentaires.

### 5. Modèles numériques

Le développement des méthodes numériques et particulièrement la méthode des éléments finis, permet d'envisager l'utilisation de modèles encore plus réalistes. On peut ainsi prendre en compte la non-linéarité des matériaux, les conditions complexes de contacts entre les différentes couches. La modélisation par éléments finis des structures de chaussées a été abordée dès 1967, on peut citer :

Duncan, Westmann et Hicks.

Plus récemment, on note les contributions importantes de Brown et Papin, Jouve, Martinez et Ragneau, Jouve, El-hannani, Guezouli

De nos jours, plusieurs codes de calcul sont utilisés dans le dimensionnement et l'analyse des structures de chaussées, on peut citer :

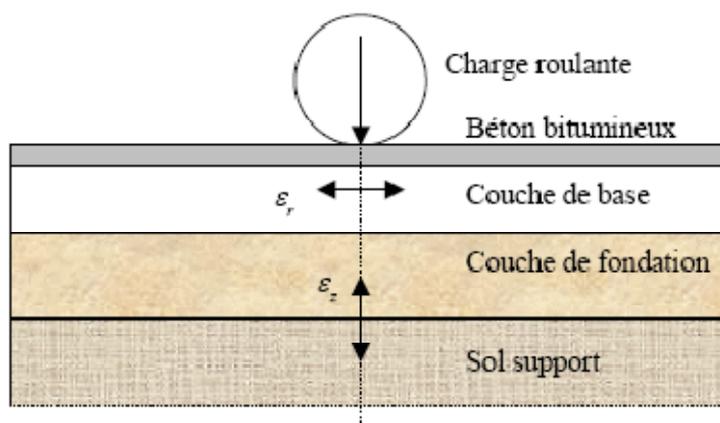
- Les programmes ALIZE 3 et CESAR du LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussée, France).
- Le programme NOEL 8 de l'université de Nantes, France.

- Le code de calcul FENLAP de l'université de Nottingham, Angleterre.
- Le programme DIANA de l'université de, Delft.
- Le programme ELMOD DYNATEST, Danemark.

## PARTIE 2 :

### 1 .Les chaussées souples

Les structures de chaussée souples, destinées à des trafics faibles à moyens (moins de 200 poids lourds par jour), sont constituées d'une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de ce type de chaussées est généralement comprise entre 30 et 60 cm. La Figure schématise la coupe d'une structure de chaussée souple sous le passage d'une charge roulante.



**Figure 1.7 :** Déformations prises en compte pour le dimensionnement des chaussées souples

Par ailleurs, les chaussées routières sont classées par rapport au trafic dont elles sont amenées à supporter durant leur vie de service. Les chaussées souples sont définies pour un trafic  $T_i$  inférieur ou égal à  $T_2$ . En effet, leur faible rigidité structurale ne leur permet de résister qu'aux faibles trafics. A titre indicatif, pour un trafic  $T_2 = 200 \text{ PL/J}$ , la chaussée est appelée à supporter  $1.46 \times 10^6$  poids lourds sur une durée de vie de 20 ans. Le nombre élevé de répétitions du chargement nécessite une attention particulière au phénomène de fatigue et à l'évolution des déformations permanentes. Le trafic est donc un facteur indispensable pour le dimensionnement des chaussées ;

Du fait de l'absence de cohésion dans les couches de l'assise des chaussées souples et de la faible épaisseur de la couche de roulement, celles-ci sont flexibles. Sous l'action d'une charge roulante, la couche de roulement subit à sa base des efforts répétés de traction par flexion ce

qui conduit à la dégradation par fatigue de la couverture bitumineuse avec l'apparition de fissures isolées.

La faible rigidité de l'assise conduit à une transmission des efforts verticaux au sol support avec une diffusion latérale relativement faible. Ceci provoque l'apparition des déformations plastiques dont le cumul augmente avec le trafic conduisant ainsi, à l'apparition d'ornières en surface qui détériorent la qualité du profil en long de la chaussée. Selon les travaux réalisés par [Larsen (1997)], les déformations irréversibles - cause majeure de l'apparition de l'orniéage - se concentrent principalement dans le sol support et/ou l'assise de la chaussée.

## **2. Caractéristiques des chaussées souples**

La principale caractéristique des chaussées souples est leur aptitude à travailler en grande déformation. Au passage des charges roulantes en un point de la chaussée, la flèche au voisinage de la charge étant relativement importante, ceci a pour effet de localiser les pressions sous le sol support dans un faible rayon autour de l'axe de la charge. Ainsi, pour diffuser ces pressions et les réduire, on augmente l'épaisseur de la chaussée. Ceci constitue la base de toutes les méthodes de calcul des chaussées souples, méthodes qui relient l'épaisseur requise à la pression maximale admissible sur le sol support.

Selon l'importance de la route, le revêtement hydrocarboné peut être un simple enduit superficiel de 1,5 à 2cm, ou un béton bitumineux de 4 à 10cm d'épaisseur. Dans le premier cas le revêtement ne joue qu'un rôle de tapis d'usure et d'étanchéité, tandis que dans le second lorsqu'il est épais, assure une répartition importante des charges, sous réserve que sa rigidité et sa résistance soit suffisante pour qu'il ne se fissure pas. Le corps de chaussée diffuse très largement les pressions verticales imposées par les charges roulantes et c'est de lui que dépendra essentiellement la valeur maximale de pression sur le sol de fondation. D'autre part les matériaux pris en compte doivent être aptes à résister aux efforts qui les sollicitent.

## **3 .Critères de dimensionnement des chaussées souples**

### **3.1. Hypothèse d'élasticité**

Les premières méthodes de dimensionnement des chaussées étaient d'interprétation rationnelle peu élaborée, les autres portaient de l'hypothèse élasto-plastique ; la plasticité semble jouer un rôle très important dans la vie de la chaussée.

Au fur et à mesure que le trafic s'accrut et que les chaussées durent être construites de manière plus élaborée, l'hypothèse de la plasticité perdit de son importance. A l'heure actuelle on admet en général l'hypothèse du fonctionnement quasi réversible d'une chaussée pendant la plus grande partie de sa vie. Les essais A.A.S.H.O montre que l'indice de viabilité P.S.I (Present Serviability Index) qui mesure l'état de la chaussée, diminue très lentement pendant une grande partie de l'essai, puis décroît rapidement à partir d'un certain moment.

### **3.2. Fatigue des matériaux**

En ce qui concerne les matériaux enrobés, il semble que la fatigue ne soit fonction que de la déformation quels que soient le mode de sollicitations. Par contre pour les matériaux granulaires, la fatigue se traduit en général par une attrition qui provoque la naissance de fines et augmente considérablement la sensibilité à l'eau (chute de rigidité) des couches granulaires. Dans le cas des sols fins et des sols de fondation les phénomènes de fatigue se traduisent soit par des ruptures plastiques soit par des tassements

D'après les constatations précédentes, on peut retenir les critères suivants :

- Pour les sols support ; une pression verticale limite admissible à la surface sur l'axe de la charge (car on fait l'hypothèse que sur la face supérieure du sol le tenseur des contraintes dépend uniquement de la pression verticale qui doit être limitée).
- Pour les matériaux enrobés : la déformation radiale dans l'axe de la charge sur la face inférieure du matériau où la déformation est la plus forte.

### **4. Paramètre de dimensionnement des chaussées souples**

La durée de vie d'une chaussée est liée à la fatigue des matériaux qui la composent. Pour le béton bitumineux, la fatigue ne semble être liée qu'à la déformation qu'il subit. Pour les sols supports, mis à part l'aspect de rupture plastique, la fatigue se traduit par des tassements. Enfin pour les matériaux granulaires, la fatigue reste très sensible à leur état hydrique qui provoque une chute de rigidité notable. Le dimensionnement des chaussées souples est basé sur les paramètres suivants :

- La déformation radiale à la base de la couche de béton bitumineux qui doit être limité pour empêcher sa rupture par fatigue (fissuration).
- La déformation verticale à la surface du sol support qui doit être limité pour cause d'orniérage.

#### **4.1. Matériaux de chaussée souple**

Les différents matériaux constitutifs des couches d'une chaussée souple doivent présenter des caractéristiques mécaniques leur permettant de résister aux différentes sollicitations que subit la chaussée durant sa vie de service,

##### **4.1.1 .Les Graves Non Traitées (G.N.T)**

Sont des mélanges granulaires composés uniquement de granulats et d'eau (aucun liant hydraulique ou hydrocarboné n'entre dans leur composition). Leur granulométrie est continue avec un diamètre maximal de grains compris entre 14 et 31,5 mm. On distingue deux catégories de GNT :

Les GNT A : obtenues en une seule fraction, sans ajout d'eau, dont l'homogénéité de la granularité est codifiée.

Les GNT B : recomposées de plusieurs fractions granulaires distinctes, dans des proportions définies et qui sont malaxées et humidifiées en centrale (appellation traditionnelle GRH : grave reconstituée humidifiée).

Ils sont largement utilisés dans les chaussées à faible et moyen trafic (chaussées souples) pour la réalisation des couches d'assise et des couches de forme. Les performances mécaniques des GNT sont habituellement estimées à partir des caractéristiques suivantes :

- dureté des granulats (déterminée par les essais Los Angeles et micro-Deval, réalisés sur la fraction 10/14),
- propreté des gravillons,
- angularité des granulats (indice de concassage, coefficient d'aplatissement).

Attribuer des performances mécaniques à des GNT principalement à partir des mesures de dureté de leurs granulats est cependant réducteur et pas toujours satisfaisant. C'est pourquoi les Laboratoires des Ponts et Chaussée sont mis au point un appareil triaxial à chargements répétés (le TCR), spécialement conçu pour l'étude des sols supports de chaussées et des matériaux non traités utilisés en couche d'assise.

##### **4.1.2 .Le béton bitumineux**

Le béton bitumineux est un mélange, parfaitement contrôlé et de haute qualité, réalisé à chaud. Il est constitué de granulats de bonne qualité et bien calibré provenant exclusivement

de roches massives et de bitume pur tenant à la fois d'éléments mouillant et agglutinant. Il doit être bien compacté en une masse uniforme et dense.

Les bétons représentent à l'heure actuelle l'une des solutions techniques les plus avancées pour la réalisation des couches de roulement des chaussées revêtues. Par rapport aux autres mélanges bitumineux (sand-asphalt, enrobé dense...) le béton bitumineux présente les avantages suivants:

- une meilleure homogénéité d'ensemble
- une meilleure étanchéité une grande stabilité
- une meilleure résistance au glissement

Suivant le pourcentage des vides, du filler d'ajout et de la granulométrie on distingue les bétons bitumineux des enrobés denses comme résumé dans le Tableau ci-après:

**Tableau 1.4 :** *Composition des mélanges bétons bitumineux et enrobés denses*

Type de mélange	Granulats	Liant
<b>Bétons bitumineux</b>	Concassés (sable peut rond) Roche dure, non polissable Forme cubique, propre fuseau étroit % vides de 4 à 6	Bitume ou bitume-goudron en pourcentage dépendant du pourcentage de filler
<b>Enrobé denses</b>	Concassées, ronds ou mélange de deux fuseau large % vides de 8 à 12	Bitume % de 4 à 5

#### 4.1.3. Le sol support

La démarche logique de la connaissance d'un sol-support de chaussée comporte trois étapes distinguées :

- ✓ Une identification géotechnique qui permet de rattacher le comportement prévisible de ce sol au comportement général d'une famille connue. Cette étape s'appuie sur une classification des sols.
- ✓ Une étude des paramètres d'état, car pour une famille de sols donné, il existe des paramètres caractéristiques de leurs comportement et il est important d'en situer la valeur par rapport à une valeur de référence. On s'appuie ici sur la courbe **proctor-CBR**.

- ✓ Une évaluation de la portance : contenu de la valeur des paramètres d'état (par exemple de la teneur en eau), on cherche ici à obtenir une évaluation chiffrée de la capacité portance, on utilise par exemple l'essai de plaque ou l'essai CBR (californiabearing ratio) qui est utilisé pour évaluer la portance des sols sensible à l'eau.

D'autres éléments que les seuls éléments géotechniques sont néanmoins nécessaires pour effectuer l'analyse des contraintes et des déformations dans une structure de chaussées, ces autres éléments sont issus d'étude générale de laboratoire et de l'observation des comportements des chaussées.

## **4.2. Le trafic**

Le trafic est notamment le poids lourd, est l'un des paramètres prépondérants du dimensionnement des chaussées ; il est nécessaire de l'analyser en terme d'agressivité vis-à-vis des chaussées sur lesquelles il circule.

### **4.2.1. Agressivité de trafic**

Le passage d'une charge lourde sur une chaussée provoque des dommages de différentes natures :

1. Le support de la chaussée, sol-support ou couche de forme en matériaux non traités, enregistre à chaque passage d'une charge, une déformation permanente fonction de la contrainte verticale qui lui est appliquée. L'accumulation de ces déformations permanentes se traduit à la surface de la chaussée par des déformations du profil, du mois en ce qui concerne les chaussées traditionnelles. Sous les assises traitées aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés, les contraintes verticales sur le support sont suffisamment faibles pour que les déformations permanentes restent modérées.
2. Les structures des chaussées qui comportent des couches liées fléchissent à chaque passage de la charge. Ce fléchissement donne lieu, à la base de la chaussée, à des contraintes de traction par flexion, la répartition de ces contraintes de traction conduit à une accumulation des dommages de fatigue qui provoquera à terme la ruine de la chaussée (fissuration). Ce mode de rupture par flexion répétée constitue le mode principal des ruptures des chaussées comportant des assises traitées (liants hydrauliques ou hydrocarbonés)

3. Le passage de charges peut aussi entraîner d'autres dommages dans la couche de surface de la chaussée. Le revêtement peut s'user jusqu'à devenir glissant (effort tangentiel), la répétition de contraintes verticales peut conduire, sur certains revêtement, à un orniérage notable (fluage).

Les modèles de calculs les plus courants, ne permettent d'étudier que les dommages des deux premiers types. Les dommages du troisième type sont plus difficiles à appréhender par le calcul.

#### **4.2.2 Prise en compte du trafic dans le dimensionnement**

Rappelons que le dimensionnement des chaussées est un dimensionnement à la fatigue, les matériaux de chaussée étant choisis par ailleurs pour répondre à d'autres exigences telles que la résistance au fluage et les caractéristiques antidérapantes.

Caractériser le trafic en vue du dimensionnement d'une chaussée, c'est en fait déterminer le nombre  $n_{eq}$ , trafic cumulé équivalent au trafic devant réellement circuler sur cette chaussée pendant sa durée de vie, telle qu'elle a été conventionnellement définie. On en déduit ensuite les contraintes et les déformations à ne pas dépasser dans les différents matériaux de la chaussée. Ce nombre  $n_{eq}$  est fonction :

- Du trafic à la mise en service, exprimé en nombre de poids lourds ou en nombre d'essieux.
- De l'agressivité de ce trafic, exprimé en nombre d'essieux standards.
- De la durée considérée et du taux croissance.

Selon les méthodes, c'est le nombre de cycles  $n_{eq}$  ou le trafic à la mise en service qui constitue le paramètre d'entrée dans les méthodes pratiques de dimensionnement.

La détermination de  $n_{eq}$  nécessite de faire des hypothèses et des choix sur l'agressivité du trafic, la durée de service de la chaussée et le taux de croissance. Selon le cas ; ces hypothèses et ces choix seront implicites (cas du catalogue des structures-type de chaussée neuves) ou laissée au choix du maître de l'ouvrage (cas du manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic)

## **Conclusion :**

Les chaussées souples sont caractérisées par un faible trafic, une mince couche de roulement et une assise en matériaux non liés. La faible épaisseur du revêtement bitumineux et l'absence de cohésion dans les couches d'assise conduisent à une faible rigidité structurelle. En effet, cette dernière dépend étroitement de la rigidité du sol support. Le fort rapport entre le module d'élasticité de la couche de base et la couche de roulement donne une flexibilité à la structure de la chaussée. Sous l'effet d'une charge roulante, le béton bitumineux subit des cycles de traction par flexion à sa base qui conduisent à des fissurations par fatigue. La prise en compte de la vérification vis-à-vis de la fatigue du béton bitumineux est alors non négligeable lors de l'opération de dimensionnement des chaussées souples.

A cause de la faible épaisseur de la couche de roulement, les couches d'assise sont exposées à des niveaux de contraintes assez élevés. Des déformations plastiques non négligeables peuvent apparaître, avec des amplitudes croissantes avec le trafic et conduisent à l'apparition d'ornières en surface. Celles-ci nuisent à la serviabilité de la chaussée. Les chaussées souples se dégradent principalement par orniérage, il est donc primordial de prendre en compte ce phénomène pendant le dimensionnement. Ce dernier est mené en respectant les recommandations du guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée. Cette approche présente quelques insuffisances. Elle est basée sur un calcul élastique linéaire alors que le comportement des graves non traitées et du sol support sont fortement non linéaires. Cette méthode ne prend pas en compte directement les caractéristiques mécaniques du grave non traitée.

## CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE

### Introduction

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

### 1. Détermination du type de réseau

#### 1.1. Constitution du réseau routier national

Les études initiées par les services du ministère des travaux publics ont abouti en 1996 à la décomposition du réseau national comme suit :

- **Le réseau principal noté RP :** Il se compose des routes reliant :
  1. Les chefs-lieux de wilayat
  2. Les ports, les aéroports et les postes frontaliers
  3. Les principales agglomérations et importantes zones industrielles

Ce réseau principal se décompose en deux niveaux :

- Le réseau principal de niveau 1 (RP1).

-Le réseau principal de niveau 2 (RP2).

Le linéaire total du réseau principal(RP) est de l'ordre de 18400 km.

- **Le réseau secondaire noté RS :**

Il se compose du reste des routes qui ne sont pas classées en RP, son linéaire total est de l'ordre de 7900 km.

#### 1.2 Choix du niveau de réseau principal

Ce choix est fait au départ par le projeteur en fonction de données telles que le trafic et l'intérêt socio-économique de la route à construire.

On aura donc à faire le choix entre deux niveaux de réseaux principaux, à savoir :

- **Réseau principal de niveau 1 (RP1) :** Il comporte des :
  - liaisons supportant un trafic supérieur à 1500 véhicules/jour
  - liaisons reliant deux chefs lieu de wilaya
  - liaisons présentant un intérêt économique et/ou stratégique

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

- **Réseau principal de niveau 2 (RP2)** Il est constitué de liaisons supportant un trafic inférieur à 1500 véhicules/jours. Ce réseau est composé de routes nationales(RN), de chemins de wilaya(CW) et de liaison reliant l'Algérie aux pays riverains.

### 1.3. Choix des structures types par niveau de réseau principal

Ce choix est fait en relation avec le type de réseau retenu (RP1 ou RP2). Le Tableau 2.1 ci-dessous synthétise l'éventail des structures types disponibles dans le dimensionnement.

**Tableau 2.1 :** Structures types disponibles dans le dimensionnement

Niveau de réseau principal RPi	Matériaux types	structures
RP1	MTB (matériau traité au bitume)	GB/GB, GB/GNT, GB/TUF, GB/SG, GB/AG
	MTLH (matériaux traités aux liants hydrauliques)	GL/GL, BCg/GC
RP2	MNT (matériaux non traités)	GNT/GNT, TUF/TUF, AG/AG, SG/SG
	MTB (matériaux traités au bitume)	SB/SG

GB : grave bitume, GL : grave-laitier, BCg : béton de ciment goujonné, GC : grave ciment, GNT : grave non traitée, SG : sable gypseux, TUF : encroustement calcaire, AG : arène granitique, SB : sable bitume

## 2. Détermination de la classe de trafic (TPLi)

### 2.1 Définition du poids lourd

La connaissance du trafic, essentiellement le trafic poids lourd intervient :

- Comme paramètre d'entrée dans le dimensionnement des structures de chaussées.
- Dans le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux, pour la fabrication des matériaux de chaussée

Un poids lourd(PL) est un véhicule de plus de 35KN (3.5 tonnes) de poids total autorisé en cahier de charge(PTAC)

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

### 2.2. Répartition transversale du trafic

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

1. Chaussées unidirectionnelles à 2 voies : 90% du trafic PL sur la voie lente de droite.
2. Chaussées unidirectionnelles à 3 voies : 80% du trafic PL sur la voie lente de droite.
3. Chaussées bidirectionnelles à 2 voies : 50% du trafic PL.
4. Chaussées bidirectionnelles à 3 voies : 50% du trafic PL.

### 2.3. Détermination de la classe de trafic (TPLi)

La classe de trafic (TPLi) est déterminée à partir du trafic poids lourds par sens, compté en moyenne journalière annuelle (MJA), pour la voie la plus chargée, à l'année de mise en service.

Le Tableau 2.2 donne par niveau de réseau (RP1 ou RP2), les classes de trafic adoptées

**Tableau 2.2 : Classes de trafic TPLi adoptées**

classe de trafic (TPLi) (PL/J/sens)	TPL0	TPL1	TPL2	TPL3	TPL4	TPL5	TPL6	TPL7
RP1	–	–	–	150 à 300	300 à 600	600 à 1500	1500 à 3000	3000 à 6000
RP2	0 à 50	50 à 100	100 à 150	150 à 300	–	–	–	–

### 3. Détermination de la portance de sol-support de chaussée

Les classes et les plages de portance des sols définies dans les Tableaux suivants ont été obtenues à partir de l'étude statique effectuée sur les données géotechniques de plus de 10 000 échantillons des sols.

#### 3.1. Détermination des classes de portance des sols

Le Tableau 2.3 regroupe les classes de portance des sols par ordre croissant de S4 à S0. Cette classification sera également utilisée pour les sol-supports de chaussée selon la valeur de CBR de densité Proctor modifié maximal.

**Tableau 2.3 :** *Classes de portance des sols Si*

Portance (Si)	CBR
S4	< 5
S 3	5-10
S2	10-25
S1	25-40
S0	>40

Le regroupement des sols en familles a été effectué en utilisant le système de classification USCS. Le Tableau 2.4 ci-dessous donne les classes des sols et les plages de portance probables.

**Tableau 2.4 :** *Plage de portance probable des sols*

Familles de sols	Classification des sols USCS	Plages de portance probables
Argiles, Limon	CL, CH, ML, ML-CL	S4- S2
Sables, Graves	SP-SC,SC,SM, GP-GC,GM	S3-S0

### 3.2 Détermination de la classe de portance de sol-support de chaussée

La portance de sol-support est fonction de celle du sol terrassé (déblai ou remblai), et éventuellement de l'apport de la couche de forme. Elle est considérée sous deux aspects :

1. A court terme (pendant les travaux), le sol-support doit remplir l'un des deux critères de constructibilité (compactage, trafic de chantier) :
  - déflexion sous essieu à 13 tonnes < 2 mm.
  - module à la plaque  $EV_2 > 50\text{MPa}$
2. A long terme (chaussée en service) ; cette portance sera prise en considération dans le dimensionnement des structures de chaussées.

#### 3.2.1. Portance des sols terrassés

##### a) Cas des sols sensibles à l'eau

L'étude géotechnique est obligatoire, car elle permet d'identifier les sols et d'étudier la variation de la portance grâce à l'essai de poinçonnement CBR.

L'essai CBR à prendre en compte sera fonction de la zone climatique considérée, à savoir :

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

-CBR immédiat pour les zones climatiques III et IV. La valeur de l'indice CBR immédiat sera déterminée à 95% de l'OPT.

##### b) Cas des sols insensibles à l'eau

Dans le cas des sols insensibles à l'eau, si l'essai CBR n'est pas réalisable, la portance sera déterminée à partir des essais de chargement à la plaque, ou des mesures de déflexion à condition que l'état hydrique au moment de l'essai soit représentatif ( $W \geq W_{OPM}$ ) :

Le module de sol  $EV_2$  et la déflexion caractéristique  $dc$  sont reliés par la relation suivante :

$$EV_2 * dc = 10340, \text{ avec } E \text{ en MPa et } dc \text{ en mm/100}$$

### 3.2.2 Classes de portances de sol-support pour le dimensionnement

Pour le dimensionnement des structures, on distingue 4 classes de portances de sol-support ( $S_3$ ,  $S_2$ ,  $S_1$  et  $S_0$ ). Les valeurs des modules indiquées sur le Tableau 2.5 ont été évaluées à partir de la relation :  $E \text{ (MPa)} = 5 \cdot \text{CBR} \dots\dots\dots (*)$

**Tableau 2.5 : Classes de portance de sol-support**

Classes de sol-support	$S_3$	$S_2$	$S_1$	$S_0$
Module (MPa)	25-50	50-125	125-500	>200

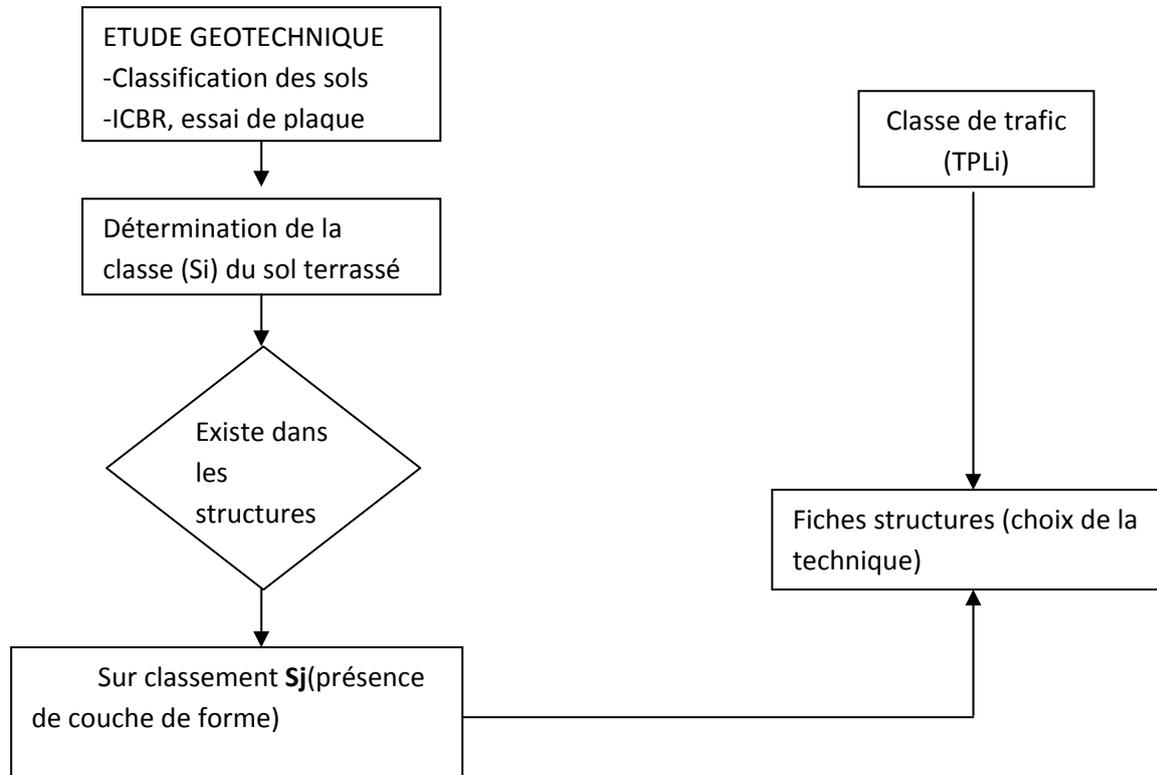
(\*) Relation obtenue à partir d'essai en laboratoire réalisées sur une famille de sols prédominant en Algérie.

**Remarque :**

Lorsque des cas de sols de faible portance ( $< S_4$  en RP2,  $< S_4$  et  $S_3$  en RP1) sont rencontrés, le recours à une couche de forme devient nécessaire pour permettre la réalisation des couches de chaussées dans des conditions acceptables.

### 3.2.3 Sur classement de portance des sols terrassés

L'utilisation d'une couche de forme en matériaux (naturels sélectionnés ou traités) permet un sur classement de portance du sol terrassé (figure 2.1)



**Figure 2.1 :** Détermination de la classe de portance de sol-support

Selon les cas de chantiers (trafic, nature des sols, zones climatiques) la couche de forme sera de différents types. Elle peut être en une ou plusieurs couches suivant le cas de portance du sol terrassé ( $S_i$ ) et la classe de sol-support visée ( $S_j$ ).

Les Tableaux 2.6 et 2.7 donnent des indications permettant de guider le choix de la couche de forme à réaliser.

**Tableau 2.6 :** Sur classement avec couche de forme en matériau non traité

Classe de portance de sols terrassés ( $S_i$ )	Matériau de couche de forme	Épaisseur de matériau de couche de forme	Classe de portance de sol-support visée ( $S_j$ )
<S4	Matériaux non traités (*)	50cm (en 2 couches)	S3
S4	Matériaux non traités (*)	35cm	S3

S4	Matériaux non traités (*)	60cm (en 2 couches)	S2
S3	Matériaux non traités (*)	40cm (en 2 couches)	S2
S3	Matériaux non traités (*)	70cm (en 2 couches)	S1

\* Matériaux non traités : grave naturelle propre, matériau locaux. Il est recommandé de faire une étude de ces matériaux quant à leur utilisation ou non en couche de forme.

**Tableau 2.7 :** *Sur classement avec couche de forme en sols fins traités à la chaux*

Classe de portance de sols tassés initial (Si)	Matériau de couche De forme	Epaisseur de matériaux traités en place	Classe de portance de sol-support visée (Sj)
<S4	Sols fins traités	35cm	S3
S4	Sols fins traités	25cm	S3
S3	Sols fins traités	30cm	S2
S3	Sols fins traités	60cm (en 2 couches)	S1

NB : Une étude spécifique au laboratoire est à faire pour déterminer le type de sol à traiter ainsi que le dosage optimal en chaux à utiliser.

**Remarque :**

Dans le cas où il n’y a pas nécessité d’une couche de forme, il faudra prévoir une couche de réglage du sol support pour les chaussées de niveau de réseau principal RP1.

**4. Choix de la couche de roulement**

Le choix de la couche de roulement est fait en fonction du niveau de réseau principal :

- RP1 : couche de roulement en béton bitumineux (BB), les épaisseurs sont modulées en fonction du trafic (TPLi) :
  - 6BB à 8BB pour les structures traitées au bitume (GB/GB, GB/GNT,...)
  - 6BB à 10BB pour la structure GL/GL
- RP2 : couche de roulement en enduit superficiel (ES) ou enrober à froid (EF) en fonction du matériau choisi et de la zone climatique, correspondante.

## **5. Options retenues par le maitre de l'ouvrage**

Le choix politique de gestion routière fait par le maitre de l'ouvrage en matière de niveau de service et de stratégie d'investissement et d'entretien, en relation avec la hiérarchisation du réseau routier, se traduit comme suit :

- Assurer un bon niveau de service à l'utilisateur de la route quelque soit le niveau de réseau principal (RPi).
- Adopter un investissement initial élevé correspondant à des chaussées conçues pour une période longue allant de 20 à 25 ans pour RP1, avec comme objectif un faible risque d'apparition de dégradations structurelles avant une période donnée.
- Adopter un investissement initial faible à moyen pour les chaussées conçues pour une durée de vie 15 ans pour le réseau RP2. Le risque d'apparition de dégradations structurelles avant une période donnée étant élevé qu'en RP1.

Dans tout les cas, un entretien préventif (pose d'une nouvelle couche de roulement) est à réaliser dès que certains indicateurs d'état traduisent une baisse du niveau de service, et avant que ne surviennent des dégradations structurelles (en général au bout de 8 à 10 ans). Pour une meilleure prise en charge des différentes stratégies d'entretien à adopter il est recommandé de se référer aux guides disponibles (entretien, réhabilitation, renforcement).

## **6. Données d'entrées du dimensionnement**

Les données de base pour le dimensionnement des structures de chaussées sont :

- la durée de vie
- le risque de calcul considéré
- les données climatiques
- le trafic
- le sol support de chaussée
- les caractéristiques des matériaux

Nous examinerons dans ce chapitre les différents paramètres précités ci-dessus.

### **6.1. Durée de vie**

La durée de vie est en étroite relation avec la stratégie d'investissement retenue par le maitre de l'ouvrage. Elle correspond à un investissement initial moyen à élevé et des durées de vie allant de 15 à 25 ans en fonction du niveau de réseau principal considéré.

Les durées de vie fixées par niveau de réseau principal (RP1, RP2) et par matériau types sont synthétisées dans le Tableau 2.8 ci-dessous :

**Tableau 2.8 : Durée de vie adoptée**

Niveau de réseau Principal (RPi)	Matériaux types	Structures types	Durée de Vie (années)
RP1	MTB (matériaux traités au bitume)	GB/GB, GB/GNT, GB/TUF, GB/SG	20
	MTLH (matériaux traités aux liants hydrauliques)	GL/GL	20
		BCg	25
RP2	MNT (matériau non traités)	GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG	15
	MTB (matériaux traités au bitume)	SB/SG	15

## 6.2. Risque de calcul

Compte tenu du caractère probabiliste relatif au dimensionnement des chaussées dû à l'importance de la dispersion et du caractère aléatoire des essais de fatigue, l'objectif qui est retenu est que la probabilité d'apparition de dégradations avant une période donnée de  $x$  années, soit inférieure à une valeur fixée.

Cette probabilité de rupture est appelée le « risque de calcul » et la période de  $x$  années la « durée de vie » ou durée du dimensionnement.

**Définition du risque :** Un risque  $r\%$  sur une période de  $x$  années pris pour le dimensionnement de la chaussée, est la probabilité pour qu'apparaissent au cours de ces  $x$  années des dégradations structurelles qui impliqueraient des travaux de renforcement de la chaussée. Les niveaux de risque choisis sont en fait en étroite relation avec les options retenues par le maître de l'ouvrage en matière de niveau de service et de stratégie d'investissement et d'entretien. Les risques de calcul ( $r\%$ ) adoptés dans le dimensionnement des structures, qui sont fonction du trafic et du niveau de réseau principal, sont donnés dans les Tableaux 2.9 et 2.10 ci-dessous.

**Tableau 2.9 : Risques adoptés pour le réseau RP1**

	<b>Classe de trafic (TPLi) (PL/J/sens)</b>	<b>TPL3</b>	<b>TPL4</b>	<b>TPL5</b>	<b>TPL6</b>	<b>TPL7</b>
<b>Risque (%)</b>	<b>GB/GB, GB/GNT,...</b>	20	15	10	5	2
	<b>GL/GL</b>	15	10	5	2	2
	<b>BCg/GC</b>	12	10	5	2	2

**Tableau 2.10 : Risque adoptés pour le réseauRP2**

	<b>Classe de trafic (TPLi) (PL/J/sens)</b>	<b>TPL0</b>	<b>TPL1</b>	<b>TPL2</b>	<b>TPL3</b>
<b>Risque (%)</b>	<b>GNT/GNT,TUF/TUF, SG/SG... SB/SG</b>	25		20	

### 6.3. Données climatiques

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

- à l'état hydrique du sol support
- aux cycles saisonniers de température

#### 6.3.1 Etat hydrique du sol-support

L'état hydrique du sol est pris en compte à travers la portance du sol support. Cette portance est estimée à partir d'un essai de poinçonnement CBR dont les conditions d'imbibition (immédiat ou à 4 jours) sont liées à la zone climatique considérée. Les différentes zones climatiques de l'Algérie sont mentionnées dans le Tableau 2.11.

**Tableau 2.11:** Zones climatiques de pluviométrie

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

(\*) Carte zones climatiques

### 6.3.2. Cycle saisonniers de température

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

### 6.3.3 Définition de la température équivalente

Le calcul de dimensionnement est fait pour une température constante dite température équivalente  $\theta_{eq}$ . Celle-ci est telle que la somme des dommages subit par la chaussée pendant une année, pour une distribution de température donnée, soit égale au dommages que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante  $\theta_{eq}$ . Cette dernière se détermine par application du cumul des dommages de la loi de Miner.

Les valeurs de température équivalentes ( $\theta_{eq}$ ) retenues pour le calcul du dimensionnement sont données dans le Tableau 2.12 ci-dessous :

**Tableau 2.12 :** Choix des températures équivalentes

	Zone climatique*		
Température Equivalente (°C)	I et II	III	IV
		20	25

## 6.4. Trafic

Pour le calcul du dimensionnement proprement dit, c'est le trafic cumulé sur la durée de vie choisie qui est à prendre en considération. Ceci fait intervenir les notions d'agressivité des poids lourds et de trafic cumulé équivalent (TCEi).

### 6.4.1. Calcul du trafic cumulé de PL (TCi)

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

$$TCi = TPLi \cdot 365 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i}$$

Où :

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

n= durée de vie considérée

TPLi= classe de trafic

### 6.4.2. Calcul du trafic cumulé équivalent (TCEi)

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

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

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

$$TCEi = TCi \cdot A = TPLi \cdot 365 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \cdot A$$

Cette formule peut être simplifiée comme suit :

$$TCEi = TPLi \cdot C \cdot A \cdot 10^3$$

Avec :  $C = 365 \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \cdot 10^{-3}$  appelé facteur de cumul

A : agressivité des PL par rapport à l'essieu de référence de 13 tonnes  
 le Tableau 2.13 ci-dessous donne les valeurs de C en fonction de i et n

**Tableau 2.13 : Valeurs du facteur de cumul C**

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

- **Le coefficient d'agressivité A**

La configuration des essieux (isolé, tandem, tridem), des roues (simples ou jumelées) et leur charge sont variables d'un poids lourd à l'autre. Par ailleurs pour une charge donnée, les contraintes et déformations dans la chaussée, à un certain niveau, sont fonction de la structure de chaussée. Vis-à-vis du comportement en fatigue enfin, l'endommagement provoqué par l'application d'une charge donnée dépend de la nature des matériaux. Les coefficients d'agressivité A ont été calculés conformément à la norme NFP98-082, à partir des histogrammes de charges obtenus lors de différentes campagnes nationales de posages des poids lourds. Les résultats de calculs sont donnés dans le Tableau 2.14 ci-après :

**Tableau 2.14 : Valeurs du coefficient d'agressivité A**

Niveau de réseau Principal (RPi)	Types de matériaux et structures	Valeurs de A
RP1	Chaussées à matériaux traités au bitume : GB/GB, GB/TUF, GB/SG...	0,6
	Chaussées à matériaux traités aux liants hydrauliques : GL/GL, BCg/GC	1
RP2	Chaussées à matériaux non traités : GNT/GNT, TUF/TUF, SG/SG, AG/AG	0,6
	Chaussées à matériaux traités au bitume : SB/SG	0,4
RP1 et RP2	Sol support (calcul de $\epsilon_{z,ad}$ )	0,6

## 6.5. Sol-support

**6.5.1. Classes de sols support retenues :** Le sol support de chaussées est assimilé à un massif semi-infini élastique, homogène et isotrope. Les caractéristiques mécaniques nécessaires pour la modélisation sont le module de Young (E) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ).

- Le coefficient de poisson( $\nu$ ) pour les sols est en général pris égal à 0,35.
- Le module du sol support (E) appelé également module de Young est donné ci-dessous dans le Tableau 2.15 :

**Tableaux 2.15 :** *Classes de portance à long terme du sol-support*

Classes de la portance (si)	S4	S3	S2	S1	S0
Modules (MPA)	15	25	50	125	200

### 6.5.2. Classes de sols support par niveau de réseau principal (RPi)

Il existe une relation entre la qualité du sol support de chaussée et le bon comportement des chaussées. Pour cette raison, et pour chaque niveau de réseau principal (RO1 et RO2), les classes de sol support considérées sont les suivantes :

- **Pour le réseau principal RP1 :** S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>
- **Pour le réseau principal RP2 :** S<sub>0</sub>, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>

Si ces niveaux de portance ne sont pas atteints, il faudra alors prévoir une couche de forme de manière à améliorer le module du support de chaussée et ce conformément aux tableaux de sur-classement des sols support donnés dans la partie I

### 6.5.3. Calcul des déformations admissibles sur le sol support $\epsilon_{z,ad}$

La déformation verticale  $\epsilon_z$  calculée par le modèle (élément finis et ALIZE III), devra être limitée à une valeur admissible  $\epsilon_{z,ad}$  qui est donnée par une relation empirique déduite à partir d'une étude statistique de comportement des chaussées Algériennes. Cette formule est de la forme suivante :

$$\epsilon_{z,ad} = 22 \cdot 10^{-3} \cdot (TCEi)^{-0,235}$$

Pour chaque classe de trafic (TCEi), il correspond une valeur de  $\epsilon_{z,ad}$

**Remarque :** La vérification  $\epsilon_z < \epsilon_{z,ad}$  sera surtout à faire dans le cas des chaussées à matériaux non traités, car c'est le critère prépondérant dans le calcul de dimensionnement. Dans le cas des chaussées traitées au bitume et aux liants hydrauliques, la pression sur le sol support sera tellement faible que le critère  $\epsilon_z < \epsilon_{z,ad}$  sera pratiquement toujours vérifié.

## 6.6. Conditions aux interfaces

Les conditions aux interfaces interviennent dans la modélisation de la structure pour les calculs de contraintes et déformations effectuées à l'aide du modèle retenu dans les calculs. Les différentes hypothèses adoptées sont synthétisées dans le Tableau 2.16 ci-dessous :

**Tableau 2.16 :** Synthèses des hypothèses sur les conditions de collage

Structures types	Hypothèses sur le type d'interface
<b>MTB :</b> 1- BB/GB/GB/sol support	Toutes les interfaces sont collées
2- BB/GB/GNT ou TUF ou SG/sol	Toutes les interfaces sont collées
3- SB/SG/sol support	Toutes les interfaces sont collées
<b>MTLH :</b> 1- BB/GL/GL/sol support	Toutes les interfaces sont collées
2- BCg/GC/sol support	Interfaces BCg/GC décollée Interfaces GC/sol support collée
<b>MNT :</b> 1- GNT/GNT/sol support 2- TUF/TUF/sol support 3- SG/SG/sol support 4- AG/AG/sol support	Toutes les interfaces sont collées

## 6.7. Matériaux

### 6.7.1. Performances mécaniques

Les performances mécaniques relatives aux différents types de matériaux sont données dans les Tableaux 2.17, 2.18 et 2.19 ci-dessous :

**Matériau traités au bitume (MTB)**

**Tableau 2.17 : Performances mécaniques des matériaux bitumineux**

Matériau (MTB)	E (30°,10H) (MPa)	E (25°,10H) (MPa)	E (20°,10H) (MPa)	E (10°,10H) (MPa)	$\epsilon_6$ (10°,25Hz) ( $10^{-6}$ )	-1/b	SN	Sh (cm)	$\nu$	Kc calage
BB	2500	3500	4000	-	-	-	-	-	0,35	-
GB	3500	5500	7000	12500	100	6,84	0,45	3	0,35	1,3
SB	1500	-	-	3000	245	7,63	0,68	2,5	0,45	1,3

BB : béton bitumineux, GB : grave bitume, SB : sable bitume

**Tableau 2.18 : Performances mécaniques des matériaux traités aux liants hydrauliques**

Matériaux (MTLH)	E (MPa)	$\nu_6$ (MPa)	-1/b	SN	Sh (cm)	$\nu$	Kd	Kc
GL	20000	0,50	18,4	1,24	3	0,25	1	1,5
GC	20000	0,70	12	1	3	0,25	1	1,5
BCg	35000	2,15	16	1	3	0,25	1/1,47	1,5

GL : grave laitier, GC : grave ciment, BCg : béton de ciment goujonné

**Matériaux non traités (MNT)**

**Tableau 2.19 : Performances mécaniques des matériaux non traités**

Niveau de la couche	Module des MNT (MPa)	Valeurs de k	$\nu$
Base* (15 ≤ h 20 ≤ cm)	GNT=500 TUF1=500 TUF2=300 SG1=700 SG2=300 AG=300	2,5 2 2 2 2 2	0,25 0,25 0,25 0,25 0,25 0,25
Fondation (en sous couches de 25 cm)	$E_{MNT}$ (sous couche 1) = k $E_{sol support}$ $E_{MNT}$ (sous couche i) = k $E_{MNT}$ (Sous couches i-1) avec $E_{MNT}$ borné à $E_{MNT}$ couche de base		
Fondation MNT sous GB et SB (GB/GNT)	$E_{MNT}$ (sous couche 1) = k $E_{sol support}$ (avec K idem ci-dessus) $E_{MNT}$ (sous couche i) = k $E_{MNT}$ (Sous couches i-1) avec $E_{MNT}$ borné à 350 MPa		

(\*) Pour la couche de base, les modules et coefficients de poisson sont ceux obtenus en laboratoire au triaxial à chargement répétés (TCR-G)

**6.7.2. Calcul des sollicitations admissibles**

Les sollicitations admissibles pour chaque type de matériaux sont calculées à partir des relations suivantes :

### a- Matériaux traités au bitume

Le calcul de la déformation admissible de traction ( $\epsilon_{t,ad}$ ) à la base de la couche bitumineuses est donnée par la relation suivante :

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \cdot K_{ne} \cdot K_\theta \cdot K_r$$

Où :

$\epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$  : déformation limitée détenu au bout de  $10^6$  cycles avec une probabilité de rupture de 50% à  $10^\circ\text{C}$  et 25Hz (essai de fatigue).

$K_{ne}$  : facteur lié au nombre cumulé d'essieux équivalents supporté par la chaussée

$K_\theta$  : facteur lié à la température

$K_r$  : facteur lié au risque et aux dispersions

$K_c$  : facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement observé sur chaussées.

Avec :

$$k_{ne} = \left(\frac{TCEi}{10^6}\right)^{b < 0} \quad k_\theta = \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}}; \quad k_r = 10^{-tb\delta}$$

D'où :

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz}) \cdot \left(\frac{TCEi}{10^6}\right)^b \cdot \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}} \cdot 10^{-tb\delta}$$

Avec :

TCEi : trafic en nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée

b : pente de la droite de fatigue ( $b < 0$ ).

$E(10^\circ\text{C})$  : module complexe du matériau bitumineux à  $10^\circ\text{C}$ .

$E_{\theta_{eq}}$  : module complexe des matériaux bitumineux à la température équivalente qui est fonction de la zone climatique considérée.

$$d: f(\text{dispersion}), \delta = \sqrt{SN^2 + \left(\frac{c}{b} Sh\right)^2}$$

Avec :

SN : dispersion sur la loi de fatigue

Sh : dispersion sur les épaisseurs

c : coefficient égal à 0,02

t : fractile de la loi normal, qui est fonction du risque adopté (r%)

**Tableau 2.20 : Quelques valeurs de  $t=f(r\%)$**

<b>r%</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>15</b>
<b>t</b>	-2,054	-1,881	-1,645	-1,520	-1,282	-1,175	1,036
<b>r%</b>	20	23	25	30	35	40	50
<b>t</b>	-0,842	-0,739	-0,674	-0,524	-0,385	-0,253	0

**b- Matériau traités aux liants hydrauliques :** Le calcul de la contrainte admissible de traction  $\sigma_{t,ad}$  à la base des couches traitées aux liants hydrauliques est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_{t,ad} = \sigma_6 \cdot Kne \cdot Kr \cdot Kd \cdot Kc$$

Où :

$\sigma_6$  : contrainte de flexion limite à 106 cycles donnée par l'essai de fatigue

Kne, Kr, Kc : idem matériaux traités au bitume

Kd : facteur lié aux effets des discontinuités (fissures) et gradient thermique (dalles en béton)

$\sigma_{t,ad}$  peut s'écrire de la façon suivante :

**c- Matériaux non traités (MNT) :**

Il n'existe pas de calcul de sollicitations admissibles pour ce type de matériau. Il faut s'assurer du bon choix des caractéristiques du matériau afin d'asseoir une bonne tenue à l'orniérage.

### 6.7.3 Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol-support

#### a-Matériaux traités au bitume (MTB) :

Il faudra vérifier que  $\epsilon_t$  et  $\epsilon_z$  calculées à l'aide (d'ALIZE), sont inférieures aux valeurs admissibles calculées, c'est-à-dire respectivement à  $\epsilon_{t,ad}$  et  $\epsilon_{z,ad}$ .

$$\epsilon_z < \epsilon_{z,ad} \text{ et } \epsilon_t < \epsilon_{t,ad}$$

#### b- Matériaux traitées aux liants hydrauliques (MTLH) :

Dans ce cas également, il faut vérifier que les contraintes et déformation calculées par (ALIZE) sont inférieures aux contraintes et déformation admissibles calculées :

$$\epsilon_z < \epsilon_{z,ad} \text{ et } \sigma_t < \sigma_{t,ad}$$

#### c- Matériaux non traités (MNT) :

Dans le cas de MNT la seule vérification est à faire sur le sol-support :

$$\epsilon_z < \epsilon_{z,ad}$$

Les différents matériaux constitutifs des diverses couches d'une chaussée doivent présenter des caractéristiques mécaniques leur permettant de résister aux différentes sollicitations que subit la chaussée durant sa vie de service. Pour un dimensionnement rationnel des chaussées souples, il est nécessaire de prendre en compte les facteurs qui influent significativement sur le comportement d'une chaussée en service. Hormis le trafic, il est indispensable de prendre en considération les conditions climatiques et la variation de l'état hydrique dans les couches de grave non traitée et le sol support. Une bonne connaissance des propriétés rhéologiques des matériaux du corps de la chaussée et le sol support est incontournable.

## 7. Présentation des matériaux utilisés dans la structure de chaussée

### 7.1. Matériaux traités aux bitumes

#### 7.1.1. Grave bitume (GB)

##### 1- Définition

Les graves-bitumes 0/20 sont des enrobés bitumineux à chaud (mélange à chaud de granulats séchés et bitume pur).

##### 2- Domaine d'utilisation

La technique des graves bitumes est destinée à la réalisation des assises de chaussée (couche de base et couche de fondation).

- Réseau RP1 : classes de trafic TPL3 à TPL7

##### 3- Constituants

###### a) Granulat

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  $I_c = 100$

Les spécifications des granulats sont données dans le Tableau 2.21 :

**Tableau 2.21 : Spécifications des granulats**

caractéristiques	seuils
<b><u>Intrinsèques :</u></b>	
LA	$\leq 25$
MDE	$\leq 20$
<b><u>Fabrication :</u></b>	
A	$\leq 25$
P	$\leq 2$

LA : los Angeles ; MDE : micro deval en présence d'eau ; A : coefficient d'aplatissement ; P: propreté

###### b) bitume :

La classe de bitume utilisée pour la fabrication des graves-bitume 0/20 est le 40/50.

- Graves bitume 0/20

### 7.1.2 Sable bitume (SB)

#### 1. Définition

Le sable bitume est un mélange d'un ou plusieurs sables avec bitume pur. Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassage-broyage (sable fillérisé, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment). Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenable. La fabrication du mélange (sable+bitume) se fait en central d'enrobage à chaud.

#### 2. Domaine d'utilisation :

L'emploi du sable bitume est envisageable en couche de base pour les chaussées du réseau principal de niveau 2 (RP2)

#### 3. Spécifications :

##### 3-1. Constituants :

##### a) Sable :

- Propreté
  - Equivalent de sable à 10% de fine (ES) >40
  - Valeur au bleu de méthylène (VBS) <0,2.
- Stabilité
  - Indice de portance Immédiat IPI  $\geq 40$

Il n'y a pas de restriction concernant la granulométrie du sable utilisé. Le sable employé devra par ailleurs contenir moins de 0,2% de matières organiques.

##### b) Bitume

Le bitume doit répondre selon l'essai de pénétrabilité et l'essai de température Bille et Anneau à une classe de 40/50 ou 20/30.

##### 3-3. Performances mécaniques :

Les performances mécaniques d'un sable bitume destiné pour une couche de base et à un trafic PL/j sur la voie la plus chargée, inférieur à 300 PL/j sont :

Résistance Duriez mini à sec en [MPa]	4
% perte max. de résistance avec immersion	40

## 7.2. Matériaux traités aux liants hydrauliques

### 7.2.1. Graves-Laitier

#### 1. Définition :

Une grave laitier est un mélange effectué en centrale de malaxage continue : d'une grave reconstituée O/D, d'un laitier granulé réactif et d'un activant basique. Ce mélange est réalisé à une teneur en eau proche à celle de l'OPM

#### 2. Domaine d'utilisation :

- Couche d'assises de chaussées (base, fondation)
- Chaussées neuves de type RP1 : réseau principal de niveau 1 (trafic : TPL3 à TPL7)

#### 3. Spécification :

##### 3.1 Constituant

##### a. Granulats :

- **Gravillons :**
- **caractéristiques intrinsèques**

PL/jour/sens		150 - 300	300 - 3000	> 3000
<b>Base</b>	<b>MDE</b>	≤25		≤20
	<b>LA</b>	≤30		≤25
<b>fondation</b>	<b>MDE</b>	≤35	≤25	≤20
	<b>LA</b>	≤40	≤30	≤25

-MDE : Micro Deval Humide      - LA : Los Angeles

##### - **Caractéristiques de fabrication :**

- Dmax = 20 mm
- Refus à 1,58D= 0%
- A ≤20
- P ≤2
- I<sub>C</sub> = 100% pour couche de base, I<sub>C</sub> = 50% pour couche de fondation

- **Sables**

- Refus à D = 1 à 15 %
- ES (10%)  $\geq$  50%

**b. Liant (laitier granule) :**

- Granularité : 0/5
- Fraiche production (moins d'un an)
- Stockages à l'abri des fines calcaires
- Coefficient de réactivité > 20
- % d'inertes (élément > 5mm) < 5%
- Tenant en eau départ d'assise < 20%

**c. Activant basique (chaux éteinte)**

- Chaud libre > 50%
- % fines (80 $\mu$ ) > 90%
- Surface spécifique Blaine (SSB) > 7000 cm<sup>2</sup>/g

**d. Eau de gâchages**

L'eau de gâchage ne doit pas trop changée ni polluée afin de ne pas empêcher la prise de la grave-laitier

## 7.2.2. Béton de ciment (BCg) « béton non armé et goujonné

### 1. Définition

Les chaussées modernes en béton peuvent se présenter sous différentes conceptions ; on peut citer les dalles courtes (3 à 5m) non armées, à joints goujonnés ou non, les dalles moyennes (5à 7m) goujonnées ou non ; les dalles épaisses (30 à 40cm) courtes et non armées, etc.

### 2. Domaine d'utilisation

- Couche de roulement et couche de base.
- Réseau principal de niveau 1 (RP1) : classes de trafic TPL3 à TPL7.

### 3. Spécification :

#### 3.1 Constituant

**a. Granulats (gravillons et sable) :**

**1. Gravillons :**

**Granulométrie :**

03 fractions granulométriques (0/5, 5/15, 15/25)

- **Caractéristiques physico-mécaniques :**

- Gravillons :
  - Coefficient d'aplatissement : A < 30%
  - Propreté : P < 2%
  - Dureté : LA < 30%
- Sable :
  - Fines (% < 80 $\mu$ ) : < 15%
  - Friabilité : Fs < 40%
  - Equivalent de sable (à 10% de fines) : Es > 60%

**b. Liant (ciment)**

• **Type de ciment :**

- Ciment Portland Artificiel (CPA).
- Ciment Portland Artificiel avec ajouts (CPJ).
- Ciment résistant aux sulfates (CRS).

• **Classe de résistance**

- 35 Mpa min. pour le ciment CPA
- 45 Mpa min. pour le ciment CPJ
- 35 Mpa min. pour le ciment CRS

La teneur en C<sub>3</sub>A (calculée selon la formule de bogue sur le clinker du ciment) doit être adoptée en fonction de la nature des granulats et de la température, et de afin de minimiser la fissuration thermique.

Nature de granulats	Température ambiante prévue sur le chantier (°C)	Teneur en C <sub>3</sub> A du ciment
Silico-calcaires	30<t<35	<6
	25<t<30	<7
	t<25	<8
Calcaires	30<t<35	<8
	25<t<30	<10
	t<25	<12

**c. Eau de gâchage**

L'eau de gâchage devra être exempte de toute matière organique et doit être conforme à la norme NF P18-301

**d. Type d'aciers**

- Les fers de liaison doivent être conformes à la norme NF A 35-016
- Les goujons doivent être conformes à la norme NF A 35-015

**7.2.3. Grave-Ciment (GC)**

**1. Définition :**

Un grave ciment est un mélange de granulat, de ciment, éventuellement de retardateur de prise, et d'eau.

**2. Domaine d'utilisation :**

- Couche de fondation de chaussée en béton de ciment
- Chaussées neuves de type RP1 : réseau principal de niveau 1 (TPL3 à TPL7)

**3. Spécifications**

**3.1 Constituants**

**a) Granulats :**

- **Gravillons :**
- **Caractéristiques intrinsèques**

PL/jour/sens		150 - 300	300 - 3000	> 3000
fondation	LA	≤35	≤25	≤20
	MDE	≤40	≤30	≤25

- MDE : Micro Deval Humide      - LA : Los Angeles

- **Caractéristiques de fabrication :**

- Dmax = 20mm
- Refus à 1,58D = 0%
- P ≤ 2
- Ic = 100% pour couche de base, Ic ≥ 50% pour couche de fondation

- **Sable**

- Refus à D = 1 à 15 %
- ES (10%) ≥ 50%

**b) Liant (ciment)**

- Type de ciment :

Ciment Portland Artificiel (CPA).

Ciment Portland Artificiel avec ajouts (CPJ).

Ciment résistant aux sulfates (CRS).

- **Classe de résistance**

- 35 Mpa min. pour le ciment CPA
- 45 Mpa min. pour le ciment CPJ
- 35 Mpa min. pour le ciment CRS

**Retardateur de prise**

Lorsque le délai de maniabilité nécessite un retardateur de prise, celui-ci est choisi par référence à la norme NF P 98-115

**Eau**

L'eau de gâchage ne doit pas être trop changée ni polluée afin de ne pas empêcher la prise de la grave-ciment

**7.3 .Matériaux non traités**

**7.3.1Grave non traitée (GNT)**

**1. Définition**

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

- Les GNT de type « A »
- Les GNT de type « B »

**2. Domaines D'utilisation**

- Couches d'assises de chaussées (couche de base et de fondation) pour le réseau RP2
- Couche de fondation pour le réseau de niveau 1 (RP1)

NB : il est recommandé de faire appel à l'utilisation des GNT de type « B » pour le réseau principal de niveau 1

**3. Caractéristiques physico-mécanique Granulométrie :** les courbes granulométriques doivent s’inscrire dans les fuseaux de spécification 0/20 et 0/31,5 définis ci-dessous.

**Fuseau 0/20**

	Tamis (mm)	31,5	20	10	6,3	4	2	0,5	0,2	0,08
Tamisat (%)	Min	100	85	55	42	32	22	11	7	4
	Max	100	99	82	70	60	49	30	20	10

**Fuseau 0/31,5**

	Tamis (mm)	40	31,5	20	10	6,3	4	2	0,5	0,2	0,08
Tamisat (%)	Min	100	85	62	40	31	25	18	10	6	4
	Max	100	99	90	70	60	52	43	27	18	10

**Indice de concassage :**  $I_c = 100\%$

**Dureté :**  $LA \leq 30\%$ ,  $MDE \leq 25\%$  en couche de base

$LA \leq 40\%$ ,  $MDE \leq 35\%$  en couche de fondation

**7.3.2. TUFs Calcaires (TUF) « encroûtements calcaires »**

**1. Définition**

Les tufs calcaires ou « encroûtements 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. On distingue deux classes de tufs, selon la granularité et leurs performances mécaniques ; il s’agit de **TUF1** et **TUF2**

**2. Domaine d’utilisation :**

- Couches d’assises (base, fondation), pour le réseau principal 2 (RP2).
- TUF1 en couche de fondation, pour le réseau principal de niveau 1 (RP1).

**3. Spécification :**

**a. Granulométrie :**

les matériaux utilisés en technique routière doivent s’inscrire dans les fuseaux 0/D définis ci-dessous :

Fuseau 0/40 pour les tufs à squelette de classe 1

- fuseau 0/20 pour les tufs fins de classe 2
- pour les tufs élaborés ; se référer aux fuseaux 0/20 et 0/31,5 de la GNT.

**Fuseau 0/40 – TUF1**

Tamis (mm)		40	20	5	2	0.4	0.08
Tamisat (%)	Min	85	62	32	22	12	4
	Max	100	88	66	52	36	22

**Fuseau 0/20 – TUF2**

Tamis (mm)		20	5	2	0.4	0.08
Tamisat (%)	Min	86	66	52	38	22
	Max	100	82	72	52	32

**b. Limites d’Atterberg :**  $WL < 40, I_p < 15$

**c. Taux de carbonates :**  $CaCO_3 \geq 45\%$

**7.3.3 Sables gypseux (SG) « encroûtements gypseux »**

**1. Définition :**

Les encroûtements gypseux sont situés dans la zone climatique IV, c’est la zone des chotts et souvent de grandes étendues dunaires. Les encroûtements gypseux se présentent généralement en couches horizontales affleurantes à subaffleurantes.

Horizon A : épaisseur varie de 20 à 30 cm. Cette partie est friable, poreuse et souvent sableuse.

Horizon B : son épaisseur varie de 1 à 2 cm. Il est souvent utilisé comme pierre de bâtir. C’est l’horizon des roses de sables.

Encroûtements friables ou « sables gypseux ». Ils se différencient des encroûtements massifs que par la dureté.

Horizon C : les encroûtements tendres : Appelés sables gypseux sont les matériaux rechercher pour l'utilisation en technique routière. Ils sont d'extraction facile et évoluent en sable au compactage.

On distingue deux classes de sables gypseux selon leur granularité et performances mécaniques. Il s'agit de **SG1** et **SG2**.

## 2. Domaine d'utilisation

- Couches d'assises (base, fondation), pour le réseau **RP2**.
- **SG1** en couche de fondation, pour le réseau **RP1**

## 3. Spécifications :

### 1. Granulométrie :

Les matériaux utilisés en technique routière doivent s'inscrivent dans les fuseaux 0/D définies ci-dessous :

- **Fuseau 0/5** : pour les sables gypseux de classe 1 : appelés SG1
- **Fuseau 0/2** : pour les sables gypseux de classe 2 : appelés SG2

#### Fuseau 0/5- SG1 :

Tamis (mm)		5	2	1	0.4	0.08
Tamisat (%)	Min	86	64	48	30	4
	Max	100	82	70	52	22

#### Fuseau 0/2-SG2 :

Tamis (mm)		2	1	0.4	0.08
Tamisat (%)	Min	84	68	50	20
	Max	100	90	74	48

2. Indice de plasticité :  $I_p \leq 10$
3. **Taux de gypse + carbonates** :  $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \geq 45\%$
4. **Résistance à la compression** :  $R_c > 15 \text{ Kg/cm}^2$  à 95% de la densité OPM et à teneur en eau nulle.

### 7.3.4 Arènes granitiques (AG)

**1- Définition :**

Les arènes granitiques proviennent de l'altération des granites aux conditions de surface. Les feldspaths s'altèrent surtout en Kaolin, les micas s'altèrent partiellement alors que les grains de quartz ne subissent aucune altération. La roche reste en place en gardant une facile cohésion. Les arènes granitiques sont très répandues dans la région du Hoggar (zone climatique) ; elles constituent la seule ressource en granulats routiers disponibles dans les conditions technico-économiques.

**2- Domaine d'utilisation**

- Couche d'assises (base, fondation) , pour le réseau RP2.

**3- Spécifications :**

**Granulométrie :**

**Fuseau 0/10 de l'arène granitique**

<b>Tamis (mm)</b>		10	5	2	0.4	0.08
<b>Tamisat (%)</b>	<b>Min</b>	10	78	50	22	4
	<b>Max</b>	100	85	66	36	18

**8. Essai triaxial à chargements répétés (TCR)**

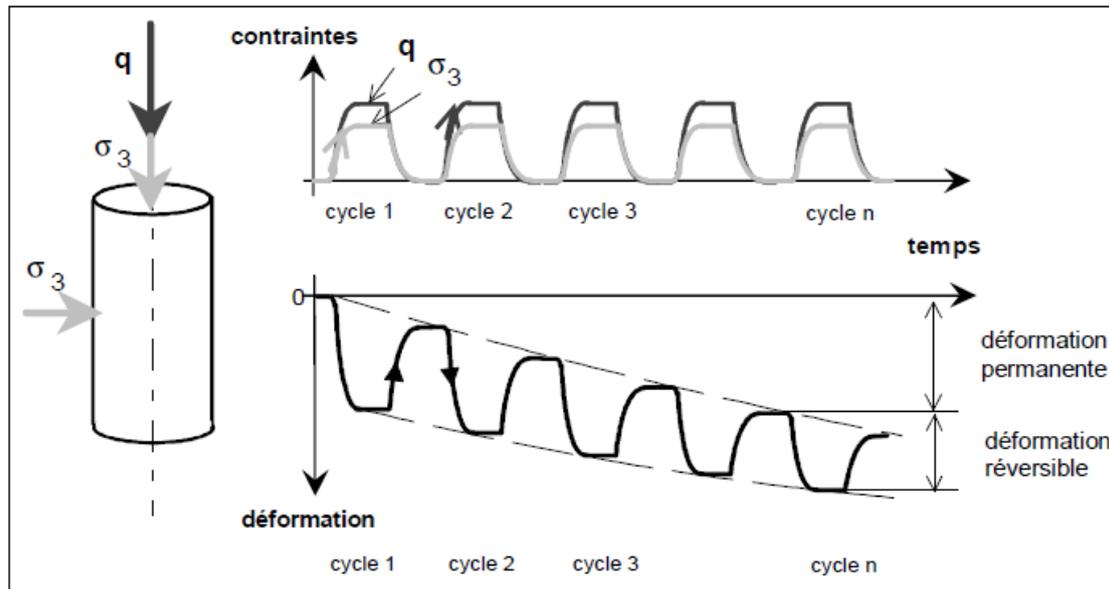
Les graves non-traitées (GNT) sont des matériaux granulaires qui possèdent une granulométrie étalée et une densité optimale pour une certaine teneur en eau. Dans le domaine de la recherche, le principal essai permettant de caractériser leur comportement mécanique est devenu l'appareil triaxial à chargements répétés de compression (Paute et Lefort, 1967).

Le chargement cyclique permet d'étudier séparément le comportement réversible et le comportement à long terme (irréversible) du matériau testé. L'étude du comportement irréversible est limitée par le fait que l'appareil triaxial ne tient pas compte de la rotation de la direction des contraintes principales. Afin de conserver l'état initial de contraintes pour un échantillon testé, des cellules triaxiales de dimensions plus grandes ont été réalisées et des nouvelles procédures d'essai ont été mises au point en 2003 par Horny et Gidel [11].

Les éprouvettes testées sont fabriquées par vibro compression selon la norme NF P 98- 230-1. Elles sont de forme cylindrique et ont un diamètre de 160 mm et une hauteur de 320 mm. Dans un essai triaxial, l'éprouvette est soumise a une pression de confinement ' $\sigma_3$ ' et a une contrainte

axiale “ $\sigma_1$ ”. Les contraintes appliquées sont définies en terme de contrainte moyenne “ $p$ ” et de contrainte déviatorique “ $q$ ” de la manière suivante :

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{et} \quad p = (\sigma_1 + 2.\sigma_3)/3$$



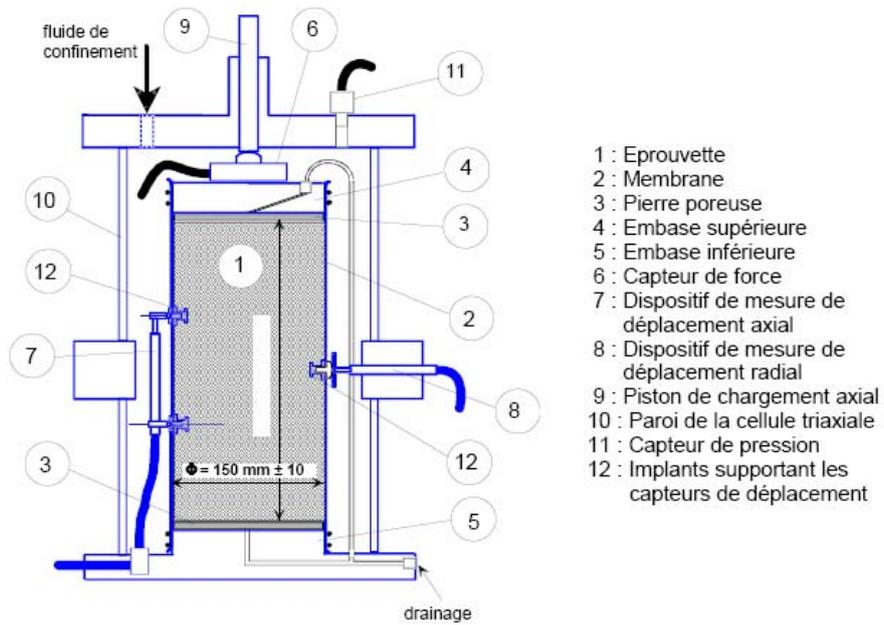
**Figure 2.2.** Action de contraintes sur une éprouvette.

Les invariants de contraintes  $\epsilon_v$  et  $\epsilon_q$  pour le cas axisymétrique sont définis de la même manière :

$$\epsilon_v : \text{déformation volumique} \quad \epsilon_v = \epsilon_1 + 2. \epsilon_3 \quad (2)$$

$$\epsilon_q : \text{déformation déviatorique} \quad \epsilon_q = 2.(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3 \quad (3)$$

Le chargement cyclique suivant différents chemins de contraintes, est réalisé grâce à un système pneumatique. La figure 2.3 présente l'appareil et les dispositifs de mesures de déformations.



**Figure 2.3.** Cellule triaxiale de l'appareil TCR d'après Hornykh [25]

## **CHAPITRE III : MODELISATIONS DES STRUCTURES DES CHAUSSEES**

### **Introduction :**

Les structures de chaussées souples sont généralement constituées par un empilement de couches horizontales de différents matériaux. Les modèles de calcul les plus utilisés dans la pratique pour l'analyse et le dimensionnement des chaussées souples restent les modèles élastiques multicouches qui se basent sur la théorie de BURMISTER

### **1. Calcul linéaire :**

Nous allons essayer dans ce qui va suivre, de présenter en bref le calcul linéaire en se basant sur le logiciel ALIZE-LCPC [3].

En effet, le logiciel ALIZE-LCPC est le programme de référence utilisé pour les calculs de dimensionnement des chaussées. Il permet de réaliser les calculs des sollicitations créées par le trafic dans ces structures, calculs indispensables à la mise en œuvre de la méthode de dimensionnement rationnel des chaussées neuves et des renforcements, élaborée par le LCPC et le SETRA dès la fin des années 70. Le noyau théorique du programme repose sur la solution au problème du multicouche élastique linéaire isotrope, proposée par D. Burmister [9].

En effet, ALIZE-LCPC permet la simulation et le dimensionnement des structures routières et autoroutières, et il s'applique également aux chaussées spéciales (comme celles réservées à la circulation de véhicules exceptionnels, d'engins industriels ou portuaires), aux chaussées aéronautiques, etc.

### **1.1. Structure et fonctionnalités du logiciel :**

Le logiciel Alizé-LCPC met en œuvre la méthode rationnelle de dimensionnement mécanique des structures de chaussées, développée par le LCPC et le SETRA.

L'architecture globale du programme s'articule autour d'une interface Homme-machine (Ihm) pour la saisie des données et la présentation des résultats, et d'un moteur de calcul pour le calcul mécanique des sollicitations dans la structure de chaussées.

L'interface homme-machine est développée sous Visual-basic Edition professionnelle 6.0. Cette interface assure :

- la saisie de l'ensemble des données nécessaires à la mise en œuvre de méthode rationnelle ;
- la présentation des résultats des calculs sous forme de Tableaux et/ou de graphiques ;
- l'affichage et la gestion de la bibliothèque des matériaux ;
- l'affichage d'un ensemble d'écrans d'aide, visant à assister l'utilisateur dans le choix pratique des hypothèses et des valeurs numériques à affecter aux différents paramètres de calcul, en fonction des spécificités du projet étudié.

Le moteur de calcul développé en Fortran 90 sous Digital Visual-Fortran Edition professionnelle, sous la forme d'une librairie à lien dynamique (Dynamic link library Dll).

#### **1.1.1. Description du moteur de calcul Alizé**

Le moteur de calcul permet la détermination des sollicitations créées par le trafic dans les différentes couches de matériaux constituant le corps de la chaussée. Il met en œuvre le modèle de Burmister. Ce modèle s'appuie sur la modélisation mécanique de la structure par un massif semi-infini, constitué d'une superposition de couches de matériau d'épaisseur constante, à comportement élastique linéaire isotrope. Les paramètres descriptifs du comportement mécanique de chaque matériau sont donc au nombre de deux : le module de déformation  $E$  et coefficient de Poisson  $\nu$ .

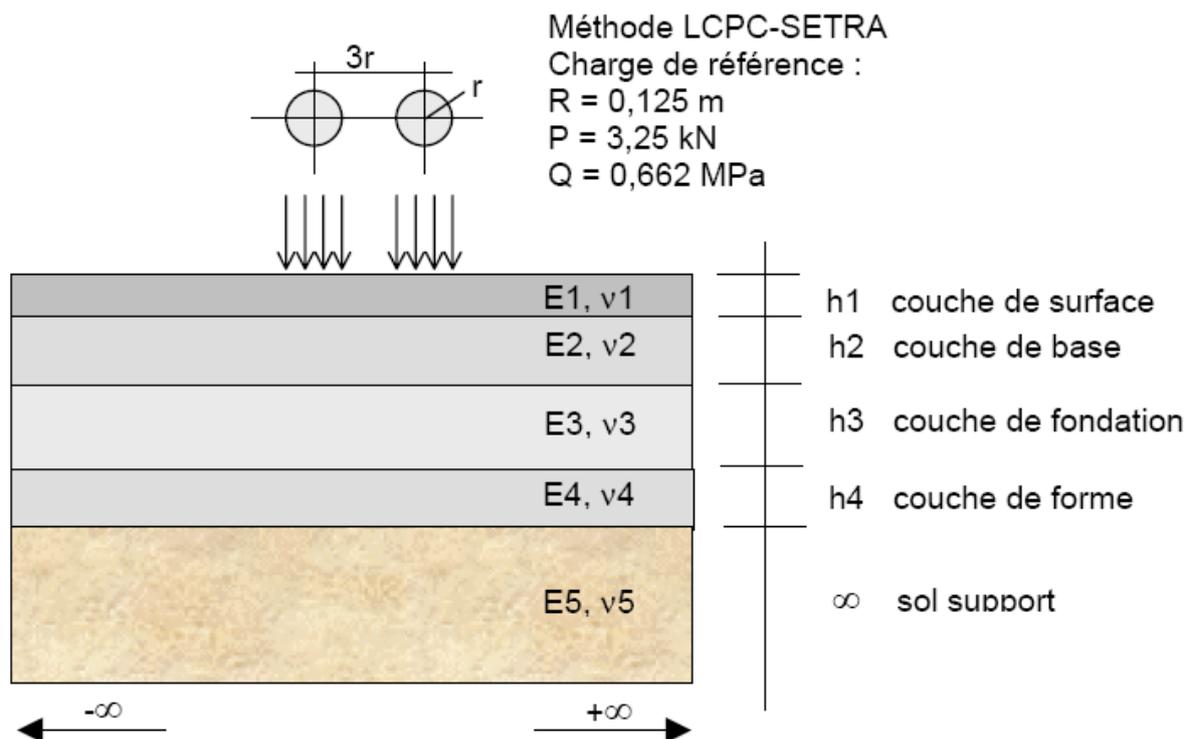
Chaque interface entre couches adjacentes peut être prise collée, ou glissante, ou semi-collée.

Le chargement appliqué par les charges roulantes à la surface de la chaussée est représenté par un ensemble de disques circulaires, chargé chacun par une pression verticale uniforme et statique.

Toutes les combinaisons de charges élémentaires circulaires de ce type sont possibles. Ceci permet de reproduire les silhouettes d'essieu, de bogie, de véhicule ou d'ensemble de véhicules les plus diverses.

Dans les opérations de dimensionnement courant, un chargement unique, désigné chargement de référence, est en général appliqué à la surface du modèle (voir Figure 3.1). Ce chargement de référence est propre au cadre dans lequel la méthode de dimensionnement rationnel est appliquée.

Par exemple, le jumelage de 65 kN (3,25 kN par roue, pression de contact 6,62 Mpa) constitue sauf cas particulier, la charge de référence pour le dimensionnement des structures de chaussée des réseaux routiers et autoroutiers. Dans certaines applications de dimensionnement de chaussées aéronautiques, la charge de référence sera la roue isolée de charge 30 kN, etc.



**Figure 3.1** : Illustration d'un modèle type de calcul.

Le modèle de calcul donne accès, potentiellement, aux tenseurs complets de contraintes et de déformations, ainsi qu'aux trois composantes de déplacement, en tout point de la structure. En utilisation courante, les résultats du modèle strictement nécessaires au dimensionnement se

réduisent à la sollicitation maximale  $S_{maxj}$  supportée par chaque couche de matériau d'indice  $j$  ( $j = 1$  pour la couche de surface à  $j = n_c$  pour le sol support).

Suivant la nature du matériau concerné,  $S_{maxj}$  représente la grandeur suivante :

**Tableau 3.1 : Définitions de  $S_{maxj}$  par rapport les différentes natures des matériaux**

Nature de matériau n°j	Définition de $S_{maxj}$
<b>Matériau hydrocarboné</b>	Valeur de la déformation d'extension horizontale maximale $\epsilon_{tmaxj}$
<b>Matériau traité au liant hydraulique et béton</b>	Valeur de la contrainte de traction horizontale maximale $\sigma_{tmaxj}$
<b>Matériau non traité et sol</b>	Valeur de la déformation de compression verticale maximale $\sigma_{tmaxj}$

### 1.1.2. Interface Homme-machine : principales fonctionnalités

L'interface Homme-machine assure les principales fonctionnalités suivantes :

- Saisie des données pour le calcul mécanique ;
- Présentation de résultats d'un calcul mécanique ;
- Calcul des valeurs admissibles ;
- Gestion de la bibliothèque des matériaux ;
- Ecrans d'aide.

### 1.2. Démarche générale du dimensionnement rationnel des chaussées

En utilisation courante, la démarche générale du dimensionnement rationnel des chaussées s'articule selon les trois phases principales suivantes :

#### 1.2.1. Le choix du type de structure et des matériaux qui la composent

Ce choix est fonction du cadre et des spécificités du projet étudié. La structure de chaussée peut être de type flexible, bitumineuse épaisse, semi-rigide, rigide, mixte ou inverse. A chaque type de structure est associé l'emploi possible de matériaux, répartis eux même en cinq familles : les matériaux hydrocarbonés, les matériaux traités aux liants hydrauliques, les bétons, les matériaux non traités et les sols.

### **1.1.3. La détermination des sollicitations admissibles dans les différents matériaux**

Le calcul des sollicitations admissibles dans les différents matériaux constituant la structure de chaussée découle des deux modèles d'endommagement sur lesquels est fondée la méthode rationnelle :

2.1- pour les matériaux traités (hydrocarbonés, traités aux liants hydrauliques et les bétons) : le modèle adopté est le modèle d'endommagement par fatigue sous les sollicitations répétées de traction par flexion exercées par le trafic (modèle de Wöhler). La sollicitation admissible est une fonction décroissante avec le nombre de chargements appliqués par le trafic, elle s'exprime sous la forme générale :

$$\sigma_{adm} = A \cdot P \cdot N^b$$

A et b = paramètres descriptifs du comportement à la fatigue du matériau, résultant d'essais de fatigue sur éprouvettes en laboratoire ( $b < 0$ ).

P = coefficients additionnels pour la prise en compte de différents facteurs, non reproduits par les résultats bruts des essais de fatigue en laboratoire.

N = nombre de passages des charges roulantes (ie. trafic cumulé) sur toute la durée de service assignée à la chaussée.

2.2- pour les matériaux non traités (graves non traitées et sols) : le modèle adopté est le modèle d'endommagement par accumulation des déformations plastiques irréversibles (orniérage), résultant des sollicitations de compression verticale exercées par le trafic. L'expression des sollicitations de compression verticale admissibles ne découle pas directement d'essais en laboratoire, mais de considérations d'origine empirique :

$$\sigma_{zadm} = A \cdot N^b$$

A et b = paramètres d'origine empirique, indépendant du matériau non traité considéré, mais variant en pratique selon la nature de la chaussée et l'intensité du trafic (chaussée neuve ou renforcement, trafic faible ou fort, ...).

N = nombre de passages des charges roulantes.

### **1.2.2. La détermination des sollicitations admissibles dans les différents matériaux**

#### **a. La détermination des épaisseurs des différentes couches de matériaux.**

Les sollicitations créées par les charges roulantes dans les différentes couches de matériaux sont calculées à l'aide du modèle multicouches élastique linéaire de Burmister.

$S_{maxj}$  désigne la sollicitation la plus élevée, au sens des critères d'endommagement définis plus haut, supportée par la couche de matériau n°j.

La détermination de l'épaisseur de chaque couche de matériau repose sur la vérification du critère de non rupture du matériau considéré pendant la durée de service de la chaussée, à savoir :

$$S_{maxj} \leq S_{admj}$$

$S_{maxj}$  : sollicitation maximale créée par le trafic dans la couche de matériau n°j, au sens du mode d'endommagement attaché au type de matériau considéré (traction horizontale par flexion ou compression verticale) ;

$S_{admj}$  : sollicitation admissible par le matériau.

La détermination finale des épaisseurs  $H_j$  des différentes couches de matériaux constituant la structure de chaussée n'a pas, en général, de solution directe (absence de solution explicite  $\{H_j = f(N)\}$ ). Elle s'effectue le plus souvent suivant une démarche itérative inverse, schématisée ci-dessous.

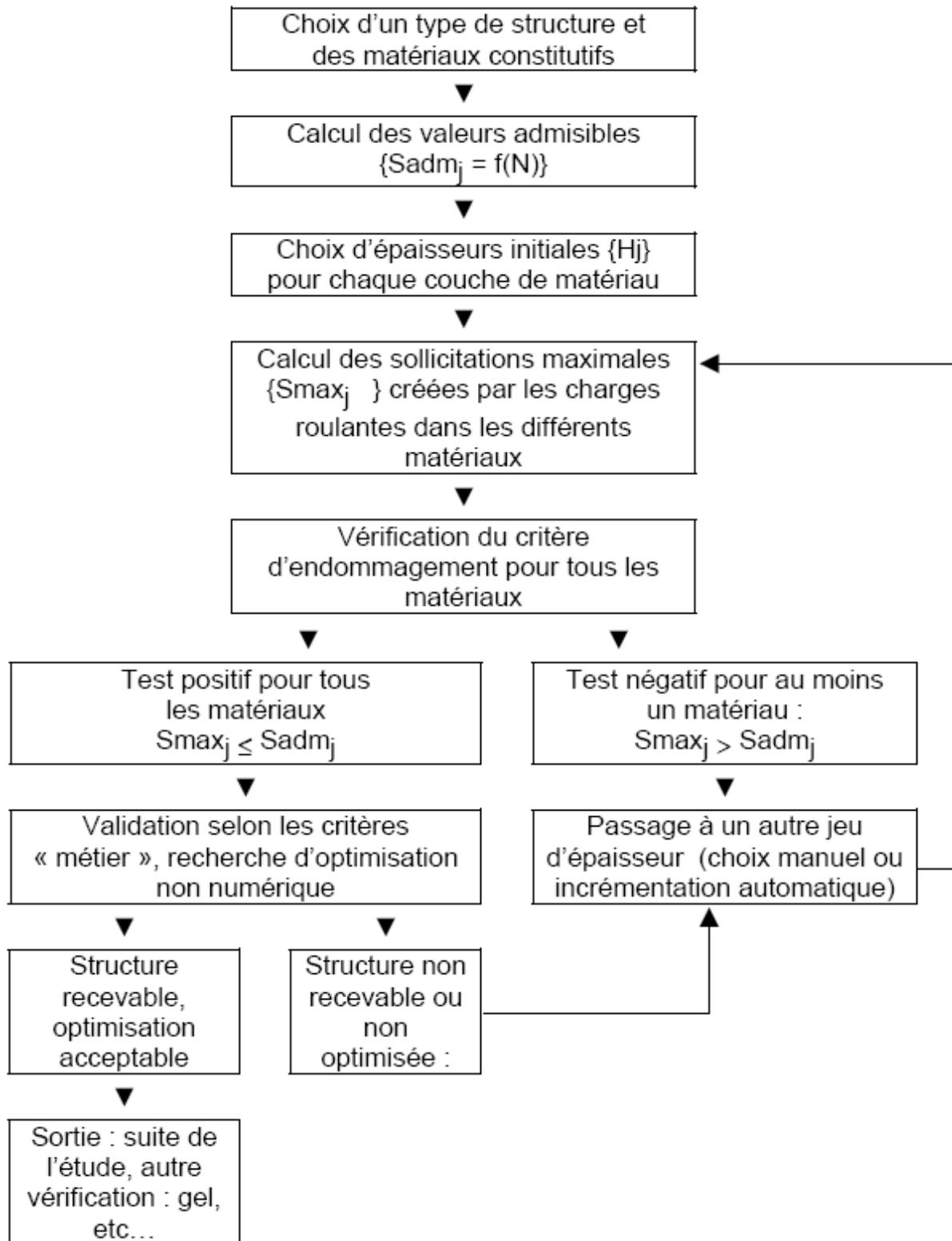


Figure 3.2 : Démarche générale du dimensionnement mécanique

La solution numérique au problème posé n'est pas, par ailleurs, unique. Le choix final fait aussi appel à des considérations technologiques (par exemple, épaisseurs minimales et maximales des couches suivant le matériau, suivant la classe de trafic, etc.), et empiriques (par exemple, épaisseur des couches de surface).

### 1.3.Principe de modélisation de la structure de chaussée

La modélisation de la chaussée pour les calculs mécaniques selon la démarche du dimensionnement rationnel s'appuie sur la représentation de la structure par un massif multicouche à comportement élastique, isotrope et linéaire [17, 34].

Les différentes couches de matériau constituant la structure possèdent une épaisseur constante, et leur extension dans le plan horizontal XOY est infinie. De plus, l'extension selon la direction verticale ZZ de la couche inférieure du massif multicouche, représentant en général le substratum ou le sol support, est supposée infinie. La description du fonctionnement mécanique des différentes couches constituant la chaussée se ramène finalement aux paramètres suivants :

- l'épaisseur  $H$  ;
- le module d'Young  $E$  du matériau ;
- le coefficient de Poisson du matériau (noté  $\nu$  dans Alizé-LCPC) ;
- les conditions d'interface au sommet et à la base de la couche, caractérisant le type de contact avec les couches adjacentes supérieure et inférieure.

Le modèle prévoit trois types de contact possibles pour caractériser le fonctionnement de l'interface entre couches adjacentes : collée, glissante, ou semi-collée. L'interface de type semi-collé est préconisée par le guide technique Conception et dimensionnement des structures de chaussées, pour caractériser le contact entre certaines couches de matériaux traités aux liants hydrauliques. Dans cette situation d'interface semi-collée, Alizé enchaîne automatiquement et de façon transparente à l'utilisateur, deux calculs successifs, le premier avec l'hypothèse de contact collé, le second avec l'hypothèse de contact glissant. Les résultats présentés correspondent à la moyenne entre ceux obtenus avec l'hypothèse d'interface collée, et ceux obtenus avec l'hypothèse d'interface glissante.

## **Conclusion**

Alizé-LCPC met en œuvre la méthode rationnelle de dimensionnement mécanique des structures de chaussées

La vocation première de la méthode rationnelle est d'encadrer les opérations de dimensionnement des chaussées neuves routières et autoroutières, pour toutes les classes de trafic (des chaussées à faible trafic aux chaussées à fort trafic).

Par ailleurs, la démarche générale du dimensionnement rationnel fait l'objet de diverses transpositions, visant son adaptation à d'autres types de dimensionnement : autres trafics (par exemple porteurs industriels, charges aéronautiques, ...), autres problématiques de dimensionnement (par exemple renforcement de chaussées endommagées, ...).

Le logiciel Alizé s'applique également à ces utilisations particulières, sans que ses modalités de mise en œuvre soient, dans ce cas, totalement encadrées par une méthode officielle.

Dans tous les cas, le logiciel facilite la réalisation pratique des calculs numériques nécessaires au dimensionnement des structures de chaussées. Cependant, le dimensionnement des structures de chaussées déborde largement ces aspects numériques. Il reste une affaire de spécialiste de la mécanique des chaussées, auquel le logiciel n'a, en aucune façon, l'ambition de se substituer.

## 2. Calcul non linéaire équivalent :

### 2.1. Comportement non linéaire des graves non traitées GNT :

Dans la présente partie, nous nous proposons d'étudier la loi de comportement des matériaux granulaires formulée par Boyce [6, 35]. Le choix de cette loi a été motivé d'une part, par sa simplicité de formulation, et d'autre part, par une meilleure corrélation avec les résultats expérimentaux des essais effectués à l'appareil triaxial à chargements répétés (TCR) [8, 30].

#### 2.1.1. Les mesures de déformations réversibles :

Les essais de déformation réversible ont été mis au point au Laboratoire des Ponts et Chaussées sur l'appareil triaxial à chargements répétés, les contraintes latérales étant variables (essais C.L.V.). Les résultats sont donnés sous forme de Tableaux où figurent les valeurs mesurées des déformations  $\mathcal{E}_v$  et  $\mathcal{E}_q$  en fonction des contraintes  $p$  et  $q$  correspondantes.

Une méthode d'ajustement, régulièrement améliorée, est proposée par J.L. Paute [25]. Elle est basée sur l'hypothèse d'un comportement isotrope des G.N.T. et consiste à effectuer des ajustements non-linéaires sur les mesures de  $\mathcal{E}_q$ , puis sur celles de  $\mathcal{E}_v$ . Cette méthode donne souvent des résultats satisfaisants.

#### 2.1.2. Lois de comportement des graves non-traitées

##### a. Principales caractéristiques des essais

L'analyse des résultats d'essais sur des G.N.T., montre qu'en déformation réversible, ces matériaux ont des comportements que l'on peut caractériser de la façon suivante :

- l'augmentation des rigidités volumétrique (ou module de compressibilité) et de cisaillement (ou module de cisaillement) avec la contrainte moyenne  $p$ .

On peut admettre qu'elles sont proportionnelles à  $p^{1-n}$ .

- La rigidité volumétrique (ou module de compressibilité) augmente lorsque le taux de cisaillement  $q/p$  augmente.

**b. Loi de Boyce**

Le matériau décrit par cette loi est supposé élastique pour permettre de caractériser le domaine des déformations réversibles. La non-linéarité est exprimée par une rigidité fonction de l'état de contrainte, ce qui est différent de la relation contraintes-déformations existant dans n'importe quel matériau pendant la transition de l'état élastique à l'état plastique. Notons ici que le modèle n'inclut pas de critère de rupture [6,35].

Dans un matériau élastique isotrope les états de déformations sont liés aux états de contraintes par la relation de Hooke généralisée [33], résumée par :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{3\nu}{E} p \delta_{ij} \quad (3.1)$$

où les  $\epsilon_{ij}$  sont les composantes du tenseur de déformations,  $p$  étant la contrainte moyenne et  $\sigma_{ij}$  les composantes du tenseur des contraintes.

Dans le cas d'un matériau élastique non-linéaire, on suppose que  $E$  et  $\nu$  sont des fonctions des invariants de contraintes  $p$  et  $q$ , définis de façon générale par :

$$P = \frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) \quad (3.1)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)} \quad (3.3)$$

Dans le cas des contraintes principales (cas d'un essai triaxial par exemple) les expressions de  $p$  et  $q$  se réduisent simplement pour les contraintes à :

$$P = \frac{1}{3} (\sigma_1 + 2 \sigma_3) \quad (3.4)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3.5)$$

La rigidité du matériau peut être caractérisée à l'aide des modules  $K$  et  $G$  qui sont reliés aux déformations par les relations classiques :

$$K = \frac{P}{\varepsilon_v} \quad (3.6)$$

$$G = \frac{q}{3 \varepsilon_q} \quad (3.7)$$

Les relations de Boyce donnent les variations de ces modules en fonction de  $p$  et de  $q$  :

$$K = K_1 p_{1-n} \left[ 1 - \beta \left( \frac{q}{p} \right)^2 \right]^{-1} \quad (3.8)$$

$$G = G_1 p_{1-n} \quad (3.9)$$

Où  $K_1$ ,  $G_1$  et  $n$  sont les paramètres intrinsèques du modèle, la valeur de  $\beta$  est donnée par :

$$\beta = \frac{(1-n)K_1}{6 G_1} \quad (3.10)$$

Ces relations n'expriment que la rigidité du matériau définie par les modules  $K$  et  $G$  croît avec l'augmentation de la contrainte sphérique. Le terme  $D(q/p) = [1 - \beta (q/p)^2]^{-1}$  peut être interprété comme un terme de dilatance, et traduit l'influence du rapport des contraintes  $p/q$  sur le module  $K$ . Il a été introduit pour des considérations théoriques, pour que les déformations réversibles dérivent d'un potentiel [Boyce, 1976]. Dans ce cas, les fonctions  $K$  et  $G$  ne peuvent être quelconques et doivent vérifier la condition définie par :

$$p \frac{\partial}{\partial q} \left( \frac{1}{K} \right) = q \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{1}{3G} \right) \quad (3.11)$$

### c. Quelques considérations théoriques

L'application d'une relation de comportement au calcul de structures, plus particulièrement aux calculs par éléments finis en déplacement, impose certaines conditions.

Dans le cas d'une formulation sécante par la loi de Hooke, la matrice d'élasticité  $[D]$  reliant déformations et contraintes, doit être définie positive. En d'autres termes, il faut que ses valeurs propres soient positives [33, 34].

La matrice d'élasticité  $[D]$  est bien définie dans le cas d'un matériau isotrope par deux coefficients qui sont le module d'élasticité  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$ . Les valeurs propres  $\lambda_i$  de cette matrice sont :

$$\lambda_1 = \frac{(1-2\nu)}{E} \quad ; \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1+\nu}{E} \quad ; \quad \lambda_4 = \lambda_5 = \lambda_6 = \frac{2(1+\nu)}{E} \quad (3.12)$$

Ainsi, la condition de non-singularité de la matrice d'élasticité se traduit par :

- le module de Young  $E$  doit être strictement positif
- le coefficient de Poisson  $\nu$  doit être inférieur à 0.5

Ces deux conditions, qui sont tout à fait raisonnables, ont pour effet de limiter sensiblement le choix et le domaine de validité des fonctions non-linéaires de rigidité  $K = f(p, q)$  et  $G = g(p, q)$ .

### d. Module d'élasticité

#### - Formulation

L'expression du module de Young  $E$  en fonction de  $K$  et  $G$ , est donnée par la relation classique générale [6] :

$$E = \frac{9 K G}{3 K + G}$$

En remplaçant dans cette relation  $K$  et  $G$  par les expressions de Boyce, il vient alors :

$$E = \frac{9 G_1 p^{1-n}}{3 + \frac{G_1}{K_1} \left[ 1 - \beta \left( \frac{p}{q} \right)^2 \right]} \quad (3.13)$$

## e . Coefficient de Poisson

### - Formulation

Le coefficient de Poisson  $\nu$  est obtenu de façon générale, pour un matériau élastique isotrope, en fonction des modules  $K$  et  $G$  par :

$$\nu = \frac{3K - 2G}{6K + 2G}$$

En introduisant les expressions de Boyce, on peut écrire le coefficient  $\nu$  de façon plus explicite sous la forme :

$$\nu = \frac{\frac{3}{2} - \frac{G_1}{K_1} \left[ 1 - \beta \left( \frac{q}{p} \right)^2 \right]}{3 + \frac{G_1}{K_1} \left[ 1 - \beta \left( \frac{q}{p} \right)^2 \right]} \quad (3.15)$$

## 2.2. Calcul linéaire et non linéaire équivalent des chaussées souples

### Introduction

Dans le cas d'une modélisation élastique linéaire du comportement d'une chaussée souple, la rigidité d'une couche de GNT est supposée constante et est fixée empiriquement sur la base d'essais expérimentaux où encore en fonction des rigidités des couches sous-jacentes [14,16]. Toutefois des essais mécaniques effectués sur les GNT à l'aide de l'appareil triaxial à chargements répétés ont révélé un comportement élastique non-linéaire dépendant fortement de l'état de contrainte [6,14, 21].

On peut utiliser une approche simplifiée par un modèle non linéaire équivalent basé sur une linéarisation du comportement des matériaux granulaires utilisés dans les structures des chaussées.

C'est pourquoi nous avons jugé utile pour les simulations suivantes de procéder à une comparaison des résultats de l'analyse d'une structure de chaussée souple en utilisant successivement les deux hypothèses de comportement linéaire et non linéaire-équivalent des GNT.

### 2.2.1 - Calcul linéaire

La simulation est réalisée sur la structure multicouche suivante :

- couche de béton bitumineux :

$$h_b=0.06 \text{ m} \quad E_b=4000 \text{ MPa} \quad \nu_b=0.35$$

- couche de GNT1 (base)

$$h_1=0.20 \text{ m} \quad E_1=500 \text{ MPa} \quad \nu_1=0.25$$

- couche de GNT2 (fondation)

$$h_2=0.15 \text{ m} \quad E_2=312.5 \text{ MPa} \quad \nu_2=0.25$$

- sol-support :

$$h_3=5 \text{ m} \quad E_3=125 \text{ MPa} \quad \nu_3=0.35$$

La charge a pour intensité 676 kPa et est appliquée sur un cercle de 0.35 m de diamètre.

Le rayon du massif est de 4 m.

Le Tableau suivant illustre les résultats donnés par le logiciel ALIZE :

**Tableau 3.2 :** Valeurs des paramètres de dimensionnement (hypothèse linéaire)

Paramètres	Calcul linéaire
W (mm)	0.6
$\epsilon_{rr} (10^{-6})$	-155.
$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	640.

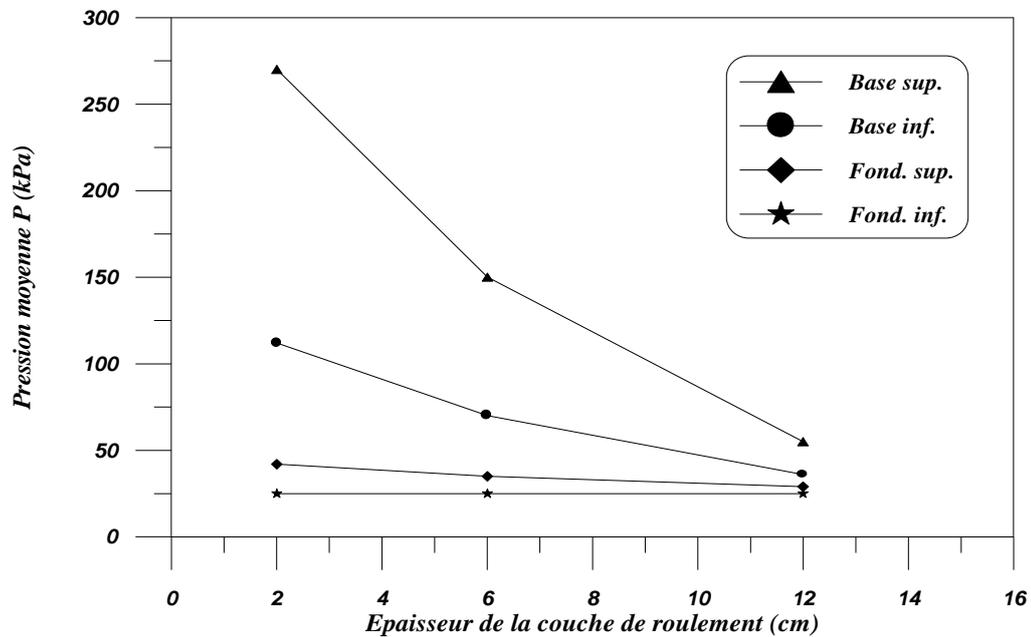
### 2.2.2- Calcul non linéaire équivalent : Methodologie et exemple de calcul

Afin d'approcher le comportement non-linéaire des chaussées souples par un calcul linéaire simplifié d'une part, et de réduire les écarts enregistrés entre les valeurs des paramètres de dimensionnement des chaussées d'autre part. On se propose de faire un calcul non linéaire équivalent plus réaliste que le calcul linéaire conventionnel, en choisissant des caractéristiques élastiques issues de l'essai triaxial à chargements répétés. Pour cela, on considère des modules d'élasticité et des coefficients de Poisson constants par couche, calculés à partir du modèle de Boyce.

Pour tenir compte de la variation de la pression moyenne (p) dans les deux couches granulaires (base et fondation), on subdivise chaque couche en deux sous-couches. La

variation de (p) dans les couches granulaires en fonction de l'épaisseur de la couche de roulement est donnée par l'abaque ci-dessous (figure 3.2).

Les valeurs des modules d'élasticité et des coefficients de Poisson relatifs au grave non-traité considéré (GNT Cap) sont regroupées dans le Tableau 3.2 :



**Figure 3.3 :** Variation de la pression moyenne en fonction de l'épaisseur de la couche de roulement

**Tableau 3.3 :** Modules de rigidité et coefficient de Poisson proposés pour un calcul non linéaire équivalent (pour une épaisseur de couche bitumineuse égale à 6cm).

Sous-couches	P (kPa)	q/p	E (MPa)	v
Base Sup.	150	2	337	0.17
Base Inf.	71	2	223	0.17
Fondation Sup.	35.6	2	152	0.17
Fondation Inf.	25	2	125	0.17

Pour un calcul non linéaire-équivalent le comportement des matériaux granulaires est modélisé en utilisant la loi non-linéaire de Boyce, dont les paramètres sont donnés dans la référence [44]:

$$K_a=104 \text{ MPa} \quad G_a=125 \text{ MPa} \quad n = 0.45$$

Les valeurs des paramètres de dimensionnement calculées sous l'axe de chargement pour le comportement considéré est regroupées dans le Tableau 3.3.

Dans ce Tableau,  $W$  désigne la déflexion de surface,  $\epsilon_{rr}$  la déformation radiale à la base de la couche bitumineuse et  $\epsilon_{zz}$  la déformation verticale au sommet du sol-support.

**Tableau 3.4 :** Valeurs des paramètres de dimensionnement pour un calcul non linéaire équivalent

Paramètres	Calcul non linéaire-équivalent
$W$ (mm)	0.80
$\epsilon_{rr} (10^{-6})$	-225.
$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	709.

On peut immédiatement noter des écarts considérables entre les valeurs des critères de dimensionnement calculés en utilisant dans un premier cas l'hypothèse de comportement linéaire pour la grave non-traitée considérée et dans un deuxième cas l'hypothèse non-linéaire.

Les écarts entre les valeurs des critères de dimensionnement calculées en utilisant les deux hypothèses de comportement sont considérables, ce qui peut affecter sensiblement la durée de vie théorique de la chaussée. En d'autres termes l'hypothèse d'élasticité linéaire du comportement des matériaux granulaires tend à surestimer de façon significative la durée de vie théorique de la chaussée.

**Tableau 3.5 :** Comparaison des résultats entre les deux modèles de calcul (linéaire et non linéaire-équivalent)

Paramètres	Calcul linéaire	Calcul non linéaire-équivalent	Ecart
$W$ (mm)	0.6	0.80	25.00%
$\epsilon_{rr} (10^{-6})$	-155.	-225.	31.11%
$\epsilon_{zz} (10^{-6})$	640.	709.	9.73%

## **CHAPITRE IV**

### **ETUDE PARAMETRIQUE**

## **CHAPITRE IV : ETUDE PARAMETRIQUE**

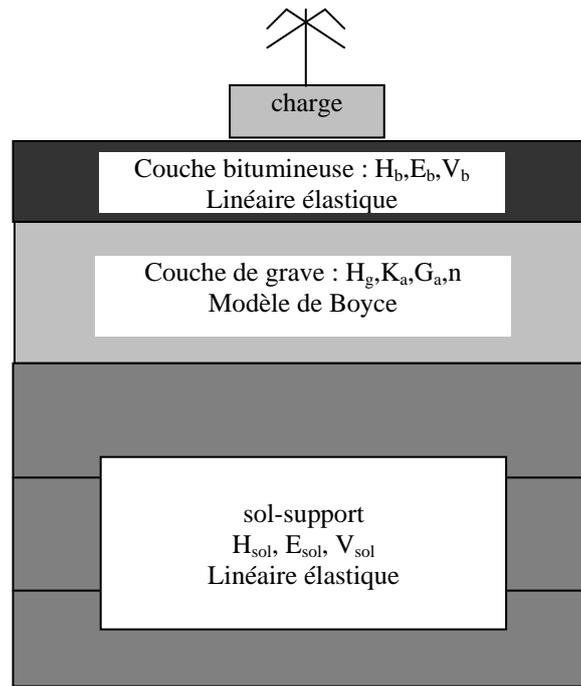
### **Introduction**

L'objectif fondamental de l'étude paramétrique est de mieux appréhender la sensibilité des critères de dimensionnement aux variations possibles des dimensions et des rigidités des couches de chaussée. Cette étude est réalisée sur plusieurs structures de chaussée comportant des couches de roulement en béton bitumineux. Ces structures de chaussée sont analysées en faisant varier de manière adéquate les dimensions des différentes couches constituant la chaussée, ainsi que les caractéristiques mécaniques des matériaux. Afin d'illustrer l'effet de la variation de la rigidité du sol-support de chaussée sur les différents critères de dimensionnement.

Les résultats des simulations permettent, entre autres, d'établir des comparaisons entre les valeurs des critères de dimensionnement pour différentes structures de chaussées. L'étude souligne également la nécessité d'avoir une bonne connaissance des performances réelles des matériaux constitutifs ce qui permet leur utilisation rationnelle dans les structures de chaussées et la réduction substantielle du coût de construction des routes.

### **1. Structures de chaussées souples analysées**

Les structures de chaussées analysées sont représentées essentiellement par des chaussées souples comportant une couverture bitumineuse (couche de roulement), une ou plusieurs couches de grave non - traitée (corps granulaires en couche de base et fondation) et une plate forme de sol support reposant sur un substratum rocheux rigide. Le modèle de structure de chaussée souple analysée peut être typiquement représenté par la figure 4.1.



**Figure 4. 1 :** *Modèle de structure de chaussée analysée*

Compte tenu de l'importance du paramètre d'épaisseur de couches des structures de chaussées sur les critères de dimensionnement, trois épaisseurs de la couche bitumineuse sont considérées :

$$H_b = 0.04\text{m}, 0.06\text{m}, 0.10\text{m}.$$

De manière analogue, les épaisseurs du grave sont fixées comme suit :

$$H_g = 0.26\text{m}, 0.35\text{m}, 0.44\text{m}.$$

Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés sont présentées dans la sous-section suivante.

Les paramètres du modèle de Boyce pour la GNT cap sont :

$$K_a = 104\text{MPa} \quad G_a = 125\text{MPa} \quad n = 0.45$$

## 2. Caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs

Les valeurs des modules de rigidité de la couche du béton bitumineux présentent également une importance considérable sur le comportement mécanique des chaussées souples. Trois valeurs de module sont considérées à cet effet :  $E_b = 1600, 4000$  et  $6400$  MPa. Ces valeurs

peuvent être considérées respectivement comme représentatives de modules relativement faible, moyen, et élevé. Le coefficient de Poisson considéré fixe dans cette étude par **0,35**.

Le comportement du béton bitumineux est supposé élastique linéaire, hypothèse couramment admise dans la pratique. Le modèle de type Boyce est utilisé pour la modélisation du comportement non-linéaire réversible des graves non traitées [13, 15, 18, 25, 32].

### 3. Investigations numériques

Afin d'illustrer le caractère décisif des variables fondamentales de dimensionnement sur le comportement mécanique des chaussées souples, plusieurs structures caractérisées par des épaisseurs de couches et par des modules de rigidités variables sont analysées. Ces caractéristiques sont choisies de sorte à couvrir la plage des valeurs courantes des propriétés géométriques et mécaniques des matériaux constitutifs des chaussées. Comme indiqué précédemment, l'objectif fondamental de l'étude est de mieux appréhender la sensibilité des critères de dimensionnement aux variations possibles des dimensions et des rigidités des couches de chaussée.

Les résultats des simulations sont établis par rapport à une structure de référence constituée d'une couche bitumineuse de 0.06 m d'épaisseur et de module de rigidité de 4000 MPa , d'une GNT Cap et d'un sol-support .

### 4. Résultats et discussions

Les résultats des analyses exprimant les variations des valeurs de critères de dimensionnement en fonction des variables fondamentales sont résumées dans le Tableau 4.2. Dans ce Tableau,  $w$  désigne la déflexion de surface,  $\epsilon_{rr}$  la déformation radiale à la base de la couche bitumineuse sous l'axe de chargement et  $\epsilon_{zz}$  la déformation verticale au sommet du sol-support.

Il est rappelé que  $H_b$  et  $E_b$  représentent respectivement l'épaisseur et la rigidité de la couche du béton bitumineux.  $H_b$  varie de 0.04 m à 0.10 m par rapport à une épaisseur de référence fixée à 0.06 m, alors que le module de la couche bitumineuse  $E_b$  varie de 1600 MPa à 6400 MPa par rapport à une valeur du module de rigidité de référence prise égale à 4000 MPa. De manière analogue,  $H_g$  et  $E_g$  désignent respectivement l'épaisseur et le module de rigidité du grave considérée.

Les variations sont exprimées par rapport à une épaisseur standard de 0.35 m pour les trois graves utilisées. La GNT Cap. est prise comme GNT de référence. Pour les sols supports, une

valeur du module de rigidité  $E_{sol}$  de la couche supérieure égal à 125 MPa est prise comme valeur de référence.

Les valeurs des variables fondamentales associées à la structure de référence sont indiquées entre parenthèses dans la première colonne du Tableau 4.2, ci-après :

**Tableau 4.1 : Principaux résultats de l'étude paramétrique**

Variables \ Critères	W	$\epsilon_{rr}$	$\epsilon_{zz}$
$H_b$ (0.06m) +66%	-14%	+21%	-22%
-33%	+4%	-56%	+10%
$E_b$ (4000 MPa) +60%	-5%	-1.5%	-5%
-60%	+10%	-26%	+9%
$H_g$ (0.35m) +25%	-5%	-6%	-27%
-25%	+7%	+10%	+42%
$E_{sol}$ (125MPa) +50%	-13%	0%	-27%
-33%	+18%	0%	+34%

Les résultats de l'étude paramétrique montrent clairement que :

- 1- Un changement de l'épaisseur ou de la rigidité de la couche bitumineuse affecte d'une manière significative l'ensemble des valeurs des différents critères de dimensionnement, d'où l'importance cruciale du choix de ces deux paramètres dans le dimensionnement des chaussées souples.
- 2- La déformation verticale au sommet du sol-support semble le critère le plus sensible à des variations de rigidité ou d'épaisseur des matériaux constituant la chaussée
- 3- La déformation radiale à la base du béton bitumineux est pratiquement insensible aux changements des dimensions de la couche granulaire et aux changements de rigidité du sol-support.

En revanche la déformation radiale montre une certaine sensibilité à la qualité des matériaux granulaires utilisés. Il s'ensuit qu'une bonne connaissance des caractéristiques mécaniques des

GNT est importante non seulement pour la protection du sol-support mais aussi pour dimensionnement de la couche bitumineuse.

**4-** L'épaisseur de la couche granulaire n'a pas d'effet considérable sur les critères de dimensionnement excepté sur la déformation verticale au sommet du sol-support. Cette dernière est aussi affectée par la variation de l'épaisseur de la couche bitumineuse, ce qui devrait permettre de remplacer l'épaisseur de la couche bitumineuse par une autre couche de GNT pour le même niveau de protection du sol-support. Le choix de l'épaisseur de couche à réduire reste, toutefois, fonction de la disponibilité et du coût de chaque matériau.

## CHAPITRE V : EFFETS DES CONDITIONS D'INTERFACE SUR LE COMPORTEMENT DES STRUCTURES DES CHAUSSEES SOUPLES

### Introduction :

La méthode classique de dimensionnement des structures de chaussées souples est basée généralement sur le calcul des contraintes, des déformations et des déplacements des structures multicouches.

Pour simplifier la modélisation et l'analyse des structures, plusieurs méthodes posent l'hypothèse du collage parfait entre les différentes couches, ce qui n'est pas toujours le cas en pratique. La modélisation correcte des conditions d'interface joue un grand rôle dans la compréhension des comportements des structures de chaussées souples. Dans ce qui suit, on étudiera l'influence des conditions d'interface sur les critères de dimensionnement et la performance de la chaussée examinée. Les deux modèles de comportement à savoir : modèle linéaire et modèle non linéaire équivalent pour les matériaux granulaires locaux seront considérés [31].

Plusieurs investigations ont été réalisées sur la structure de chaussée en utilisant le logiciel ALIZE. Les résultats de simulation montrent que les conditions d'interface jouent un rôle essentiel dans la performance des chaussées routières pour les deux modèles de calcul. De plus la durée de vie calculée par un modèle non linéaire équivalent est plus petite que celle calculée par un modèle linéaire classique [37,38].

### 1- Caractéristique des matériaux des structures de chaussées

Les propriétés des matériaux utilisés dans une structure sont présentées dans le Tableau suivant :

**Tableau N° 5.1 :** *Caractéristiques mécaniques des matériaux de la structure de chaussée*

couche	E ( MPa)	Epaisseur (cm)	$\nu$	Type de matériaux
1	4000	6	0.35	B.B
2	500	20	0.25	GNT CAP
3	312.5	15	0.25	GNT CAP
4	125	-	0.35	SOL-Support

La section de chargement sur la chaussée est supposée circulaire de rayon 17.5 cm et a une pression statique de 676 KPa.

Il y'a lieu de signaler que la structure de chaussée utilisée correspondant à celle initialement fixée pour l'étude du modèle non linéaire équivalent est déjà donnée précédemment dans le Tableau N°5.2.

Les quatre cas possibles de conditions d'interface utilisées sont illustrés dans le Tableau N°5.2 suivant :

**Tableau N° 5 .2: les différents cas de conditions d'interface**

Cas	Type d'interface entre BB-GNT	Type d'interface entre GNT-Sol support
A	Collé	Collé
B	Décollé	Collé
C	Collé	Décollé
D	Décollé	Décollé

## 2- Résultats numériques et discussion

Un calcul de structure est d'abord effectué afin de déterminer les déformations correspondant aux points critiques de la structure (la déformation radiale  $\epsilon_{rr}$  à la base de la couche d'asphalte à l'aplomb de la charge et la déformation verticale  $\epsilon_{zz}$  au sommet du sol support à l'aplomb de la charge). Une vérification vis-à-vis de la fissuration par fatigue de la couche de bitume est ensuite effectuée en utilisant la relation :

$$N_f = f_1 \epsilon_{rr}^{-f_2} E_{AC}^{-f_3}$$

$N_f$  : est le nombre de cycles de chargements avant la rupture par fatigue.

$\epsilon_{rr}$  : est la déformation latérale à la base de la couche de roulement.

$E_{AC}$  : est le module de Young de la couche de roulement (*psi*).

$f_1, f_2$  et  $f_3$  sont des paramètres du matériau de la couche de roulement donnés par [41] :

Asphalt Institute:

$$f_1=0.0796.$$

$$f_2=3.291.$$

$$f_3=0.854.$$

Une vérification vis-à-vis de l'orniérage doit également être effectuée en utilisant :

$$N_d = f_4 \varepsilon_{zz}^{-f_5}$$

$N_d$  : représente le nombre de cycles de chargements avant la rupture par cumul des déformations plastiques

$\varepsilon_{zz}$  : représente la déformation verticale au sommet du sol support.

$E_{AC}$  : est le module de Young de la couche de roulement.

$f_4$  et  $f_5$  : sont des paramètres liés à la grave non traitée, donnés par [41] :

Asphalt Institute :

$$f_4 = 1.356 \cdot 10^{-9}$$

$$f_5 = 4.477$$

Les résultats obtenus par les deux modèles sont résumés dans les Tableaux N° 5.3 et 5.4 suivant :

➤ **Modèle linéaire :**

**Tableau N° 5.3 : Résultats des différents cas de conditions d'interface pour un calcul linéaire**

Type d'interface	A	B	C	D
$\varepsilon_{rr}$	-155.2	-364.2	-162.9	-382.4
$\varepsilon_{zz}$	639.8	929.8	250.0	391
$N_f$	628824	37965	536194	32336
$N_d$	271940	51010	18262290	2465797
N	271940	37965	536194	32336

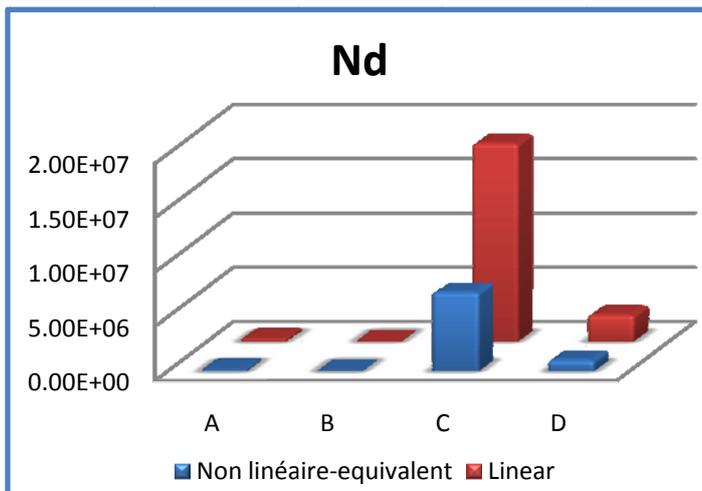
➤ **Modèle non linéaire-équivalent :**

**Tableau N° 5.4 : Résultats des différents cas de conditions d'interface pour un calcul non linéaire-équivalent**

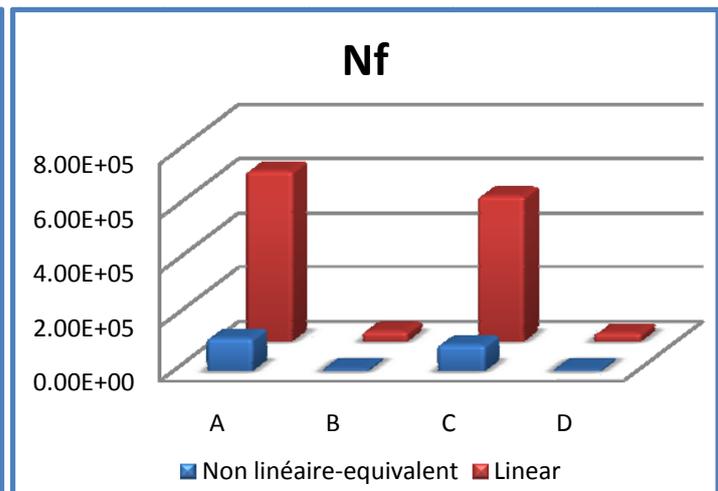
Type d'interface	A	B	C	D
$\varepsilon_{rr}$	-255.3	-528.4	-273	-557
$\varepsilon_{zz}$	708.5	1010	307	474.4
$N_f$	122222	11155.4	98026.3	9379
$N_d$	172251	35220	7281388	1037607
N	122222	11155.4	98026.3	9379

Il est observé dans les Tableaux N°5.3 et 5.4, que les critères de dimensionnement sont très sensibles au changement des conditions d'interface. La structure avec interface décollée entre BB et la GNT a la plus grande valeur de  $\epsilon_{tr}$  (200% plus grande que la condition collée) ce qui implique dans ce cas que pour ce cas la durée de vie à la fatigue est plus petite.

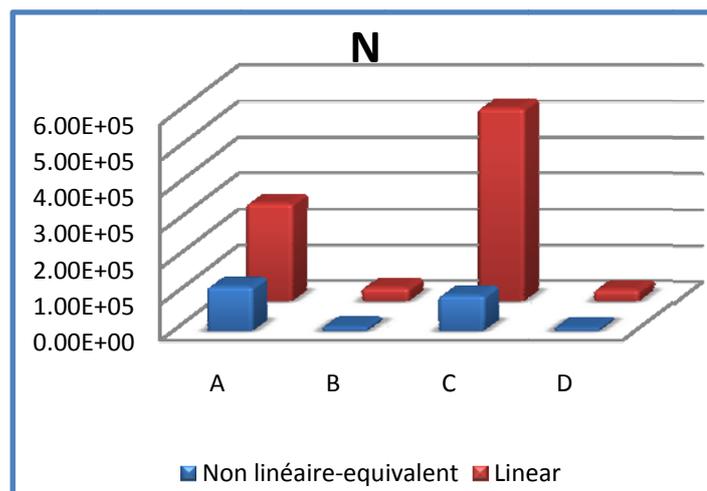
Les figures suivantes présentent les résultats obtenus pour les durées de vie de la structure de chaussée considérée dans le cas d'une ruine par fissuration de fatigue et d'une ruine parorniérage pour différentes conditions d'interface dans l'hypothèse d'un comportement linéaire et non linéaire équivalent.



**Figure 5.1** : Durée de vie (hypothèse de ruine parorniérage) obtenue pour les deux modèles du calcul pour différentes conditions d'interface.



**Figure 5.2** : Durée de vie (hypothèse de ruine dans le cas de fissuration par fatigue) obtenue pour les deux modèles du calcul pour différentes conditions d'interface.



**Figure 5.3** : Durée de vie de calcul obtenue pour les deux modèles de calcul pour différentes conditions d'interface.

Le but principal de la présente étude est de déterminer l'effet des conditions d'interface sur le comportement des structures des chaussées souples.

Des fonctions de transfert, basées sur deux modèles de ruine (fissuration par fatigue et ruine par orniérage) sont utilisées pour estimer la durée de vie des structures de chaussées.

Les résultats des simulations pour un comportement réversible linéaire et non linéaire équivalent sous différentes conditions d'interface montrent que :

1. La déformation de traction ( $\varepsilon_{rr}$ ) dans la partie inférieure de la couche bitumineuse est minimale dans le cas (A) (toutes les couches sont collées) pour un calcul linéaire et non linéaire équivalent.
2. La déformation verticale ( $\varepsilon_{zz}$ ) au sommet du sol support est minimale dans le cas (c) (où l'interface GNT –S support est décollée)
3. Pour les deux types d'analyse (linéaire et non linéaire équivalent), les variations des critères de dimensionnement présentent les mêmes tendances.
4. Le modèle non linéaire équivalent donne toujours des valeurs de critères de dimensionnement supérieures à celles données par le modèle linéaire, sous différentes conditions d'interface, alors les durées de vie prédites par un calcul non linéaire équivalent sont inférieures à celle prédites par un calcul linéaire.
5. Dans le cas où l'interface BB-GNT est décollée (cas B), la durée de vie (en orniérage et par fatigue) diminue considérablement.

Sur la base des remarques précédentes, on peut conclure que :

- Le décollement de l'interface entre la couche BB et la couche granulaire affecte significativement les critères de dimensionnement des structures des chaussées, et par suite la durée de vie de la chaussée. Les procédures de construction routière doivent absolument vérifier le collage de ces deux couches en pratique.
- On constate également des écarts significatifs des valeurs de la durée de vie en utilisant les 2 types d'analyse à savoir : l'analyse linéaire et l'analyse non linéaire équivalente, ce qui montre l'importance de la prise en compte du comportement non linéaire des GNT dans les modèles de calcul des chaussées souples.

## Conclusion générale

La présente recherche se veut une modeste contribution aux efforts consentis dans les domaines de caractérisation et modélisation du comportement mécanique des matériaux granulaires non-traités en général et des graves Algériennes en particulier, utilisées couramment dans les corps de chaussée. Le programme de travail s'est articulé au tour de trois volets principaux de recherche.

Dans le premier volet, les principaux résultats d'une étude analytique d'un modèle de comportement des graves non-traitées basé sur l'utilisation du modèle de Boyce et de sa formulation modifiée ont été présentés. Les paramètres de la loi constitutive utilisée ont été préalablement déterminés à partir des résultats d'essais obtenus à l'aide de l'appareil triaxial à chargements répétés du laboratoire de l'organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics.

Dans le deuxième volet on introduit un calcul linéaire et linéaire équivalent dans l'analyse de dimensionnement des chaussées souples

Les résultats des simulations obtenus à partir des options linéaire et linéaire équivalent du code de calcul sont en excellent

La comparaison des résultats numériques fondés sur l'hypothèse non-linéaire et linéaire du comportement des graves non-traitées (hypothèse couramment admise dans la pratique) a montré que cette dernière tend à rigidifier la structure de chaussée au détriment de la sécurité.

Un calcul linéaire équivalent a été développé illustrant ainsi la possibilité d'incorporer la non-linéarité du comportement des graves non-traitées dans l'analyse et le dimensionnement des chaussées souples via des abaques pour le calcul des caractéristiques mécaniques des couches granulaires.

Le troisième et le dernier volet de ce programme de recherche a été consacré à la présentation des principaux résultats d'une étude paramétrique sur le comportement des structures de chaussées souples et d'une étude des effets des conditions d'interfaces sur le comportement des structures de chaussées souples.

L'étude paramétrique a montré, entre autres, la nécessité de mieux appréhender la sensibilité des critères de dimensionnement aux variations possibles des dimensions et des rigidités des couches de chaussée (notamment des couches bitumineuses). En outre cette étude a permis de souligner l'importance qu'il convient d'accorder à une meilleure connaissance des caractéristiques mécaniques des couches bitumineuses et des matériaux locaux constitutifs des corps de chaussées, ainsi que leur utilisation dans le cadre d'une méthodologie de dimensionnement rationnel des chaussées, ceci devrait permettre de réduire de façon substantielle le coût de construction des routes.

Le modèle non linéaire équivalent donne toujours des valeurs de critères de dimensionnement supérieures à celles données par le modèle linéaire, sous différentes conditions d'interfaces, alors les durées de vie prédites par un calcul linéaire équivalent sont inférieures à celle prédites par un calcul linéaire.

Dans le cadre d'une méthodologie de dimensionnement rationnel des chaussées ce qui permet de réduire de façon substantielle le coût de construction des routes.

**Références Bibliographiques:**

- [1] Allen J.J, Thompson M.R. “*Resilient response of granular materials subjected to time dependent lateral stresses*”, Transportation Research Record 540, U.S.A, 1974.
- [2] Almeida J.R. “*Development and validation of a finite element code for pavement analysis*”, Flexible Pavements, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1996.
- [3] Autret P., De Boissoudy A.B. et Marchand J.P. “*Pratique d’ALIZE 3*”, Proc. 5<sup>th</sup> Inter. Conf. On the structural design of asphalt pavements, Delft, Netherlands, 1982.
- [4] Balay J., Gomes Correia A., Jouve P., Paute J.L “*Mechanical behaviour of soils and unbound granular materials, modelling of flexible pavements, recent advances*”, Proc. 8<sup>th</sup> inter. Conf. On asphalt pavements, Seattle, U.S.A, 1997.
- [5] Boussineq J. “*Application des potentiels à l’étude de l’équilibre et du mouvement des corps élastiques*”, Gauthier Villars, Paris, France, 1885.
- [6] Boyce H.R. “*A non-linear model for elastic behavior of granular materials under repeated loading*”, Proc. Inter. Symp. on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, U.K, 1980.
- [7] Brown S.F, Barksdale R.D “*Pavement design and materials*”, Proc. 6<sup>th</sup> Inter. Conf. On the structural design of asphalt pavements, Ann Arbor, U.S.A, 1987.
- [8] Brown S.F, Hyde A.F. “*The significance of cyclic confining stress in repeated load triaxial testing of granular material*”, Transportation Research Record 537, U.S.A, 1975.
- [9] Burmister D.M. “*The theory of stresses and displacements in layered systems and application of the design of airport runways*”, Proc. Highway Research Bord, Vol. 23, U.S.A, 1943.
- [10] Chan F. “*Permanent deformation resistance of granular layers in pavements*”, PhD. Thesis, University of Nottingham, U.K, 1990.
- [11] CTTTP – Direction des routes “*Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves*”, Alger, Algérie, 2001.
- [12] Dancan J.M., Chang C.Y. “*Non-linear analysis of stress and strain in soils*”, Journal of the Soils Mechanics and Fondation Division, Proc. Of ASCE Vol 96, U.S.A, 1970.
- [13] Dawson A.R, Correia A.G “*The effects of clay condition on the structural behavior of road pavements*”, Proc. Euro. Symp. On Flexible Pavements, Lisbonne, Portugal, 1993.
- [14] De Boissoudy A. “*Introducing the non-linearity of the granular material in routine analytical pavement design*”, Flexible Pavements, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1996.
- [15] De Boissoudy A., Bonnot J. “*La mécanique des chaussées: son évolution, ses préoccupations actuelles*”, Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°125, Paris, France, 1983.

- [16] Guezouli S. “*Comportement des chaussées souples: Modélisation et simulation numérique*”, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 1994.
- [17] Guezouli S., Elhannani M. et Jouve P. “*NOEL : A Non Linear Finite Code for Pavement Analysis*”, Proc. Euro. Symp. On Flexible Pavements, Lisbonne, Portugal, 1993.
- [18] Harr M.E. “*Mécanique des milieux formés de particules*”, Presses polytechniques romandes, Lausanne, Suisse, 1981.
- [19] Heukelon W., Klomp A.J. “*Road design and dynamic loading*”, Proc. Asphalt Pavement Technologist, Vol. 33, U.S.A, 1964.
- [20] Hicks R.G. “*Factors influencing the resilient properties of granular materials*”, Ph. D. Dissertation, University of California, Berkeley, U.S.A, 1970.
- [21] Hornych P., Corté J.F, Paute J.L “*Etude des déformations permanentes sous chargement répété de trois graves non-traitées*”, Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°184, Paris, France, 1993.
- [22] Jouve P., Guezouli S., Elhannani M. “*Comportement mécanique des graves non-traitées – Application aux chaussées souples*”, Proc., 11<sup>ème</sup> Congrès Français de la mécanique, Lille, France, 1993.
- [23] Jouve P., Elhannani M. “*Application des modèles non-linéaires au calcul des chaussées souples*”, Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°190, Paris, France, 1994.
- [24] Paute J.L, Jouve P., Martinez J., Ragneau E. “*Modèle de calcul pour le dimensionnement des chaussées souples*”, Proc. 6<sup>th</sup> Inter. Conf. On the structural design of asphalt pavements, Ann Arbor, U.S.A, 1987.
- [25] Paute J.L, Marignier J., Vidal B. “*Le triaxial à chargements répétés LPC pour l’étude des GNT*”, Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°190, Paris, France, 1994.
- [26] Paute J.L, Hornych P., Benaben J.P “*Comportement mécaniques des graves non-traitées*”, Bull. liaison Labo. P. et Ch., n°190, Paris, France, 1994.
- [27] Peyronne C.H, Caroff G. “*Cours de routes : Dimensionnement des chaussées*”, Presses E.N.P.C, Paris, France, 1984.
- [28] Rowe P.W. “*Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soils. Stress-strain behavior of soils*”, Proc. Roscoe Mem. Sym., Cambridge, 1971.
- [29] Sandjak K., Tiliouine B. “*Etude paramétrique sur les structures de chaussées souples*”, Proc. 1<sup>er</sup> Séminaire National de Génie Civil, Tébessa, Algérie, 2001.
- [30] SETRA-LCPC, “*Manuel de Conception des Chaussées neuves à Faible Trafic*”, Paris, France, 1981.
- [31] Sweer G.T “*Unbound granular bases for roads*”, PhD. Thesis, Delft University of Technology, Netherlands, 1990.

- [32] Tiliouine B., Sandjak K. “*Non-linear finite element modelling of unbound granular materials in flexible pavement analysis*”, Proc. Euro. Conf. On Computational mechanics, Cracow, Poland, 2001.
- [33] Timoshenko S.P, Goodier J.N. “*The theorie of elasticity*”, Mc Graw-Hill, New york, U.S.A, 1970.
- [34] Tutumluer E. “*Predicting behavior of flexible pavements with granular bases*”, PhD. Dissertation, Georgia Institute of Technology, Atlanta, U.S.A, 1995.
- [35] Van Schelt W., Galjaard P.J “*The non-linear elastic model of Boyce: An evaluation of the model in the FEM-program DIANA*”, Proc. Euro. Symp. On Flexible Pavements,, Lisbonne, Portugal, 1993.
- [36] Zienkiewicz O.C, Taylor R.L “*The finite element method*”, 4<sup>th</sup> Edition, Mc Graw Hill, U.K, 1989.
- [37] H. Ziari and M.M. Khabiri : *Interface condition influence on prediction of flexible pavement life* : Journal of civil engineering and management, Vol.13, No 1 (2007), p.71–76.
- [38] S.A.Ramanoschi: *Characterization of layer interface*: PhD dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, USA (1999).
- [39] B. Tiliouine and K. Sandjak : *Mechanical Behaviour Simulation of Unbound Aggregates Used in Algerian Pavements* : 4<sup>ème</sup> Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM (2011).
- [40] Y. H. Huang, In: *Pavement Design and Analysis*, edited by Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J, (2004).
- [41] Asphalt Institute, in: *Research and Development of the Asphalt Institute Thickness Design Manual (MS-1)*, Research Report 82-2, Asphalt Institute, Kentucky, (1982).
- [42] CTTTP\_Direction des routes, in : *Catalogues des Dimensionnement des Chaussées Neuves*, Algérie, (2000).