

*République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi - Ouzou
Faculté du génie de la construction
Département de génie civil*



Mémoire de fin d'études

*En vue de l'obtention du diplôme de Master II en génie civil
Option : Géotechnique*

Thème

Étude expérimentale des techniques de traitement d'une chaussée souple

*Proposé et dirigé par :
M^{me} MEZIANI F.*

*Présenté par :
M^{elle} LOKMANE Leiza*

Promotion : 2017 / 2018

Remerciements

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

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

Que tout le personnel de laboratoire central de travaux publics (LCTP) de TIZI-OUZOU trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, et qui me feront l'honneur de l'examiner.

Dédicaces

Je dédie ce travail, particulièrement, à mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de mon cursus.

A mes frères : Belkacem et Brahim ainsi qu'à toute ma famille sans exception.

A mes très chères amies Celia et Siham.

A toute la promotion Géotechnique et environnement -2017-2018-

Sans oublier tous mes amis(es) avec qui j'ai passé des moments inoubliables durant tout mon cursus du primaire à l'université et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Résumé : Les techniques de traitement des chaussées ne cessent de se développer, dans le but d'améliorer les caractéristiques des matériaux utilisés. Les objectifs ont toujours été de construire au mieux et surtout au moins cher. L'utilisation des additifs est devenue très répandue dans le domaine de génie civil, notamment dans la construction routière, dont leurs rôle est de conférer une meilleure densité et cohésion aux différents matériaux utilisés dans les couches d'assise d'une chaussée souple. Le présent sujet de recherche s'intéresse à l'étude expérimentale pour l'amélioration de la portance de la couche de base à l'aide des essais de laboratoire, en utilisant différents ajouts tel que, le tuf, la chaux vive et les granulats de caoutchouc. Cette étude commence par l'identification et présentation des matériaux utilisés, puis les soumettre aux essais de compactage et les essais C.B.R. (avant et après immersion). Les résultats obtenus sur différents types de granulats après traitement, sont comparés aux résultats obtenus sur les granulats naturels, montrent que les densités sèches sont améliorée et les teneurs en eau optimales sont réduites jusqu'à un seuil d'ajout ou une dégradation des caractéristique sont observées.

Mots clés : Étude expérimentale, essais de compactage, essais C.B.R, chaux vive, granulats de caoutchouc.

Abstract: Pavement Treatment techniques are constantly developing in order to improve the characteristics of the materials used. The objectives have always been to build the best and above all cheaper. The use of additives has become very widespread in the field of Civil Engineering, especially in road construction, whose role is to confer a better density and cohesion to the different materials used in the layers of a flexible pavement. This research topic focuses on the experimental study to improve basecoat lift using laboratory tests, using tuffs, quicklime and rubber granules. This study begins with the identification and presentation of the materials used, then subject to compaction tests and C.B.R (before and after immersion). The results obtained on different types of aggregates after treatment are compared with the results obtained on natural aggregates, show that the dry densities are Increased and optimal water content are reduced to an add threshold or a degradation of the characteristics are observed

Keywords: Experimental study, compaction tests, C.B.R tests, quicklime, rubber granules.

Tableau des principales notations et indices

Indices	Désignations
C_u	Coefficient d'uniformité.
C_c	Coefficient de courbure.
W	Teneur en eau.
ρ_d	Masse volumique sèche.
ρ_s	Masse volumique des grains solides.
ρ_h	Masse volumique humide.
ρ_w	Masse volumique de l'eau.
e	Indice des vides.
η	Porosité.
Sr	Degré de saturation.
W_l	Limite de liquidité.
W_p	Limite de plasticité.
I_p	Indice de plasticité.
P_h	Poids humide.
P_s	Poids sec.
γ_w	Poids volumique de l'eau.
γ_d	Poids volumique sec.
(γ_d/γ_w)	Densité sèche.
V	Volume du moule Proctor.
I.P.I	Indice Portant Immédiat.
C.B.R _{imm}	Indice C.B.R après immersion.
Δ_h	Gonflement mesuré.
H	Hauteur initiale de l'éprouvette.
G	Gonflement linéaire relatif.
L.A	Coefficient Los Angeles.
M.D.E	Coefficient Micro Deval.
ES	Équivalent de sable.
h_1	Hauteur du sable + flocculat.
h_2	Hauteur du sable.

Liste des figures

CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES

Figure I.1.	Coupe verticale d'un corps de chaussée	4
Figure I.2.	La couche de forme	5
Figure I.3.	Les couches d'assise	5
Figure I.4.	La couche de surface	6
Figure I.5.	Structure d'une chaussée souple.	8
Figure I.6.	Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse	8
Figure I.7.	Structure d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques	9
Figure I.8.	Structure d'une chaussée à structure mixte	9
Figure I.9.	Structure d'une chaussée à structure inverse	9
Figure I.10.	Structure d'une chaussée à dalles non goujonnées avec fondation	10
Figure I.11.	Structure d'une chaussée à dalles goujonnées avec fondation	10
Figure I.12.	Structure d'une chaussée en béton armé continu	10
Figure I.13.	Structure d'une chaussée en béton de ciment mince collé	11
Figure I.14.	Structure d'une chaussée en béton armé continu sur grave bitume	11
Figure I.15.	Structure type d'une chaussée rigide	12
Figure I.16.	Structure type d'une chaussée semi-rigide	12

CHAPITRE II: PATHOLOGIES DES CHAUSSÉES ET TECHNIQUES DE TRAITEMENT

Figure II.1.	Tassement	14
Figure II.2.	Glissement	15
Figure II.3.	Dégradation d'arrachement	16
Figure II.4.	Ressuage	16
Figure II.5.	L'orniérage	17
Figure II.6.	Fissuration transversale	17
Figure II.7.	Fissuration longitudinale	18
Figure II.8.	Fissure en dalle	18
Figure II.9.	Fissure d'adaptation	18
Figure II.10.	Fissures diverses en Y	19
Figure II.11.	Faïençage circulaire	19
Figure II.12.	Cassure d'angle	19
Figure II.13.	Fissure oblique	20
Figure II.14.	Utilisation d'un géotextile	22
Figure II.15.	Méthode de drainage	22
Figure II.16.	Traitement de sol par épandage de chaux	23
Figure II.17.	Traitement par ajout de tuf	27
Figure II.18.	Renforcement de la RN01 entre Tamanrasset - In Guezzam.	28
Figure II.19.	Les principaux constituants des différents produits obtenus par broyage de pneus usés.	31

CHAPITRE III: PRÉSENTATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX

Figure III.1.	Tamiseuse électrique	35
Figure III.2.	Classe granulaire du matériau utilisé	35
Figure III.3.	Définition de l'équivalent de sable	40
Figure III.4.	Appareil pour essai Los Angeles	41

Figure III.5.	Appareil pour essai Micro Deval.	41
Figure III.6.	La chaux vive	43
Figure III.7.	Granulats de caoutchouc	43
Figure III.8.	Courbe granulométrique des granulats de caoutchouc	44
Figure III.9.	Aspect de la roche du tuf	44
Figure III.10.	Aspect des grains de tuf	45
Chapitre IV : LES ESSAIS MÉCANIQUES RÉALISÉS		
Figure IV.1.	structure de sol avant et après compactage	46
Figure IV.2.	Diagramme Proctor simple	48
Figure IV.3.	Appareillage Proctor et C.B.R	49
Figure IV.4.	Étapes de l'essai Proctor Modifié	50
Figure IV.5.	Presse C.B.R	53
Figure IV.6.	Essai C.B.R, imbibition et gonflement	54
Figure IV.7.	Eprouvettes après poinçonnement	55
CHAPITRE V RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS		
Figure V.1.	Courbes Proctor, en fonction du pourcentage du tuf rajouté	57
Figure V.2.	Courbes Proctor, en fonction du pourcentage de la chaux rajouté	58
Figure V.3.	Courbes Proctor, en fonction du pourcentage des granulats de caoutchouc rajouté	59
Figure V.4.	Évolution de la densité sèche du matériau, en fonction du pourcentage d'ajout	60
Figure V.5.	Évolution de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout	61
Figure V.6.	Évolution de l'indice I.P.I, en fonction du pourcentage de tuf rajouté	62
Figure V.7.	Évolution de l'indice C.B.Rimm, en fonction du pourcentage de tuf rajouté.	62
Figure V.8.	Évolution de l'indice I.P.I, en fonction du pourcentage de la chaux rajouté	63
Figure V.9.	Évolution de l'indice C.B.Rimm, en fonction du pourcentage de la chaux	63
Figure V.10.	Évolution de l'indice I.P.I, en fonction du pourcentage des granulats de caoutchouc rajouté	64
Figure V.11.	Évolution de l'indice C.B.Rimm, en fonction du pourcentage des granulats de caoutchouc rajouté	64
Figure V.12.	Évolution de l'indice I.P.I, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout	65
Figure V.13.	Évolution de l'indice C.B.Rimm, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout	65

Liste des tableaux

CHAPITRE III: PRÉSENTATION ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

Tableau III.1. Caractéristiques physiques des granulats utilisés pour la couche de base	38
Tableau III.2. Classification selon la masse volumique sèche.	39
Tableau III.3. Classification selon le degré de saturation.	39
Tableau III.4. Valeurs d'équivalent de sable	40
Tableau III.5. Résultats des essais Los Angeles et Micro Deval	42
Tableau III.6. Valeurs d'équivalent de sable	45

Chapitre IV : LES ESSAIS MÉCANIQUES RÉALISÉS

Tableau IV.1. Résumé des conditions de chaque essai selon le moule retenu (Norme NF P 94-093) selon les normes canadiennes	47
Tableau IV.2. Résumé des conditions de chaque essai selon le moule retenu (AFNOR ,1999)	47
Tableau IV.3. Résultats du compactage des granulats utilisés	51
Tableau IV.4. Résultats du compactage des granulats	55

SOMMAIRE

	PAGE
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES	
I.1. Introduction	3
I.2. Définition d'une chaussée	3
I.3. Les couches principales de la chaussée	4
I.3.1. La plate-forme support	4
I.3.2. Les couches d'assise	5
I.3.3. La couche de surface	5
I.4. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées	6
I.4.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée	6
I.4.2. Les matériaux à éléments fins	6
I.4.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron	7
I.4.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques	7
I.5. Les structures des chaussées	7
I.5.1. Les chaussées souples	7
I.5.2. Les chaussées bitumineuses épaisses	8
I.5.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	8
I.5.4. Les chaussées à structures mixte	9
I.5.5. Les chaussées à structure inverse	9
I.5.6. Les chaussées en béton de ciment	10
I.5.7. Les chaussées composites	11
I.5.8. Les chaussées rigides	11
I.5.9. Les chaussées semi-rigides	12
I.6. Résistance mécanique des chaussées	12
I.7. Conclusion	13
CHAPITRE II: PATHOLOGIES DES CHAUSSÉES ET TECHNIQUES DE TRAITEMENT	
II.1. Introduction	14
II.2. Pathologies des chaussées	14
II.2.1. Tassements	14
II.2.2. Glissements	15
II.2.3. Les dégradations	15
II.2.3.1. Les dégradations d'arrachement	16
II.2.3.2. Le mouvement des matériaux	16
II.2.3.3. Dégradations de déformation	17
II.2.3.4. Les fissures	17
II.3. Causes principales des dégradations	20
II.3.1. Le trafic	20
II.3.2. Les conditions climatiques	20
II.3.3. Les malfaçons	21
II.3.4. Les accidents et incidents	21
II.4. Techniques de stabilisation	21
II.4.1. La stabilisation mécanique	21
A. Le compactage	21
B. La pose d'un géotextile	22

C. Drainage	22
II.4.2. La stabilisation thermique	23
II.4.3. La stabilisation chimique	23
II.5. présentation des techniques de traitement utilisées	23
II.5.1. Stabilisation des sols à la chaux	23
A)- Les principaux types de chaux	24
a)- La chaux aérienne	24
b)- La chaux hydraulique	25
c)- La chaux magnésienne	25
B)- Avantages de la chaux	25
II.5.2. Traitement des sols au tuf	26
A)- Les encroûtements calcaires	27
B)- Les encroûtements gypseux	27
C)- Les encroûtements mixtes	27
II.5.3. les tufs en technique routière	28
II.5.4. Avantages des tufs	28
III.5.5. Traitement des sols avec ajout de granulats de caoutchouc recyclés	29
A. Définitions	29
B. Pneus et Environnement	30
C. Recyclage des matériaux	30
II.6. Conclusion	32
CHAPITRE III:PRÉSENTATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX	
III.1. Introduction	33
III.2. Identification des matériaux	33
III.2.1. Les granulats	33
III.2.1.1. Analyse granulométrique (NF P 94- 040)	33
III.2.1.2.Caractéristiques physiques	36
a). Teneur en eau (w)	36
b). Les masses volumiques	36
b.1). La masse volumique sèche (ρ_d)	36
b.2). La masse volumique des grains solides (ρ_s)	36
c). Indice des vides (e)	37
d). Le degré de saturation (S_r)	37
e). La porosité (η)	37
III.2.1.3.Essai d'équivalent de sable	38
III.2.1.4.Essais de dureté	39
III.2.2. Les ajouts incorporés	41
III.2.2.1.La chaux vive :	41
A- Caractéristiques chimiques	41
A.1. Généralités	41
A.2. Composition chimique	42
B. Caractéristiques physiques	42
III.2.2.2.Granulats de caoutchouc	42
III.2.2.3. Le tuf	43
Essai d'équivalent de sable	44
III.3. Conclusion	44

CHAPITRE IV : LES ESSAIS MÉCANIQUES RÉALISÉS

IV.1. Introduction	46
IV.2. Le compactage	46
IV.3. Principe de l'essai Proctor	48
IV.4. Essais Proctor (Modifié) (NF P 94-093)	48
IV.4.1. Appareillage	48
IV.4.2. Mode opératoire de l'essai Proctor modifié	49
IV.4.3. Expression des résultats	50
IV.5. Essais C.B.R (NF P 94-078)	51
IV.5.1.Principe de l'essai	53
IV.5.2.Matériel utilisé	53
IV.5.3. Mode opératoire	54
IV.6. Conclusion	56

CHAPITRE V RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

V.1. Introduction	57
V.2. Interprétation des résultats	57
V.2.1. Interprétation des résultats d'essais Proctor modifié	57
V.2.1.1. Traitement avec le tuf	57
V.2.1.2. Traitement avec la chaux	58
V.2.1.3. Traitement avec les granulats de caoutchouc	59
V.2.2. Etude comparative des trois techniques de traitement	60
V.2.2.1. Evolution de la densité sèche en fonction du pourcentage d'ajout	60
V.2.2.2. Evolution de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout	61
V.2.2. Interprétation des résultats d'essais C.B.R	62
V.2.2.1.Traitement avec le tuf	62
V.2.2.2. Traitement avec la chaux	63
V.2.2.3. Traitement avec les granulats de caoutchouc	64
V.2.2.4. Évolution de l'indice I.P.I et C.B.Rimm, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout	65
V.3. CONCLUSION	66

CONCLUSION GÉNÉRALE

67

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

69

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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

Les assises de chaussées constituent un élément important dans les structures routières, car d'une part, elles représentent une proportion très notable de l'épaisseur totale, et d'autre part elles contribuent appréciablement à l'absorption et à la répartition des contraintes créées par le trafic.

Dans un projet routier, les investigations conduites par le géotechnicien mettent en évidence les difficultés susceptibles d'être rencontrées. Ceci permet d'adapter les techniques aux caractéristiques des matériaux, à leur stabilité et aux contraintes hydrauliques. Les études du géotechnicien définissent les mouvements des terres en optimisant leur utilisation et leur déplacement. Le géotechnicien doit ainsi répondre à un triple défi, assurer la stabilité à long terme du projet, optimiser la valorisation des matériaux du site et limiter l'impact sur le milieu naturel et le paysage.

L'objectif principal de ce mémoire est, d'évaluer l'effet de la stabilisation des matériaux utilisés dans la construction des couches d'assise d'une chaussée souple par la chaux, le tuf et les granulats de caoutchouc recyclés obtenus par broyage des pneumatiques usagés.

Après que les différents matériaux soient tamisés, les échantillons préparés sont ensuite soumis à des essais d'identification et des essais mécaniques, principalement : les essais de compactage avec le Proctor modifié et les essais de portance avant et après immersion à la presse C.B.R.

Les meilleurs résultats obtenus sur différents types de granulats après traitement, sont ensuite comparés aux résultats obtenus sur les granulats naturels sans ajout, soumis aux mêmes essais et réalisés dans les mêmes conditions de laboratoire.

Pour ce faire, on a reparti notre étude en cinq chapitres suivants :

Le chapitre I est réservé aux chaussées, les matériaux utilisés dans la construction des chaussées, les structures des chaussées, résistance mécanique des chaussées, construction des chaussées souples, etc.

Le chapitre II est consacré aux pathologies des chaussées, les causes principales des dégradations, définitions des différentes techniques de traitement d'une chaussée

souple, le traitement avec ajout de tuf, de la chaux, et des granulats de caoutchouc recyclés.

Le chapitre III englobe la partie expérimentale de cette étude. Dans ce chapitre, sont présentés et identifiés les matériaux utilisés, ainsi que les essais réalisés (les classes granulaires, les pourcentages d'ajouts, les essais auxquels ils sont soumis, etc.).

Dans le chapitre IV, sont présentés les différents essais, tout en montrant le but et le principe de chaque essai, le mode opératoire, l'appareillage, et les résultats obtenus sous forme de tableaux, avant et après traitement.

Le chapitre V, est un chapitre récapitulatif, contenant toutes les interprétations des résultats obtenus lors des différents essais réalisés dans ce travail.

Enfin, on termine cette étude par une conclusion générale, où on a synthétisé l'ensemble des résultats obtenus.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSÉES

Sommaire du chapitre I

I.1. Introduction	3
1.2. Définition d'une chaussée	3
I.3. Les couches principales de la chaussée	4
I.3.1. La plate-forme support.....	4
I.3.2. Les couches d'assise.....	5
I.3.3. La couche de surface.....	5
I.4. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées.....	6
I.4.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée.....	6
I.4.2. Les matériaux à éléments fins	6
I.4.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron	7
I.4.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques	7
I.5. Les structures des chaussées.....	7
I.5.1. Les chaussées souples.....	7
I.5.2. Les chaussées bitumineuses épaisses.....	8
I.5.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	8
I.5.4. Les chaussées à structures mixte.....	9
I.5.5. Les chaussées à structure inverse	9
I.5.6. Les chaussées en béton de ciment.....	10
I.5.7. Les chaussées composites.....	11
I.5.8. Les chaussées rigides	11
I.5.9. Les chaussées semi-rigides.....	12
I.6. Résistance mécanique des chaussées.....	12
1.7. Conclusion	13

I.1. Introduction

Les premières véritables chaussées furent construites par les romains pour leurs voies impériales, avec un objectif essentiellement militaire. Les chaussées de cette époque étaient déjà constituées de plusieurs couches de matériaux, parfaitement codifiés, avec des grandes dalles en pierres posées sur un béton de chaux.

De l'époque romaine à nos jours l'homme a toujours voulu construire des routes qui constituent un secteur stratégique pour le développement de son économie, de sa culture ou encore répondre aux besoins de l'armée.

Depuis les années 50, avec les nouvelles conditions de trafic, notamment les poids lourds, les anciennes solutions de type empièchement se sont avérées insuffisantes, et l'on été amené à généraliser l'emploi de matériaux agglomérés par un liant tant pour le corps de chaussée que pour la surface.

Dans ce chapitre, sont présentées des généralités sur les chaussées modernes, voire, les différents matériaux utilisés, les principaux types, etc.

1.2. Définition d'une chaussée

Une chaussée peut être définie, comme une structure plane, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic, dans de bonnes conditions de sécurité et de confort.

Elle assure les déplacements des usagers et le transport des marchandises, quelles que soient les conditions météorologiques, dans des conditions de sécurité et de confort adapté au type d'itinéraire [4], [5].

D'un point de vue mécanique, son rôle est de répartir les charges mécaniques sur le sol support, quelles que soit les conditions environnantes [8].

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (fig. I.1).

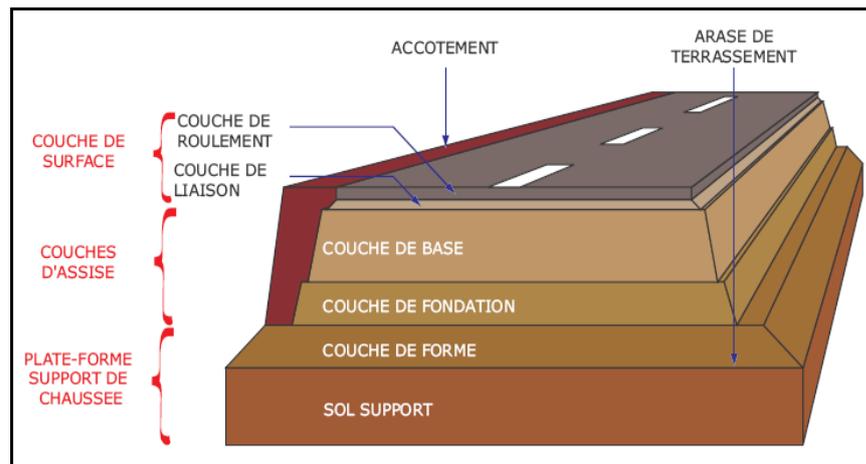


Figure I.1. Coupe verticale d'un corps de chaussée

I.3. Les couches principales de la chaussée

Les chaussées sont, assimilables à une structure plane multicouche, c'est la superposition de trois types de couches [10].

Le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d'une couche de forme. L'ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée.

I.3.1. La plate-forme support

La plate-forme support est, constituée du sol qui doit être suffisamment porteur, pour supporter le trafic, ainsi que l'agressivité due aux essieux, causés par le nombre de véhicules qui, est de plus en plus important et de leur poids. Ce sol est généralement, surmonté d'une couche de forme qui présente deux fonctions [13].

- 1- Pendant les travaux, elle assure la protection du sol-support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins.
- 2- En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou remblai, et d'améliorer la portance à long terme.



Figure I.2. La couche de forme

I.3.2. Les couches d'assise

L'assise de la chaussée est composée de deux sous couches : la couche de fondation et la couche de base. Ces couches apportent, à la chaussée la résistance mécanique, nécessaire pour reprendre les charges verticales, induites par le trafic, et elles repartissent les pressions sur le sol support, afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles [11].



Figure I.3. Les couches d'assise

I.3.3. La couche de surface

La couche de surface est, composée d'une couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison. Elles assurent la protection des couches d'assise, vis-à-vis des infiltrations d'eau et confèrent aux usagers un confort de conduite.



Figure I.4. La couche de surface

I.4. Matériaux utilisés dans la construction des chaussées

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

I.4.1. Les matériaux durs à granulométrie serrée

Les matériaux pierreux, graveleux ou sableux utilisés dans la construction des routes se divisent en deux grandes classes, qui correspondent à des techniques d'emploi bien différentes dans leur principe [17] :

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

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

I.4.2. Les matériaux à éléments fins

Les matériaux à éléments fins, de plus en plus utilisés, peuvent provenir :

- Soit du concassage de matériaux de carrière, le produit de concassage étant utilisé "tout venant", c'est-à-dire sans criblage ou avec un criblage très réduit corrigeant la courbe granulométrique dans la mesure nécessaire pour que le matériau soit compactable.

- Soit de "sol" de caractéristiques convenables, notamment en ce qui concerne la granulométrie et la teneur en fines. Les sources principales sont les "graves " , "sables " ou "graviers" d'origine glaciaire ou fluviale , le lavage , l'illuviation et les colmatages successifs de ces matériaux par l'action des courants conduisent à une granulométrie généralement continue et assez satisfaisante.

I.4.3. Liants hydrocarbonés : bitume et goudron

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

Ces produits sont très visqueux aux températures ordinaires, mais soit par chauffage, soit par une préparation spéciale (émulsion), ils peuvent être employés sous forme fluide : ils redeviennent rapidement visqueux et présentent alors les propriétés essentielles telle que : la cohésivité et l'adhésivité :

La cohésivité est la propriété de se déformer sans arrachement ni fissuration interne, en donnant des films étanches et plastiques, par contre l'adhésivité, est la propriété de coller aux agrégats minéraux.

I.4.4. Emploi dans les chaussées de matériaux synthétiques

Les géotextiles, matériaux en fibres de polyesters, peuvent être tissés ou non tissés. Elles peuvent être soit perméables, soit imperméables (géomembranes), livrés en rouleaux pesant 100 à 400 g/m², ils peuvent assurer dans les fondations de chaussées, des fonctions de renforcement (armatures), de séparation (anti-contaminants), de filtration et de drainage.

Enfin, en vue d'obtenir en surface une rugosité exceptionnelle, on utilise des granulats artificiels présentant une haute résistance à l'abrasion (bauxite calcinée, céramique moulée, etc.).

I.5. Les structures des chaussées

Il existe plusieurs types de chaussées que l'on classe dans les familles ci-dessous [5] :

I.5.1. Les chaussées souples

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60cm (fig I.5).

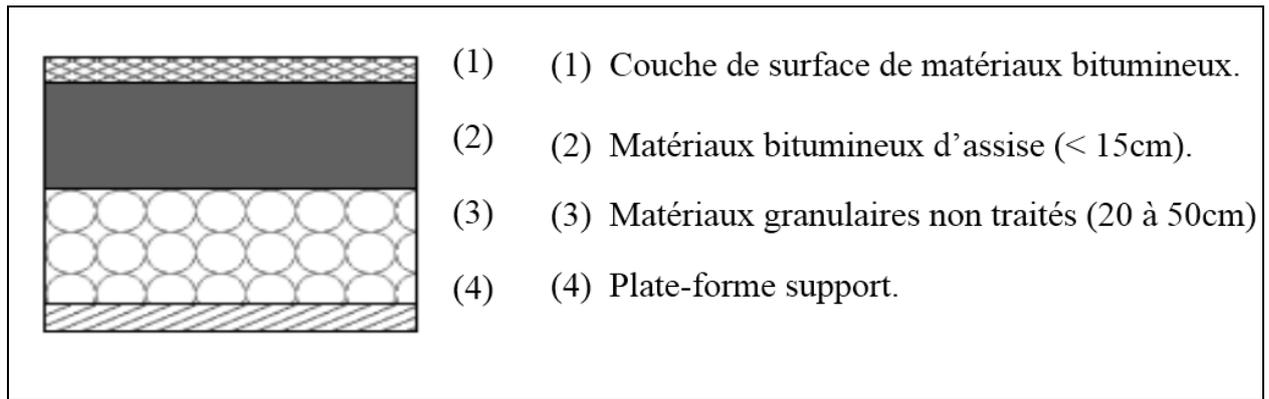


Figure I.5. Structure d'une chaussée souple.

I.5.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Les chaussées bitumineuses épaisses se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40cm (fig I.6).

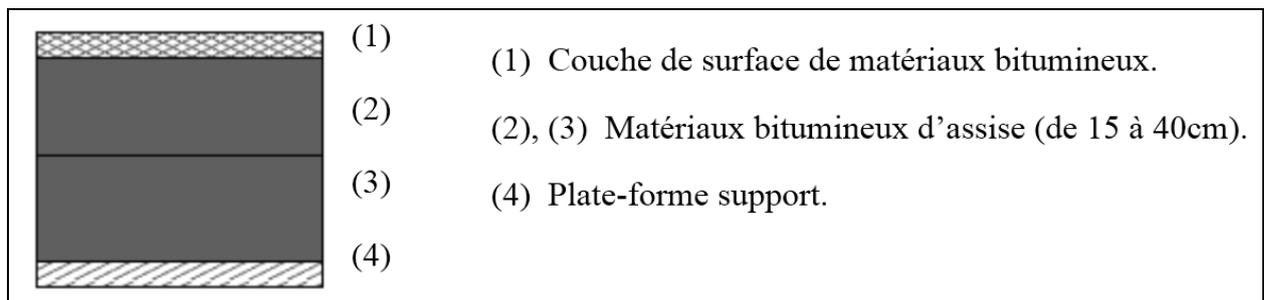


Figure I.6. Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse

I.5.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques sont qualifiées couramment de "semi-rigides". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à (fig I.7).

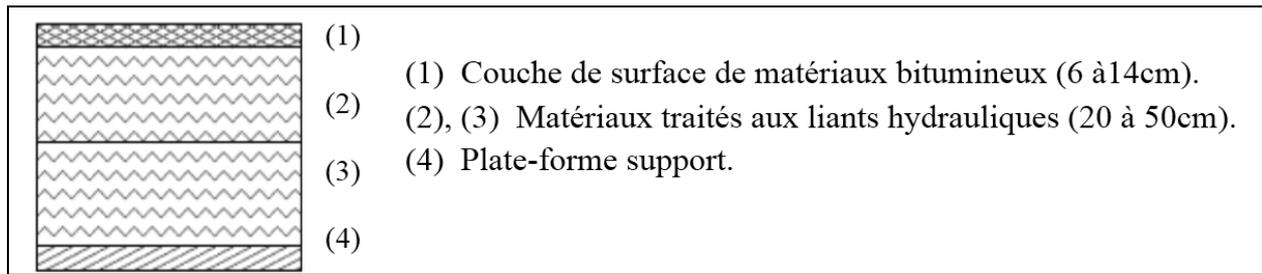


Figure I.7. Structure d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques

I.5.4. Les chaussées à structures mixte

Les chaussées à structures mixte comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40cm) (fig I.8). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1 / 2.

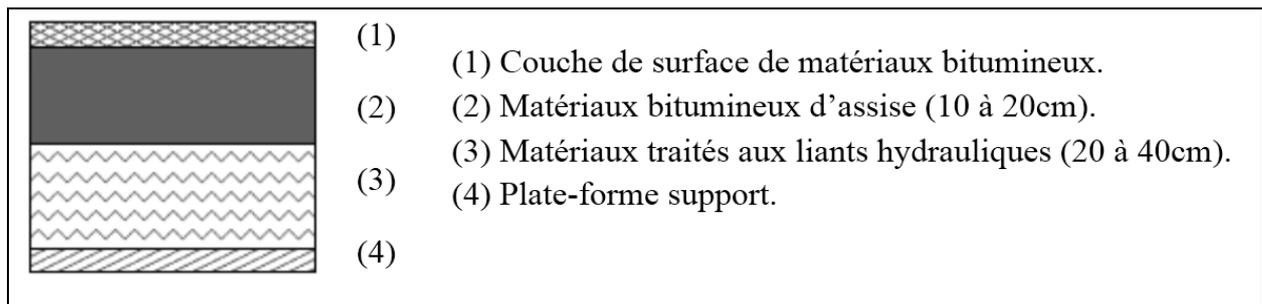


Figure I.8. Structure d'une chaussée à structure mixte

I.5.5. Les chaussées à structure inverse

Les chaussées à structure inverse sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche de grave non traitée (environ 12cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80cm (fig I.9).

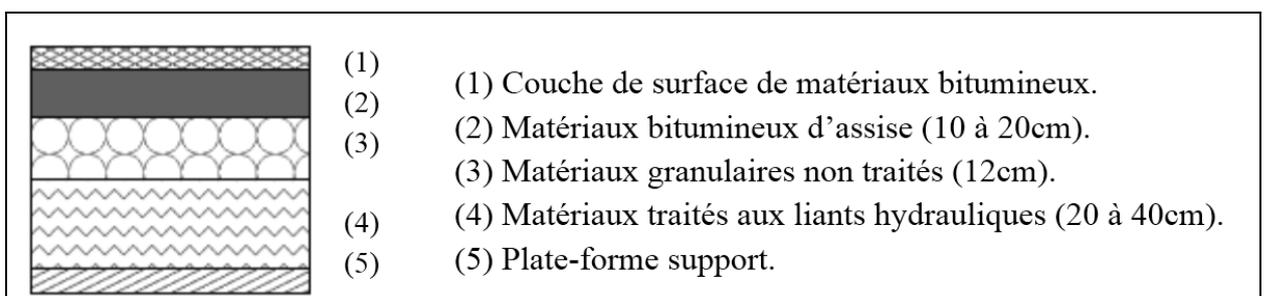


Figure I.9. Structure d'une chaussée à structure inverse

I.5.6. Les chaussées en béton de ciment

Les chaussées en béton de ciment comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement, éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints (fig I.10, I.11 et I.12).

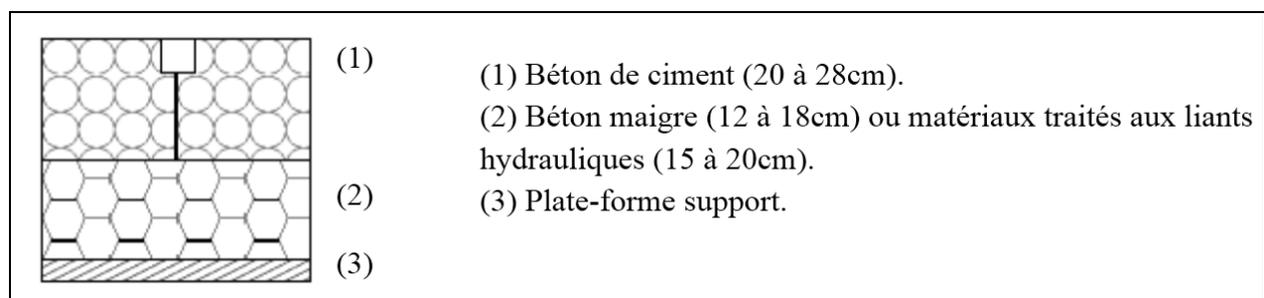


Figure I.10. Structure d'une chaussée à dalles non goujonnées avec fondation

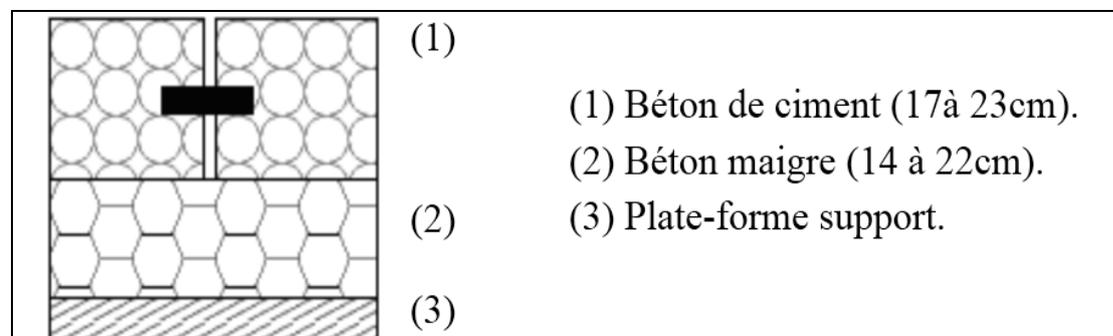


Figure I.11. Structure d'une chaussée à dalles goujonnées avec fondation

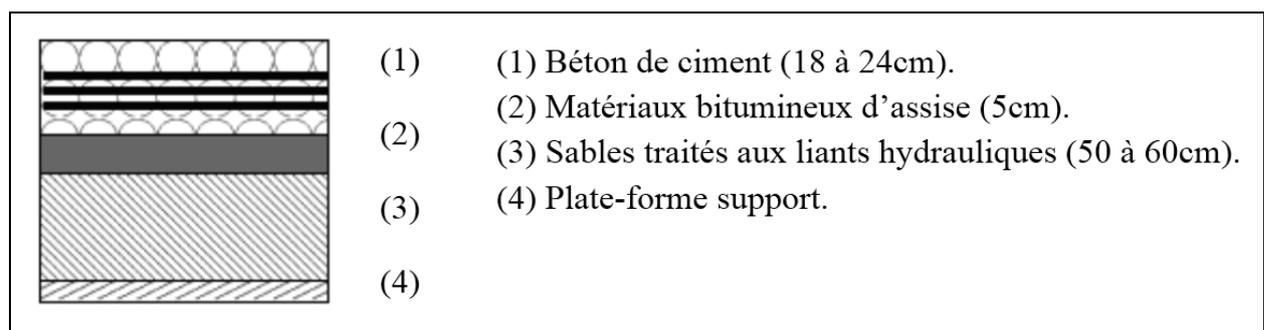


Figure I.12. Structure d'une chaussée en béton armé continu

I.5.7. Les chaussées composites

Les chaussées composites combinent une couche de béton de ciment avec des couches en matériaux bitumineux. On distingue deux types de structures composites : le béton de ciment mince collé et le béton armé continu sur grave bitume.

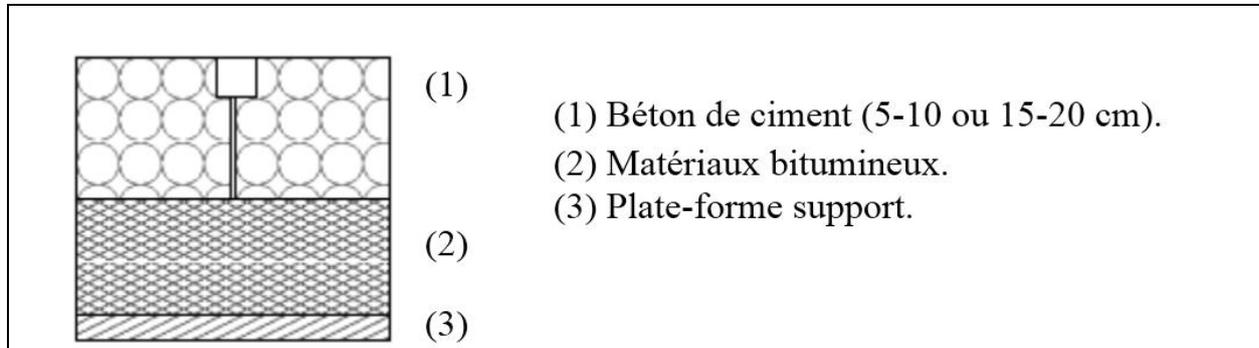


Figure I.13. Structure d'une chaussée en béton de ciment mince collé

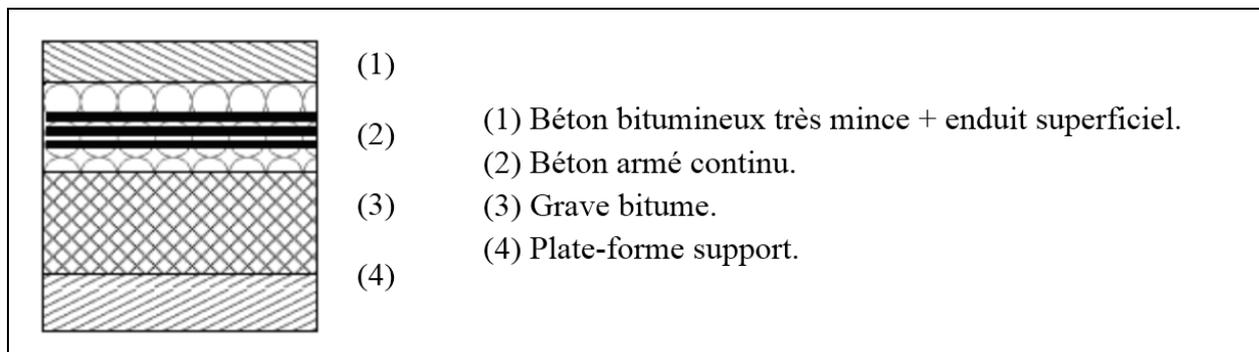


Figure I.14. Structure d'une chaussée en béton armé continu sur grave bitume

I.5.8. Les chaussées rigides

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes : une couche de forme, couche de fondation, et couche de roulement en béton de ciment (fig I.15). La dalle en béton de ciment peut ainsi être réalisée directement sur l'arase terrassement ou sur la plate-forme support de chaussée [12].

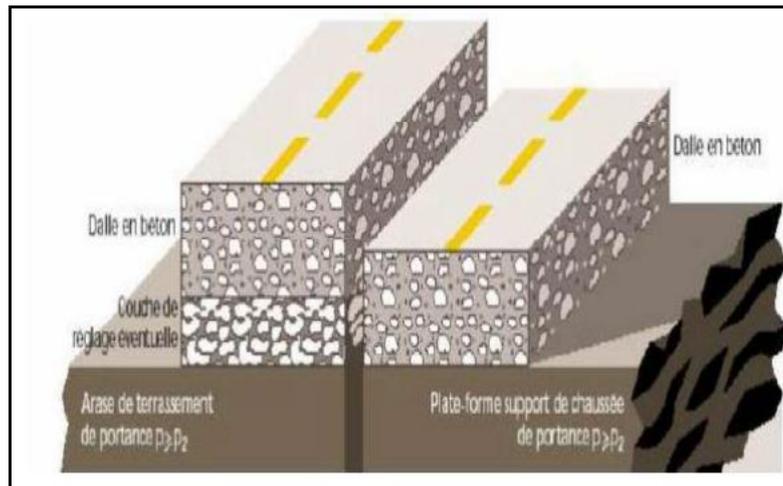


Figure I.15. Structure type d'une chaussée rigide

I.5.9. Les chaussées semi-rigides

Les chaussées semi-rigides comportent, une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). La structure-type est illustrée sur la figure suivante :

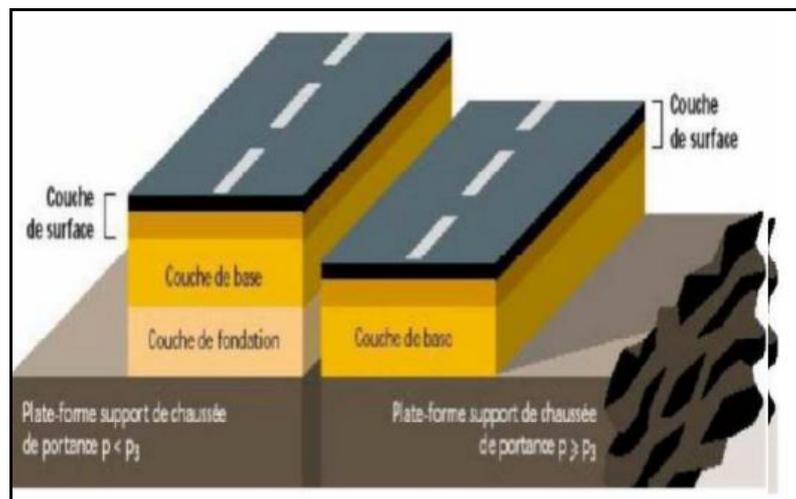


Figure I.16. Structure type d'une chaussée semi-rigide

I.6. Résistance mécanique des chaussées

L'étude de la résistance mécanique d'une chaussée nécessite la connaissance de la circulation que la route devra supporter, notamment la valeur des plus lourdes charges admises, et la fréquence des passages de chaque catégorie de véhicules, tout spécialement des véhicules lourds. En effet, la répétition de lourdes charges aggrave considérablement les conditions de travail d'une chaussée.

On devra tenir compte aussi, le cas échéant, des circonstances exceptionnelles susceptibles d'engendrer soit des chocs, soit des efforts horizontaux anormaux (fortes déclivités, virages de faible rayon, etc.).

Il est indispensable, de caractériser de façon aussi précise que possible les qualités du terrain sur lequel la chaussée devra être établie, ces qualités, qui conditionnent "la portance" du sol, il faut connaître, les risques d'imbibition et de dessiccation auxquels est exposée la chaussée, il faut aussi tenir compte des risques de gel qui, pour certains sols, sont extrêmement graves.

1.7. Conclusion

La chaussée durant sa vie est soumise aux diverses sollicitations telles que le trafic lourd et les conditions climatiques et autres liées à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre. Cela engendre des déformations qui génèrent des dégradations à maîtriser.

Le chapitre suivant, regroupe les principales dégradations, rencontrées dans les chaussées souples, ainsi que les différentes techniques de stabilisation possibles, dans le but d'assurer, la résistance et la stabilité de l'ensemble.

CHAPITRE II

PATHOLOGIES DES CHAUSSEES ET TECHNIQUES DE TRAITEMENT

Sommaire du chapitre II

II.1. Introduction.....	14
II.2. Pathologies des chaussées.....	14
II.2.1. Tassements.....	14
II.2.2. Glissements.....	15
II.2.3. Les dégradations.....	15
II.2.3.1. Les dégradations d'arrachement.....	15
II.2.3.2. Le mouvement des matériaux.....	16
II.2.3.3. Dégradations de déformation.....	16
II.2.3.4. Les fissures.....	17
II.3. Causes principales des dégradations.....	20
II.3.1. Le trafic.....	20
II.3.2. Les conditions climatiques.....	20
II.3.3. Les malfaçons.....	21
II.3.4. Les accidents et incidents.....	21
II.4. Techniques de stabilisation.....	21
II.4.1. La stabilisation mécanique.....	21
A. Le compactage.....	21
B. La pose d'un géotextile.....	22
C. Drainage.....	22
II.4.2. La stabilisation thermique.....	23
II.4.3. La stabilisation chimique.....	23
II.5. présentation des techniques de traitement utilisées.....	23

II.5.1. Stabilisation des sols à la chaux	23
A)- Les principaux types de chaux	24
a)- La chaux aérienne	24
b)- La chaux hydraulique	25
c)- La chaux magnésienne	25
B)- Avantages de la chaux	25
II.5.2. Traitement des sols au tuf.....	26
A)- Les encroûtements calcaires	27
B)- Les encroûtements gypseux	27
C)- Les encroûtements mixtes.....	27
II.5.3. les tufs en technique routière	28
II.5.4. Avantages des tufs	28
III.5.5. Traitement des sols avec ajout de granulats de caoutchouc recyclés.....	29
A. Définitions.....	29
B. Pneus et Environnement.....	30
C. Recyclage des matériaux.....	30
II.6. Conclusion.....	32

II.1. Introduction

Toutes les chaussées anciennes ont été construites pour une circulation peu intense, de façon absolument empirique, en prenant simplement quelques précautions lorsque le terrain était visiblement peu résistant. Il en résulte que la plupart d'entre elles sont incapables de supporter la circulation lourde en progression rapide, et, si on ne prenait aucune mesure, évolueraient très rapidement vers la ruine.

Pour remédier à ce problème, plusieurs techniques ont été proposées pour le traitement des couches d'assise dont le but est, d'augmenter la densité d'une part, et la résistance globale de la chaussée d'autre part.

Dans ce chapitre, sont présentées les différentes pathologies des chaussées, les causes principales, les techniques de stabilisation utilisées dans notre étude, pour le traitement de la couche de base par ajout de tuf, de chaux vive et de granulats de caoutchouc obtenus après broyage des pneumatiques usagés.

II.2. Pathologies des chaussées**II.2.1. Tassements**

Le tassement d'un sol est, sa déformation verticale, due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids.

Les tassements peuvent être uniformes, ou différents d'un point, à un autre selon la nature de sol en place. Dans les sols non saturés, les tassements sont presque instantanés, mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables.



Figure II.1. Tassement

II.2.2. Glissements

Ces mouvements, au sens large du terme, consistent en un déplacement plus ou moins continu, d'un versant instable de montagne, ou de colline. Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydraulique ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites.

La masse de matériaux meubles, ou rocheux fracturés se détache suivant une ou plusieurs surfaces de rupture par cisaillement, qui correspondent souvent à des discontinuités préexistantes, visibles ou non, et de formes diverses.



Figure II.2. Glissement

II.2.3. Les dégradations

Peuvent être divisées selon le catalogue des dégradations, des surfaces des chaussées, en quatre familles : les arrachements, les mouvements de matériaux, les dégradations de déformations et les fissures [12], [15] .

II.2.3.1. Les dégradations d'arrachement

Érosion du mastic et perte des gros granulats en surface, produisant une détérioration progressive du revêtement. Ces dégradations concernent plutôt, la qualité de la couche de surface. Ces phénomènes sont dus, soit à l'usure de la couche de surface par trafic intense, soit au sous-dosage du bitume ou mauvais enrobage et compactage insuffisant.



Figure II.3. Dégradation d'arrachement

II.2.3.2. Le mouvement des matériaux

Ces dégradations sont causées par, des remontées du liant à la surface de la chaussée, par l'enfoncement de gravillons dans l'enrobé, en période chaude. Les causes probables sont dues : à un surdosage du bitume, effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic, excès de liant d'accrochage et formulation d'enrobé, inadaptée aux sollicitations.

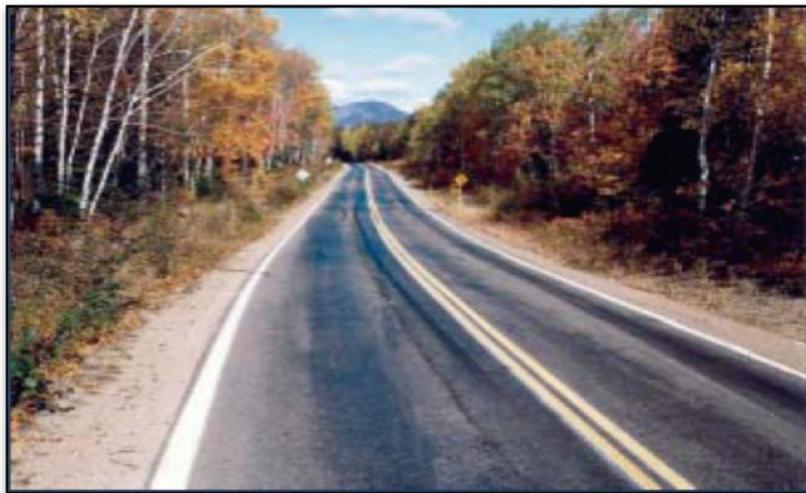


Figure II.4. Ressuage

II.2.3.3. Dégradations de déformation

Les dégradations de déformation sont, en générale celles qui engendrent des déformations visibles en surface, comme les phénomènes irréversibles suivants : l'ornièrre, l'affaissement, le gonflement, le bourrelet, le décalage du joint de dalle ou de bord de fissure, le flambement, etc.



Figure II.5. L'orniérage

II.2.3.4. Les fissures

Avec le problème de l'orniérage, les fissures sont considérées, comme un des plus grands modes de dégradation de chaussées. En effet, leur présence associée, ou non à l'eau met en péril, la durabilité à terme de la structure, sous le passage répété de véhicules lourds.

Les principales fissures qu'on peut rencontrer dans les chaussées sont, les suivantes :



Figure II.6. Fissuration transversale



Figure II.7. Fissuration longitudinale



Figure II.8. Fissure en dalle



Figure II.9. Fissure d'adaptation



Figure II.10. Fissures diverses en Y

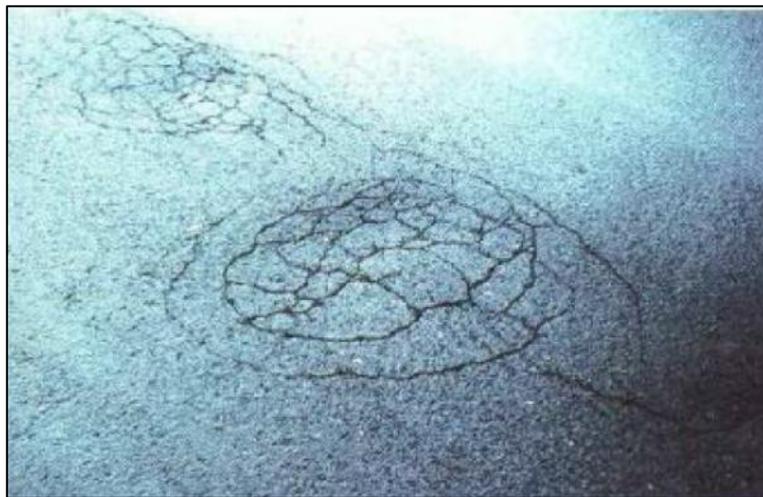


Figure II.11. Faïençage circulaire



Figure II.12. Cassure d'angle



Figure II.13. Fissure oblique

II.3. Causes principales des dégradations

Les chaussées évoluent et se dégradent essentiellement, sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution, et les désordres qui apparaissent sont également liés à la nature, à l'épaisseur des matériaux utilisés, à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre. Certains désordres consécutifs à l'instabilité du support de la chaussée (remblais ou terrain naturel) peuvent apparaître indépendamment du trafic et du climat [15].

Les principales causes de dégradation et d'usure des chaussées sont les suivantes :

II.3.1. Le trafic

Au passage d'un véhicule, la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue, les poids lourds sont particulièrement agressifs : le passage d'un essieu de 13 tonnes a autant d'effets sur la structure de la chaussée, que celui d'un million de véhicules de tourisme. La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée, qui présente alors des dégradations.

Le frottement des pneumatiques en mouvement sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement.

II.3.2. Les conditions climatiques

L'eau superficielle (pluie) ou interne (source) associée au problème du gel, entraîne de nombreux désordres, elle pénètre dans le corps de chaussée par infiltration, percolation ou remontée. Sachant que la teneur en eau d'un sol si elle est trop élevée, peut provoquer des

désordres importants en modifiant la portance, ou en favorisant l'attrition de certains granulats, comme les latérites.

De même, les variations de température influent sur, les revêtements bitumineux, qui sont très sensibles. Ainsi, l'exposition à des températures élevées, non prises en compte dans le choix d'un bitume, pourra entraîner un vieillissement rapide, de ce dernier et celui des chaussées.

II.3.3. Les malfaçons

Lors de la construction il arrive que la chaussée subisse des malfaçons diverses, que ce soit au niveau de la réalisation, ou encore de l'entretien. Ces malformations sont souvent causées par la mauvaise qualité, des matériaux utilisées, ou encore des épaisseurs insuffisantes, ou une mauvaise réalisation au cours de la mise en œuvre.

II.3.4. Les accidents et incidents

Des accidents de circulations, ainsi que des utilisations anormales, du domaine public peuvent être la cause de dégradations, ponctuelles dans la chaussée.

II.4. Techniques de stabilisation

Parmi les techniques de stabilisation les plus couramment utilisées, on distingue [12] :

- La stabilisation mécanique ;
- La stabilisation thermique ;
- La stabilisation chimique.

II.4.1. La stabilisation mécanique

A. Le compactage

Le compactage est, une étape importante de la stabilisation. Un simple compactage permet, de réduire la porosité du sol, en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques optimales de compactage du sol sont, déterminées par l'essai Proctor (normal ou modifié). Les caractéristiques mesurées, c'est-à-dire la teneur en eau optimale, permettant l'obtention de la densité sèche du sol, la plus élevée sont utilisées lors des études de la stabilisation et aussi lors de la réalisation sur le chantier.

B. La pose d'un géotextile

Les géotextiles sont, des matériaux perméables asservis, à des fonctions mécaniques et hydrauliques. Les géotextiles qui, exercent un rôle de stabilisation, procurent au sol des qualités, de résistance à la traction.

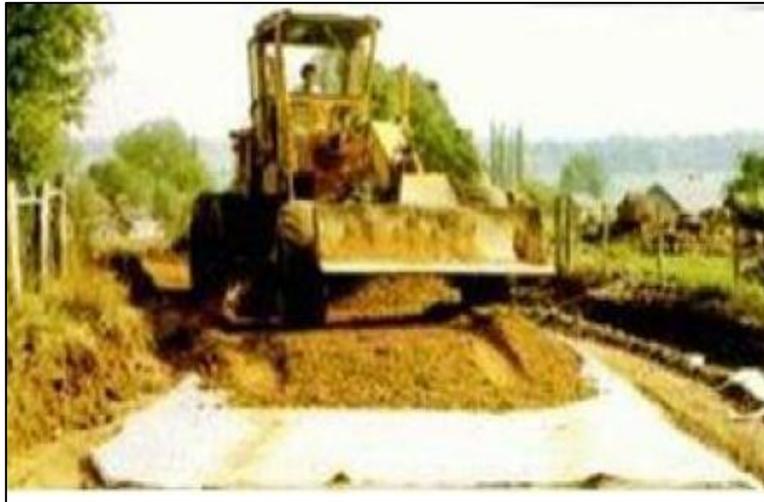


Figure II.14. Utilisation d'un géotextile

C. Drainage

C'est la technique la plus classique qui, est mise en œuvre. Plusieurs procédés sont utilisés, comme les tranchées drainantes, drains de carton, drains de sable verticaux, tapis de la cote de la nappe, etc.

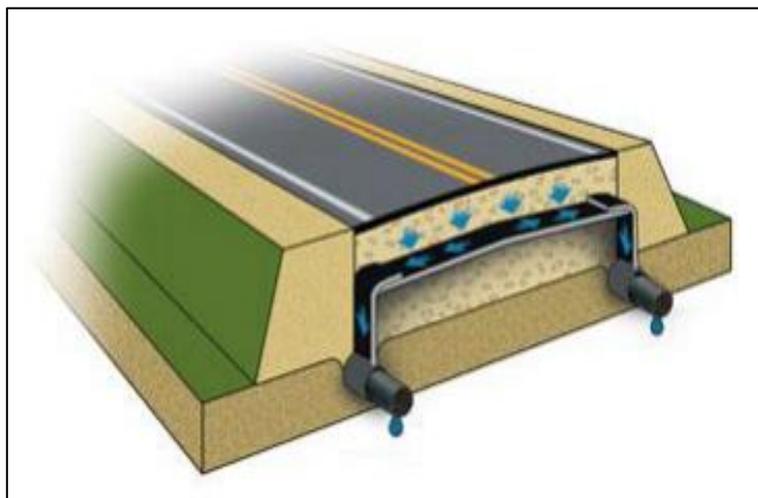


Figure II.15. Méthode de drainage

II.4.2. La stabilisation thermique

Une augmentation de la température peut améliorer la résistance d'un sol (cas des argiles). En réduisant la répulsion électrique, entre les particules sous l'effet de la chaleur, on provoque un écoulement de l'eau interstitielle, due au gradient thermique appliqué.

II.4.3. La stabilisation chimique

Elle se base sur, l'utilisation de produits chimiques, ou de solutions salines, ou de liants afin d'augmenter la concentration ionique de l'eau libre, et de réduire les phénomènes d'échange indésirables.

Les liants sont de deux types :

- Organiques (goudrons, bitume, résine naturelle, polymère, ...)
- Hydrauliques (ciment, chaux, cendres volantes, pouzzolane)

On s'intéressera dans le cadre de notre étude, à l'amélioration des caractéristiques mécaniques, d'un matériau utilisé pour la réalisation d'une couche de base, d'une chaussée souple, par ajout de chaux vive, de tuf et de granulats de caoutchouc obtenus après broyage des pneumatiques usagés.

II.5. présentation des techniques de traitement utilisées**II.5.1. Stabilisation des sols à la chaux**

La chaux provoque, deux actions différentes dans le sol : une action immédiate, qui se produit directement après que la chaux soit mélangée au sol et une action à long terme, qui peut durer, entre plusieurs mois et quelques années après la mise en œuvre [12].



Figure II.16. Traitement de sol par épandage de chaux

A)- Les principaux types de chaux

Il existe trois principaux groupes de chaux :

- La chaux aérienne ;
- La chaux hydraulique ;
- La chaux magnésienne.

a)- La chaux aérienne

La chaux aérienne peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte et lait de chaux, chacune d'entre elles présentant avec les sols des interactions spécifiques.

- La chaux vive

La chaux vive est obtenue par calcination du carbonate de calcium (CaCO_3), à une température supérieure à 900°C . Celui-ci est dissocié à cette température en oxyde de calcium, ou chaux vive, et en gaz carbonique :

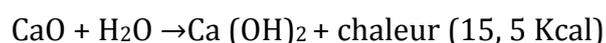


La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur puis se transforme en chaux éteinte. La chaux éteinte est employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie et la dépollution.

La chaux vive est caractérisée par son degré de calcination et la taille de ses particules. Le degré de calcination indique combien le dioxyde de carbone est extrait du calcaire. Dans le contrôle de la production, il est habituellement, mesuré comme CO_2 résiduel. L'hydratation de la chaux génère beaucoup de chaleur.

- La chaux éteinte

Appelée aussi chaux hydratée, elle est principalement constituée d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Elle est fabriquée par hydratation (extinction) de la chaux vive. La réaction d'hydratation est une réaction fortement exothermique :



L'extinction de la chaux vive par l'eau entraîne, une pulvérisation très fine du produit [32]. La chaux éteinte est, employée dans de nombreux domaines tels que le bâtiment, la sidérurgie et la dépollution.

- Lait de chaux

Le lait de chaux est, obtenu par mise en suspension de la chaux éteinte, dans de l'eau. La concentration varie entre 300 et 400 g de chaux éteinte par litre de lait. Le lait de chaux, peut également être préparé, à partir de chaux vive, mais des précautions particulières sont, à prendre en raison de l'exothermicité, de la réaction d'hydratation de l'oxyde de calcium. Son emploi en traitement de sol, présente l'avantage de supprimer la poussière et d'humidifier les sols secs (alors que la chaux vive achève au contraire de les dessécher).

b)- La chaux hydraulique

Elle est obtenue par cuisson, à température modérée, entre 900 et 1100°C, du calcaire marneux, contenant 6% à 20% d'impuretés argileuses. Au cours de la cuisson, après la décomposition du carbonate de calcium (CaCO_3), le monoxyde de calcium CaO s'allie à l'état solide avec les oxydes de silicium (SiO_2).

c)- La chaux magnésienne

Appelée aussi chaux dolomitique, elle provient de la calcination du calcaire contenant du magnésium (MgCO_3).

B)- Avantages de la chaux

Le traitement des sols en place à la chaux routier est, une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

❖ Avantages techniques

Le traitement des sols en place, à la chaux et/ou au liant hydraulique permet, la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables, à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition, des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle structure.

Cette technique assure, un bon comportement par, temps chaud sans déformation, ni orniérage et un bon comportement vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à la rigidité du matériau, et à l'effet de dalle induit. Enfin, le traitement des sols en place est, une technique possédant une facilité d'adaptation, aux contraintes d'exploitation.

❖ Avantages économiques

Le traitement des sols en place à la chaux est, une technique de traitement à froid, donc utilisant peu d'énergie. La réutilisation des matériaux en place est, un facteur d'économie important, puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats, et le cout de leur transport.

L'absence de transport de granulats, ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier, situé au voisinage du chantier.

Enfin, le traitement des sols en place est, une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux, par rapport à une solution, avec décaissement.

❖ Avantages écologiques et environnementaux

Le travail à froid réduit sensiblement la pollution, et le rejet de vapeur nocives dans l'atmosphère. En outre, cette technique permet, une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution des impacts indirects, des gênes à l'usager et aux riverains et une réduction de la fatigue du réseau routier adjacent au chantier.

La réutilisation des matériaux en place, limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables. Ce qui contribue à préserver l'environnement.

II.5.2. Traitement des sols au tuf

Les tufs se définissent, comme étant des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleur claire (blanche, jaune selon le carbonate de calcium qui entre dans sa composition) [9].

Elles sont très faibles en dureté, et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation. Suivant leur composition chimique, les tufs se groupent en trois catégories : les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes.



Figure II.17. Traitement par ajout de tuf

A)- Les encroûtements calcaires

Les tufs calcaires, existent dans la plus part des pays du bassin méditerranéen et occupent les zones à climat sec. L'abondance de cette ressource naturelle, fait que leur utilisation comme matériau routier est, devenue de plus en plus répandue.

La croûte calcaire est, un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré. Elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus au moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration.

B)- Les encroûtements gypseux

Les encroûtements gypseux sont, des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants, dans les régions à climat arides où les précipitations sont insuffisantes pour former le gypse, qui existe déjà dans les formations géologiques anciennes. Ce minéral qui, présente l'élément actif de la cimentation de ces formations, possède une dureté très faible : il peut être rayé à l'ongle; cette particularité pourrait paraître suffisante pour interdire l'utilisation du gypse comme matériau de chaussée, en zones climatiques subhumides et semi-arides.

C)- Les encroûtements mixtes

Les encroûtements mixtes sont, des formations de tufs calcaires gypsifiés à prédominance carbonatée, ou de tufs gypseux calcifiés à prédominance sulfatée.

Au-delà d'une certaine aridité, le développement des encroûtements calcaires est arrêté à la source, à cause de l'insuffisance des précipitations, pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques; et inversement, lorsqu'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable, les encroûtements gypseux sont, relayés alors par les encroûtements calcaires.

Les tufs gypso-calcaires et calcaire-gypseux qui, en résultent sont déconseillés en zones subhumides et semi-arides à cause de la solubilisation du gypse ; par contre, ils sont utilisés dans les régions arides.

II.5.3. les tufs en technique routière

Les tufs calcaires sont, utilisés en technique routière, selon leur qualité. Ils sont utilisés le plus souvent, sous forme de granulats non liés, pour la construction des chaussées, de moyen à faible trafic. L'utilisation la plus courante est, en assises de chaussée (couche de base et couche de fondation), d'autres usages sont fréquents : accotements, couche de forme, pistes agricoles, etc.

La figure II.18, présente l'utilisation du tuf, pour le renforcement et la réhabilitation de la liaison Tamanrasset - In Guezzam sur 150 Km de la route transsaharienne, qui constitue un vecteur de développement et un facteur de promotion des échanges avec les pays voisins.



Figure II.18. Renforcement de la RN01 entre Tamanrasset - In Guezzam.

II.5.4. Avantages des tufs

Le traitement des tufs est, préconisé dans des cas particuliers (zones soumises à des infiltrations souterraines ou à des ruissellements fréquents, matériaux présentant une insuffisance de leurs caractéristiques par rapport aux spécifications retenues).

Le tuf pourrait être utilisé soit avec une grave, soit avec un sable.

Les aspects économiques : sont évidents dans la mesure où l'utilisation du sable de dune permet une économie certaine, dans le transport des matériaux, car son extraction n'est pas coûteuse, et il est disponible d'une grande quantité, et on peut le mélanger avec d'autres matériaux facilement.

Les intérêts techniques sont de deux types :

- le tuf peut contribuer, à la densification des matériaux. Ceci permet, par la même occasion, l'amélioration de leurs caractéristiques géotechniques en augmentant le frottement interne et en améliorant la portance ;
- il peut être utilisé pour, diminuer la plasticité des matériaux de base.

III.5.5. Traitement des sols avec ajout de granulats de caoutchouc recyclés

Les techniques de traitement diffèrent, selon les propriétés recherchées, et se développent en fonction de la disponibilité des matériaux, ce qui incite les ingénieurs à faire appel, à de nouvelles techniques en recyclant les déchets, comme le caoutchouc, et toutefois protéger l'environnement [17].

A. Définitions

Un pneu est constitué de caoutchouc (naturel et artificiel), d'adjuvants chimiques (soufre, noir de carbone, huiles, etc.) et de câbles textiles et métalliques. Il entoure une roue et assure le contact entre un véhicule terrestre et le sol, facilitant ainsi les déplacements.

Mieux comprendre comment est composé le pneu permet de mieux analyser les produits qui peuvent en être retirés après un recyclage-matière.

L'enveloppe du pneu est décomposable en quatre éléments principaux suivants :

1. La carcasse : elle constitue le squelette du pneu. Supportant la charge, elle doit faire preuve de résistance et de souplesse. L'ossature du pneu est composée de couches de câbles de différents types (nylon, acier, rayonne, polyester, aramide.), enrobées de gommages.

2. Le talon : le talon est l'élément rigide de liaison entre la jante et le pneu. Il est composé d'une tringle de câbles d'acier à haute résistance.

3. La bande de roulement : elle est composée d'un mélange de caoutchoucs devant résister aux chocs, aux coupures, aux échauffements, à l'abrasion...

4. Le flanc : il est constitué de plusieurs types de caoutchoucs. Son rôle est double : il doit, dans sa partie supérieure protéger la carcasse contre les échauffements et l'abrasion, et dans sa partie inférieure (plus épaisse) protéger la carcasse des contacts avec le rebord de la jante.

Sur le plan chimique, un pneu est un matériau composite, à base de caoutchouc synthétique ou naturel, dans lequel sont ajoutés des éléments améliorant les qualités de résistance et de sécurité, tels les plastifiants, les charges renforçantes (noir de carbone), et les agents vulcanisant (dont le soufre).

B. Pneus et Environnement

Qu'ils soient émis dans l'atmosphère, déversés dans un cours d'eau ou qu'ils finissent comme déchets, tous les matériaux prélevés dans la nature tels que l'eau, le sable, le gravier et le caoutchouc sont restitués petit à petit à l'environnement sous une forme modifiée par des processus chimiques ou physiques. Il convient de valoriser les déchets lorsque le recyclage provoque une pollution de l'environnement moindre qu'un autre mode d'élimination et la fabrication de nouveaux produits.

Brûler des pneus produit beaucoup d'énergie, mais également une forte pollution. Le rechapage est possible et courant dans certains pays depuis longtemps pour les pneus de camions et gros engins de chantier public (il produit des pneus 40 % moins cher). Mais le recyclage intégral de la ferraille et du caoutchouc nécessite des filières organisées et des matériels sophistiqués. Le brûlage des pneus à l'air libre ou ailleurs qu'en incinérateur spécialisé est interdit dans la plupart des pays. Le pneu broyé est parfois brûlé dans les fours de cimenterie. Il existe de par le monde de nombreuses décharges de pneus.

Si on excepte les risques d'incendies des dépôts, le pneu usé ne constitue pas un réel danger pour l'environnement. Cependant, la masse sans cesse croissante de déchet, leur faible vitesse de dégradation et leur compressibilité sont autant de désavantages à leur enfouissement.

C. Recyclage des matériaux

Avec le progrès technologique et le développement de nouvelles machines, il est maintenant possible de réduire les pneus en copeaux et de séparer l'acier en une seule opération. Il existe également des procédés de séparation des matières constituantes des pneumatiques basés sur une réaction chimique et thermique.

Les principaux constituants des différents produits obtenus par broyage de pneus usés, sont : les granulats, les fibres textiles et les fibres métalliques.



Figure II.19. Les principaux constituants des différents produits obtenus par broyage de pneus usés.

Si l'armature métallique est aisément recyclée en aciérie, il n'en est pas de même pour le caoutchouc. Diverses voies de valorisation spécifiques sont envisageables :

- Utilisation du caoutchouc recyclé dans les revêtements routiers

De nombreuses études ont été menées dans le but d'améliorer la stabilité thermique et les caractéristiques des revêtements routiers. Une des possibilités est l'incorporation de caoutchouc recyclé dans l'asphalte.

Les bitumes avec mélange de granulats de caoutchouc recyclé permettent de limiter les nuisances sonores, d'améliorer la sécurité des automobilistes sur routes mouillées, de limiter les nuisances à l'environnement par une limitation du salage en hiver (du fait d'une meilleure tenue de route aux hautes et basses températures), tout en favorisant la valorisation des déchets locaux.

Les poudrettes de caoutchouc jouent également un rôle important dans la fabrication d'enrobés antibruit. L'amélioration des performances acoustiques provient de l'absorption des ondes de chocs du pneu en mouvement, par les particules de caoutchouc.

- Matière de remplissage légère pour les ouvrages de soutènement

Des murs de soutènement traditionnels ont été comparés à des murs de soutènement construits avec des pneus déchiquetés. Ces derniers se sont révélés assez stables et

entraînent une diminution de 60 % par rapport au coût des ouvrages remplis de sable. Cependant, l'applicabilité sur le terrain doit être approfondie.

- Couche drainante dans les décharges contrôlées

Des pneus déchiquetés sont utilisés avec des couches de sol pulvérulent comme substituts des agrégats naturels lors de l'établissement des réseaux de drainage. Des essais ont montré que les copeaux de pneus étaient chimiquement stables mais qu'il y avait un risque de perforation des géomembranes des décharges par les fils d'acier des pneus à ceinture filamentée.

- Terrains de sport et des aires de jeux pour enfants

Les surfaces sportives nécessitant de la souplesse sont constituées de couches de granulats en caoutchouc liés par un polyuréthane et d'un revêtement de surface (résine polyuréthane pour les gymnases, gazon synthétique...).

Sur les pistes d'athlétisme, le caoutchouc recyclé est mélangé au liant polyuréthane et coulé in situ pour former la couche de souplesse. Une couche d'usure en caoutchouc de synthèse coloré sera coulée au-dessus.

- Autres utilisations

Une partie du gisement des pneus usés servira en agriculture (couverture des silos), dans la marine, sur les circuits automobiles, etc.

II.6. Conclusion

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur stabilité mécanique et d'améliorer leur performance. La technique de stabilisation la plus reconnue est sans doute le compactage physico-mécanique qui augmente la stabilité mécanique de n'importe quel sol.

Les techniques de traitement en utilisant des matériaux locaux s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du Développement Durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Pas de transport de matériaux, ni de dépôt, donc diminution du coût!

En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres.

Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux.

La présentation et l'identification des différents matériaux utilisés pour, le traitement de la couche de base d'une chaussée souple, feront l'objet du chapitre (III) suivant.

CHAPITRE III

PRÉSENTATION ET IDENTIFICATION DES MATÉRIAUX

Sommaire du chapitre III

III.1. Introduction	34
III.2. Identification des matériaux	34
III.2.1. Les granulats	34
III.2.1.1. Analyse granulométrique (NF P 94- 040)	34
III.2.1.2. Caractéristiques physiques	36
a). Teneur en eau (w)	37
b). Les masses volumiques	37
b.1). La masse volumique sèche (ρ_d)	37
b.2). La masse volumique des grains solides (ρ_s)	37
c). Indice des vides (e)	37
d). Le degré de saturation (S_r)	38
e). La porosité (η)	38
III.2.1.3. Essai d'équivalent de sable	39
III.2.1.4. Essais de dureté	40
• Essais Los Angeles	40
• Essai Micro Deval humide	41
III.2.2. Les ajouts incorporés	42
III.2.2.1. La chaux vive :	42
A- Caractéristiques chimiques	42
A.1. Généralités	42
A.2. Composition chimique	42
B. Caractéristiques physiques	42
III.2.2.2. Granulats de caoutchouc	43
III.2.2.3. Le tuf	44
• Essai d'équivalent de sable	45
III.3. Conclusion	45

III.1. Introduction

Les différents matériaux utilisés dans la construction routière, doivent répondre à des impératifs de qualité, et à des caractéristiques propres, à chaque usage. Les granulats étant d'origines diverses : naturelle, alluvionnaire, calcaire, éruptive, voire artificielle ou provenant de sous-produits industriels, il est nécessaire d'en établir les caractéristiques par différents essais de laboratoire, dans le but de choisir une classification convenable.

Dans ce chapitre, sont présentés les différents résultats, obtenus après essais d'identification, sur les matériaux utilisés dans la couche de base, d'une chaussée souple (teneur en eau, masse volumique des grains solides, masse volumique sèche, indice des vides, porosité, degré de saturation, analyse granulométrique, équivalent de sable, etc.).

III.2. Identification des matériaux

En outre des normes européennes de mécanique des sols, les essais d'identification ont été traités et détaillés par plusieurs auteurs, parmi lesquels on citera : [Merrien, Amitrano et Piguet, 2005], [Léreau, 2006], [Dupain, Lanchon et Arroman, 2000], [Costet, Sanglerat, 1983], sur lesquels on s'est basé pour l'identification, des matériaux utilisés dans notre étude.

III.2.1. Les granulats

Une grave non traitée est un mélange à granularité continue, de cailloux, de graviers et de sable, avec généralement une certaine proportion de particules fines.

Dans la pratique courante, le granulat naturel provient du concassage et du criblage d'alluvions ou de roches massives.

Les granulats utilisés dans notre étude, pour la couche de base, ont été prélevés d'une carrière.

III.2.1.1. Analyse granulométrique (NF P 94- 040)

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

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon, en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures

sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne de tamis.



Figure III.1. Tamiseuse électrique

Les résultats de l'analyse granulométrique, des granulats utilisés pour la couche de base seront traduits sous forme de courbe appelée courbe granulométrique (voir figure).

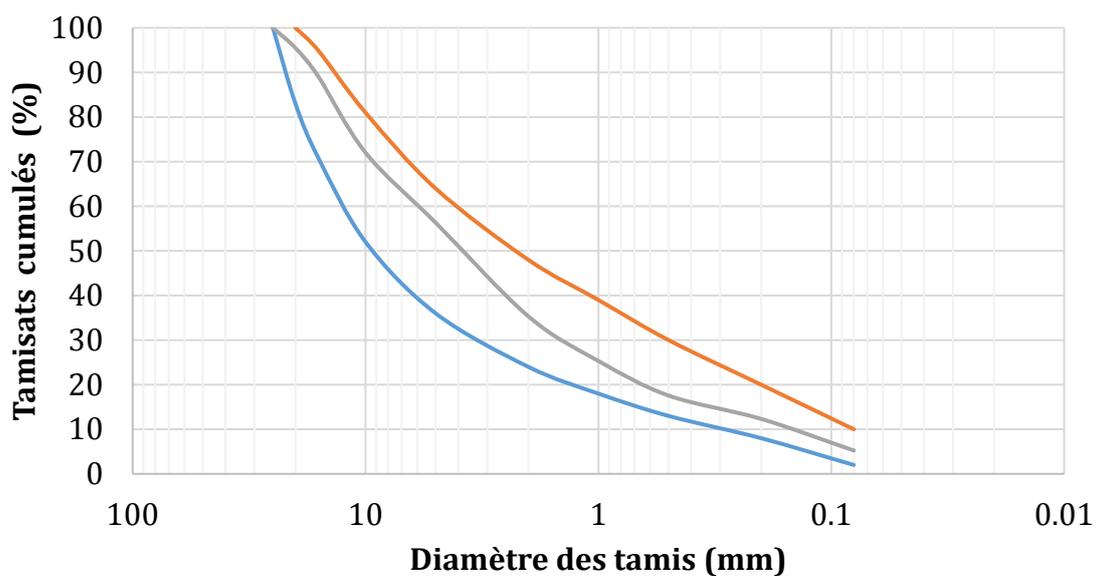


Figure III.2. Classe granulaire du matériau utilisé

La courbe granulométrique du matériau étudié, se situe dans le fuseau de courbes types, donc il est utilisable pour les couches de corps de chaussée.

Le coefficient d'uniformité, $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$: caractérise la pente de la courbe granulométrique.

Le coefficient de courbure, $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$: traduit la forme plus ou moins régulière de la courbe.

avec :

D_{10} : Diamètre correspondant à 10% des tamisât cumulés ;

D_{30} : Diamètre correspondant à 30% des tamisât cumulés ;

D_{60} : Diamètre correspondant à 60% des tamisât cumulés.

-Classification des granulats utilisés

Couche de base : (0/20)mm

On a : $C_u = 30$ et $C_c = 2.81$

-Plus de 50% des grains retenus sur le tamis 0.08mm,

-Moins de 50% des grains retenus sur le tamis 5mm,

-Moins de 5% des grains qui passent au tamis 0.08mm.

$C_u > 6$ et $1 < C_c < 3$

Selon le système unifié de classification des sols granulaires : les classes granulaires (0/20) des granulats utilisés, pour la couche d'assise présente un sable bien gradué, de symbole (SW).

III.2.1.2.Caractéristiques physiques

Pour mieux comprendre le comportement, mécanique des matériaux étudiés, ces derniers sont d'abord soumis à une série d'essais d'identification, permettant de déterminer leurs caractéristiques physiques.

a). Teneur en eau (w)

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

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

b). Les masses volumiques**b.1). La masse volumique sèche (ρ_d)**

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

On l'exprime par la formule :

$$\rho_d (\text{g/cm}^3) = \frac{M_s}{V} \quad (2.III)$$

b.2). La masse volumique des grains solides (ρ_s)

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

$$\rho_s (\text{g/cm}^3) = \frac{M_s}{V_s} \quad (3.III)$$

c). Indice des vides (e)

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

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

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

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \tag{5.III}$$

d). Le degré de saturation (Sr)

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

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \tag{6.III}$$

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

$$S_r = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \times \left(\frac{w}{e} \right) \tag{7.III}$$

e). La porosité (η)

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

$$\eta = \frac{V_v}{V} \tag{8.III}$$

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

$$\eta = \frac{e}{(e + 1)} \tag{9.III}$$

Les résultats obtenus après essais d'identification des granulats utilisés pour la couche de base sont représentés dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Caractéristiques physiques des granulats utilisés

Caractéristiques déterminées	Résultats
Teneur en eau naturelle : w(%)	4.62
Masse volumique sèche : ρd (g/cm3)	1.80
Masse volumique des grains solides : ρs (g/cm3)	2.60
Masse volumique humide : ρh (g/cm3)	1.88
Indice des vides : e(%)	44.44
Porosité : η(%)	30.55
Degré de saturation : (Sr)	2.78
Limites d'Atterberg : wl , wp et Ip (%)	Non mesurables

Tableau III.2. Classification selon la masse volumique sèche

ρ_d (g/cm ³)	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 - 1.8	Moyenne
> 1.8	Dense

Suivant le tableau ci-dessus, les granulats utilisés, présentent une masse volumique sèche moyenne.

Tableau III.3. Classification selon le degré de saturation.

État de sable	Sr (%)
Sec	0
Légèrement humide	1-25
Humide	26-50
Mouillé	51-75
Détrempé	76-99
Saturé	100

En se basant sur les intervalles présentés dans le tableau ci-dessus, le matériau étudié est humide.

III.2.1.3. Essai d'équivalent de sable

La norme NF P-598 a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Il se fait sur des matériaux inférieurs à 5mm. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci, donné par la formule suivante :

$$ES (\%) = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \tag{10.III}$$

Cet essai s'applique dans des nombreux domaines, notamment :

- le choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique ;
- contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique ;
- choix et contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés.

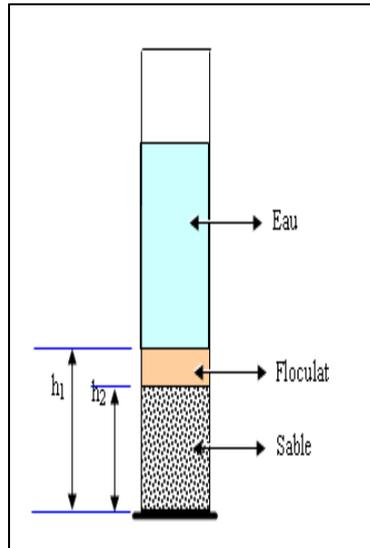


Figure III.3. Définition de l'équivalent de sable

Les résultats de l'essai sont représentés dans le tableau III.4.

Tableau III.4. Valeurs d'équivalent de sable

Echantillon	M(g)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ES (%)
1	120	10.5	6.9	65.71
2	120	10.1	6.5	64.35
moyenne	120	10.3	6.7	65.03

III.2.1.4.Essais de dureté

- Essais Los Angeles

L'essai Los Angeles selon la norme NF P 18-573 (octobre 1978) permet, de mesurer la résistance aux chocs d'un échantillon de sol, ou de granulats utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm produite, en soumettant (5Kg ± 2g) d'une fraction du matériau à tester, aux chocs de boulets métalliques normalisés, dans le cylindre de machine Los Angeles en rotation.

Le coefficient Los Angeles est, donné par la formule suivante :

$$L.A(\%) = \frac{5000 - m}{5000} \times 100 \tag{11.III}$$

avec :

m, est le refus au tamis 1.6mm.



Figure III.4. Appareil pour essai Los Angeles

- **Essai Micro Deval humide**

L'essai Micro Deval selon la norme NF P 18-572 (octobre 1978) permet, de mesurer dans des conditions bien définies, la résistance à l'usure des granulats, produite par frottements mutuels en présence d'eau, entre les granulats et une charge abrasive sous forme de billes d'acier, dans un cylindre en rotation.

Le coefficient Micro Deval est donné par la formule :

$$\text{MDE}(\%) = \frac{500 - m}{500} \times 100 \quad (12.III)$$

avec m, est le refus au tamis de 1.6 mm.



Figure III.5. Appareil pour essai Micro Deval.

Les résultats des essais Los Angeles et Micro Deval pour la couche d'assise sont récapitulés dans le tableau III.5.

Tableau III.5. Résultats des essais Los Angeles et Micro Deval

	Couche de base
Coefficient Los Angeles : LA	21.79
Coefficient Micro Deval : MDE	24.10

III.2.2. Les ajouts incorporés

Les matériaux de stabilisation utilisés (la chaux vive, le tuf et les granulats de caoutchouc), sont identifiés dans ce qui suit :

III.2.2.1. La chaux vive :

A titre indicatif, les spécifications relatives à la chaux vive figées selon la norme NF P 98-101 se résument à :

- Chaux libre $\geq 80 \%$
- $MgO \leq 8 \%$
- Granulométrie : 0/2 mm
- Réactivité : $t_{60} < 25$ minutes

A- Caractéristiques chimiques

A.1. Généralités

Formule chimique : CaO

Masse volumique en vrac : 0,7 à 1 t/m³

Point de fusion : 2580 °C

Solubilité à l'eau : 1,4 g/l

A.2. Composition chimique

% CaO + MgO $\geq 90\%$

% MgO $\leq 7\%$

% SO₃ $\leq 2 \%$

% CO₂ $\leq 6 \%$

% CaO libre $\geq 80\%$

B. Caractéristiques physiques

Réactivité à l'eau : stockage à l'abri de l'humidité

Formation d'hydroxyde par contact avec l'eau entraînant un dégagement de chaleur :

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 15,5 \text{ Kcal/mol}$

Masse volumique en vrac : 0,7 à 1 Kg/dm³

Granulométrie : passant à 5 mm : 100 %

Passant à 2 mm \geq 95 %

Passant à 0,2 mm \geq 70 %

Passant à 0,09 mm \geq 50 %



Figure III.6. La chaux vive

III.2.2.2. Granulats de caoutchouc

Les granulats de pneus utilisés, sont obtenus par broyage des morceaux de pneus usés (fin de vie), où le caoutchouc est séparé des fibres textiles et des fils métalliques que l'on trouve également dans les pneus.

Les granulats de pneus usés utilisés dans notre étude sont, de diamètre inférieur à 4mm.



Figure III.7. Granulats de caoutchouc

La courbe granulométrique choisie, des granulats de caoutchouc pour le traitement de la couche de base est la suivante :

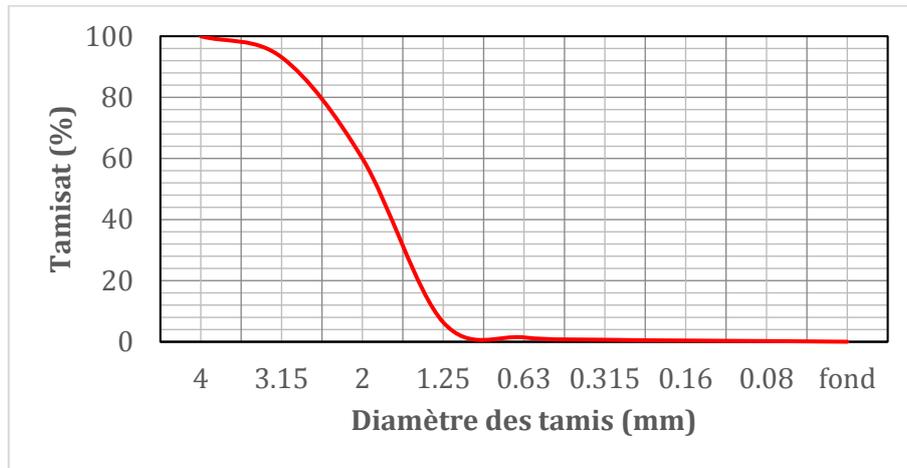


Figure III.8. Courbe granulométrique des granulats de caoutchouc

III.2.2.3. Le tuf

Les tufs se définissent, comme étant des formations superficielles, tendres, friables, poreuses, légères et de couleur claire (blanche, jaune selon le carbonate de calcium qui entre dans sa composition).



Figure III.9. Aspect de la roche du tuf



Figure III.10. Aspect des grains de tuf

- **Essai d'équivalent de sable**

Les résultats de l'essai sont représentés dans le tableau III.6.

Tableau III.6. Valeurs d'équivalent de sable

Echantillon	M(g)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ES (%)
1	120	10.3	3.2	31.06
2	120	9.5	2.9	30.52
moyenne	120	9.9	3.05	30.79

III.3. Conclusion

L'utilisation des matériaux de construction, en vue de réaliser un ouvrage quelconque, nécessite une reconnaissance assez détaillée des caractéristiques de ceux-ci.

Dans le présent chapitre, les matériaux étudiés sont, la grave (0/20mm), le tuf, les granulats de caoutchouc et la chaux vive. Les caractéristiques physiques sont déterminées à l'aide des essais d'identification.

Les différents matériaux utilisés, en construction routière, doivent être soumis à des essais mécaniques, pour étudier leur comportement sous différentes sollicitations.

La présentation des différents essais mécaniques auxquels on a soumis les matériaux étudiés, ainsi que les résultats obtenus, sont récapitulés dans le chapitre (IV) suivant.

Chapitre IV

LES ESSAIS MÉCANIQUES RÉALISÉS

Sommaire du chapitre IV

IV.1. Introduction	46
IV.2. Le compactage	46
IV.3. Principe de l'essai Proctor.....	48
IV.4. Essais Proctor (Modifié) (NF P 94-093).....	48
IV.4.1. Appareillage	48
IV.4.2. Mode opératoire de l'essai Proctor modifié	49
IV.4.3. Expression des résultats.....	50
IV.5. Essais C.B.R (NF P 94-078).....	51
IV.5.1.Principe de l'essai	53
IV.5.2.Matériel utilisé.....	53
IV.5.3. Mode opératoire.....	54
IV.6. Conclusion.....	56

IV.1. Introduction

La plupart des sols requièrent souvent une certaine stabilisation afin d'augmenter leur stabilité mécanique et d'améliorer leur performance. La technique de stabilisation la plus reconnue est sans doute le compactage physico-mécanique qui augmente la stabilité mécanique d'un sol.

Dans ce chapitre, sont présentées les différentes sollicitations auxquelles on a soumis les matériaux étudiés. On distingue deux séries d'essais : les essais Proctor modifié et les essais C.B.R (pour la couche de base, avec ajout de tuf, chaux et granulats de caoutchouc), réalisés au laboratoire de mécanique des sols de l'institut de génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et au laboratoire central des travaux publics de Tizi-Ouzou.

IV.2. Le compactage

Le compactage consiste, en une densification des sols, par application d'énergie mécanique, dans le but d'améliorer les propriétés, géotechniques des sols. Les principes du compactage, ont été exposés dans les années 1930 par Proctor. Celui-ci a mis au point, un essai de compactage normalisé, l'essai Proctor, et a démontré que le compactage dépend de trois facteurs : la teneur en eau, l'énergie de compactage, et le type de sol à compacter [3].

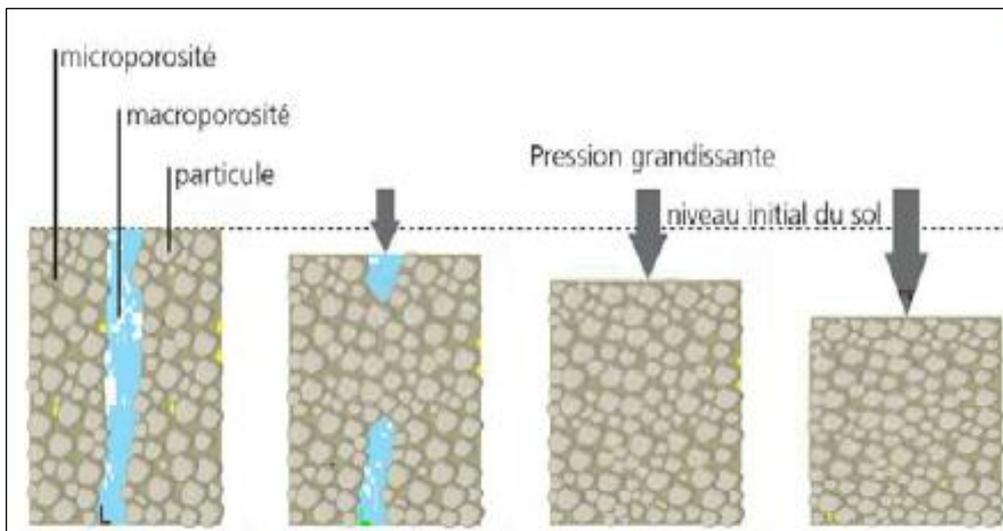


Figure IV.1. structure de sol avant et après compactage

Il existe deux types d'essais Proctor (Proctor normal et Proctor modifié), les principales caractéristiques des deux essais sont récapitulées dans les tableaux (VI.1) et (VI.2) suivants.

Tableau IV.1. Résumé des conditions de chaque essai selon le moule retenu (Norme NF P 94-093)

Essais	Masse du marteau (Kg)	Hauteur de chute du marteau (mm)	Nombre de couches	Volume du moule (cm ³)	Nombre de coups par couche	Energie de compactage (E.C)
Proctor normal	2.49	305	3	944	25	592
				2124	56	589
Proctor modifié	4.54	457	5	944	25	2695
				2124	56	2683

Tableau IV.2. Résumé des conditions de chaque essai selon le moule retenu (AFNOR, 1999)

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p> <p>Moule Proctor Dame Proctor normal Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche 56 coups par couche</p> <p>Moule Proctor Dame Proctor modifié Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

IV.3. Principe de l'essai Proctor

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage [2].

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes.

On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux.

Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la densité sèche maximum Proctor ».

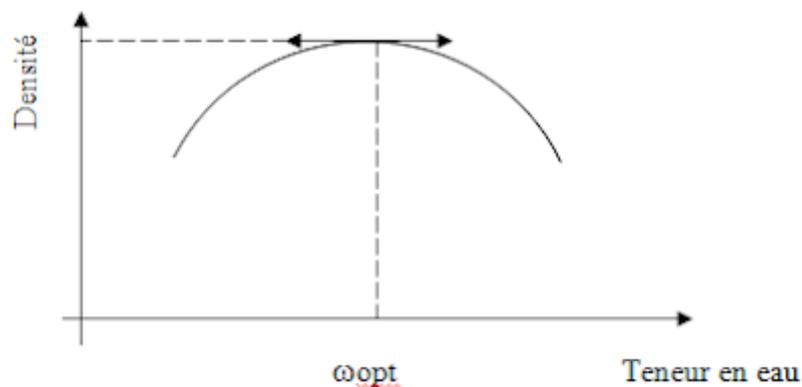


Figure IV.2. Diagramme Proctor simple

IV.4. Essais Proctor (Modifié) (NF P 94-093)

C'est l'étude de la variation de la masse volumique (avec recherche de la densité maximale) d'un sol, soumis à un compactage d'intensité donnée en fonction de l'évolution de sa teneur en eau. Autrement dit, il permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un sol, la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale correspondante.

IV.4.1. Appareillage

Il comprend :

- Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable de 15.24 cm de diamètre intérieur et 11,764cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles ;

- La dame Proctor qui est constitué d'un mouton de 4,54 kg dont la hauteur de chute est de 45.7 cm ;
- Une étuve ;
- Une règle à araser d'environ 250 mm ;
- Truelles pour le malaxage ;
- Des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage, ou mieux un appareil à démouler ;
- Une balance sensible au gramme d'une portée maxima au moins égale à 20 kg ;
- Une éprouvette graduée ;
- De l'eau et du matériau pour l'étude ;
- Un bac pour homogénéiser le mélange.

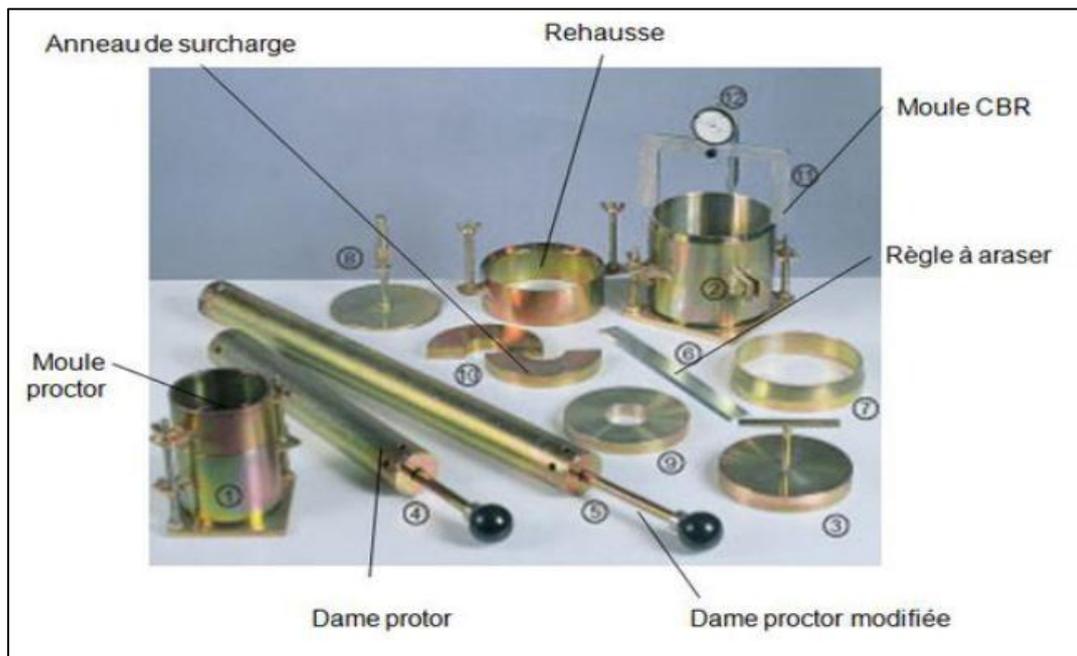


Figure IV.3. Appareillage Proctor et C.B.R

IV.4.2. Mode opératoire de l'essai Proctor modifié

1. On tamise un échantillon de sol représentatif.
2. Après séchage à l'air ou à une température ne dépassant pas 60°C pour les sables et les graviers, on sépare l'échantillon en quatre ou cinq parties (pour avoir quatre ou cinq éprouvettes), les échantillons destinés au moule de 944cm³ doivent avoir une masse d'environ 2.75Kg, ceux destinés au moule de 2124cm³ doivent peser environ 5.75Kg.
3. On règle la teneur en eau de chaque échantillon, de manière à ce que ces valeurs se répartissent de part et d'autre de la teneur en eau optimale.

D'un échantillon à l'autre, la teneur en eau doit augmenter de 1.5%, et pour que la teneur en eau soit homogène, chaque échantillon doit être malaxé soigneusement et couvert d'une molécule plastique jusqu'à son utilisation.

4. On prend le volume et la masse du moule vide, (la norme prescrit de refaire ces mesures toutes les milles utilisations).

5. On compacte chaque échantillon de sol en suivant la même méthode. On dépose dans le moule cinq couches égales de sol, en compactant chacune au moyen de 25 ou 56 coups de marteau, selon le moule utilisé. La distribution des coups doit être uniforme sur toute la surface, à des intervalles d'au moins une seconde et demie. Après avoir compacté les cinq couches, on enlève le collet et on arase le sol au niveau du moule (la dernière couche ne doit pas dépasser la hauteur intérieure du moule de plus de 6mm).

6. On pèse l'éprouvette humide immédiatement lors de son extraction du moule, et sèche après l'avoir laissée pendant 24 heures à l'étuve.

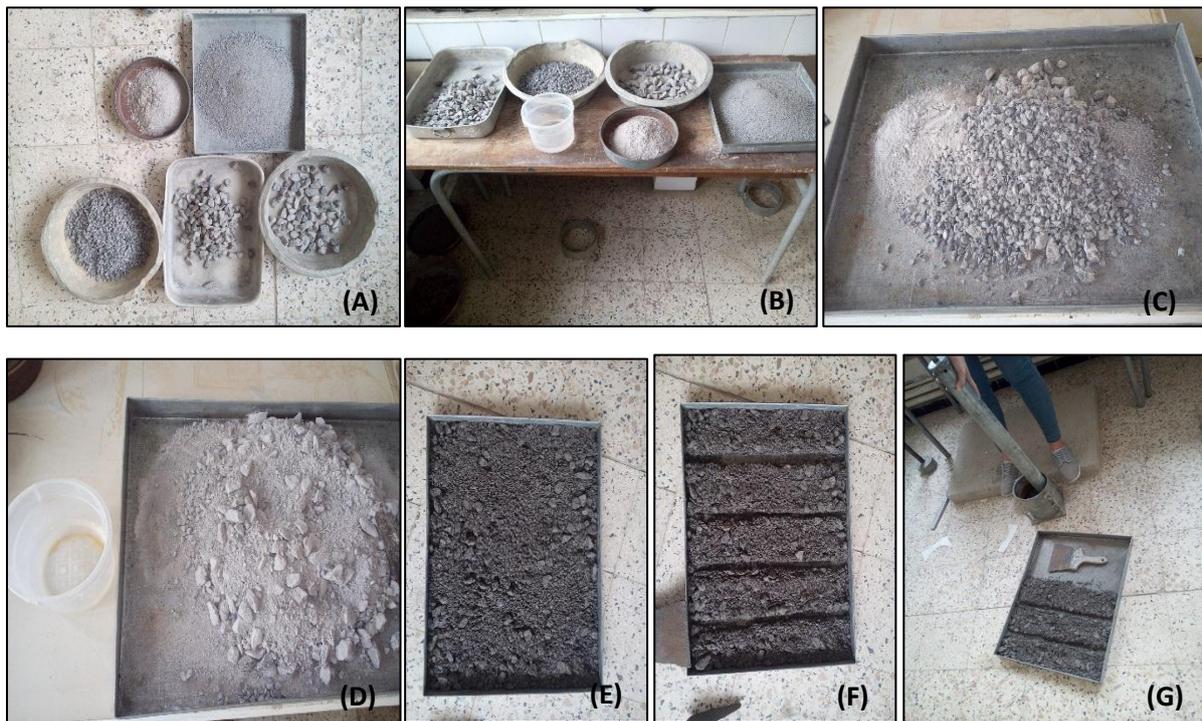


Figure IV.4. Étapes de l'essai Proctor Modifié

IV.4.3. Expression des résultats

Après avoir déterminé les poids sec et humide par pesées pour chaque éprouvette, la teneur en eau et la densité sèche seront déterminées à l'aide des formules suivantes :

$$W(\%) = \frac{P_h - P_s}{P_s} \tag{IV.1}$$

$$\gamma_d(\text{KN/m}^3) = \frac{P_s}{v} \tag{IV.2}$$

avec :

P_s : poids du sol sec [KN] ;

P_h : poids humide [KN] ;

w : teneur en eau [%] ;

γ_d : poids volumique sec [KN/m³] ;

V : volume du moule [cm³] ;

γ_w : poids volumique de l'eau, ($\gamma_w = 10$ KN/m³).

γ_d/γ_w : densité sèche

Les résultats de compactage selon le Proctor modifié des granulats utilisés dans la couche de base, sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3. Résultats du compactage des granulats utilisés

Matériaux	Ajouts (%)	(γ_d/γ_w) max	W_{opt} (%)
Granulats naturels	/	2.236	5.802
Granulats naturels + tuf	2	2.241	5.620
	4	2.245	5.400
	5	2.249	5.400
	6	2.250	5.230
	8	2.241	5.500
Granulats naturels + chaux	1	2.240	5.700
	2	2.245	5.500
	3	2.249	5.200
	4	2.252	5.180
	5	2.2475	5.235
Granulats naturels + Caoutchouc	2	2.237	5.300
	4	2.238	5.250
	5	2.220	5.320

IV.5. Essais C.B.R (NF P 94-078)

Les initiales C.B.R sont l'abréviation de CALIFORNIA BEARING RATIO. Cet essai de poinçonnement est aujourd'hui universellement employé pour apprécier la résistance des sols. Ainsi que son aptitude à supporter des charges routières pour permettre de dimensionner la couche de fondation.

On peut déterminer trois indices différents en fonction des buts fixés [1] :

L'indice Portant immédiat (IPI) : Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux. Le

poinçonnement se fait immédiatement après confection de l'éprouvette, sans utilisation des charges annulaires

L'indice C.B.R. immédiat : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau. Les conditions sont identiques à l'I.P.I, mais le poinçonnement se fait en chargeant l'éprouvette par les deux charges annulaires de 2.3Kg chacune, lesquelles représentent la surcharge de la chaussée.

L'indice C.B.R. après immersion : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique. On place sur l'échantillon, successivement, un disque de papier filtre, un disque perforé de gonflement et une charge constituée par des charges annulaires de 2.265g (au moins deux disques), représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate- forme de terrassement. On met le tout dans un bac rempli d'eau, la plaque de base étant un peu écartée du fond pour permettre le passage d'eau. Un comparateur tenu par un trépied placé sur le moule mesurera les variations de hauteur de l'échantillon. On remplit d'eau et l'on note la lecture de la mesure donnée par le comparateur au début de l'essai.

L'indice CBR est par convention, la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$I (2.5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN)}}{13.5} \times 100 \quad (\text{IV.3})$$

$$I (5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)}}{20} \times 100 \quad (\text{IV.4})$$

La capacité portante du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est plus élevé. Dans le cas de l'indice CBR après immersion, est calculé le gonflement linéaire relatif G :

$$G = \Delta h / H \times 100 \quad (\text{IV.5})$$

avec :

Δh : variation de hauteur mesurée (mm).

H : hauteur initiale de l'éprouvette, soit 116mm. La hauteur de gonflement (Δh) indiquée par le comparateur est mesurée après 4 jours d'immersion.

IV.5.1.Principe de l'essai

Cet essai simule la pression appliquée par des pneumatiques sur un sol de fondation, cette surcharge engendre un mouvement de la chaussée (déplacement vertical du sol).

On reproduira ce phénomène en compactant le matériau aux conditions de l'essai Proctor (généralement à la teneur en eau optimale) dans un moule C.B.R puis en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette.

IV.5.2.Matériel utilisé

- Moule CBR ;
- Dame Proctor modifié ;
- Disque d'espacement ;
- Règle à araser ;
- Bacs ;
- Eprouvette graduée ;
- Balance ;
- Etuve ;
- presse de compression (de 50 KN minimum et de 60 mm de course, équipée d'un poinçon cylindrique en acier de 19.35 cm² de section et de 20 cm de longueur).



Figure IV.5. Presse C.B.R

IV.5.3. Mode opératoire

1. Compacter à la teneur en eau optimale (w_{opt}), suivant le processus de l'essai Proctor modifié (moule C.B.R, dame lourde, cinq couches, cinquante-six coups par couche).

2. Araser le moule et déterminer la teneur en eau de la partie ainsi enlevée.

3. Enlever la plaque de base, ôter le disque d'espacement et retourner le moule, pour fixer sur la plaque de base l'extrémité qui était en haut, en interposant une feuille de papier filtre.

4. Peser l'ensemble, moule + plaque de base + contenu, à 1g près.

5. l'échantillon est ensuite soumis à un poinçonnement par application à une vitesse de 1.27 mm/mn, d'un piston cylindrique de 4.9 cm de diamètre.

- Le poinçonnement est réalisé grâce à une presse suffisamment puissante pour que la vitesse d'enfoncement puisse être maintenue constante.

-La pression est mesurée grâce à un anneau dynamométrique et l'enfoncement du piston grâce à un comparateur. L'essai est poursuivi jusqu'à un enfoncement de 5 mm et on trace la courbe des pressions en fonction des enfoncements.

-On mesure en fin les pressions nécessaires pour réaliser des enfoncements de 2.5 mm et 5mm. Par définition l'indice portant californien ou C.B.R est égal à la plus grande des deux valeurs : $P_{2.5}/0.7$ et $P_5/1.05$



Figure IV.6. Essai C.B.R, imbibition et gonflement



Figure IV.7. Eprouvettes après poinçonnement

Les résultats obtenus sur les essais C.B.R (I.P.I et C.B.R immersion), pour les granulats utilisés dans la couche de base avec et sans ajouts, sont représentés dans le tableau (IV.4).

Tableau IV.4. Résultats du compactage des granulats

Matériaux	Ajouts (%)	Résultats des essais C.B.R						
		Indice Portant Immédiat (I.P.I)			Indice C.B.R après immersion (C.B.R _{imm})			
		I (2.5) (%)	I (5) (%)	I.P.I (%)	I (2.5) (%)	I (5) (%)	C.B.R _{imm} (%)	G (%)
Granulats naturels	0%	51	75	75	31	56	56	0
Granulats naturels + chaux	1%d'ajout	65	78	78	38	59	59	0
	2%d'ajout	72	82	82	46	62	62	0
	3%d'ajout	75	89	89	54	65	65	0
	4%d'ajout	80	92	92	56	68	68	0
Granulats naturels + tuf	2%d'ajout	68	79	79	41	59	59	0.014
	4%d'ajout	78	84	84	47	61	61	0.025
	5%d'ajout	80	86	86	49	62	62	0.055
	6%d'ajout	82	89	89	53	64	64	0.085
Granulats naturels + Caoutchouc	1%d'ajout	52	76	76	35	57	57	0
	2%d'ajout	53	78	78	36	58	58	0
	3%d'ajout	54	79	79	39	59	59	0
	4%d'ajout	55	81	81	41	60	60	0

IV.6. Conclusion

Les essais Proctor et C.B.R sont très fréquents dans la géotechnique routière, ils nous permettent d'avoir une idée rapide et globale sur les caractéristiques du sol et de mettre un chiffre sur sa qualité de portance en fonction de la teneur des ajouts utilisés.

Les granulats utilisés dans ce travail présentent des résultats satisfaisants, avec les différents pourcentages d'ajouts.

La variation de la densité et de la teneur en eau, est fonction de la nature du matériau traité et du pourcentage d'ajout.

Les résultats obtenus sur les granulats soumis aux essais (Proctor, C.B.R) sont interprétés dans le chapitre (V) suivant.

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Sommaire du chapitre V

V.1. Introduction	57
V.2. Interprétation des résultats	57
V.2.1. Interprétation des résultats d'essais Proctor modifié.....	57
V.2.1.1. Traitement avec le tuf.....	57
V.2.1.2. Traitement avec la chaux	58
V.2.1.3. Traitement avec les granulats de caoutchouc	59
V.2.2. Etude comparative des trois techniques de traitement	60
V.2.2.1. Evolution de la densité sèche en fonction du pourcentage d'ajout.....	60
V.2.2.2. Evolution de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout	61
V.2.2. Interprétation des résultats d'essais C.B.R	62
V.2.2.1.Traitement avec le tuf.....	62
V.2.2.2. Traitement avec la chaux.....	63
V.2.2.3. Traitement avec les granulats de caoutchouc	64
V.2.2.4. Évolution de l'indice I.P.I et C.B.R _{imm} , en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout....	65
V.3. CONCLUSION	66

V.1. Introduction

Ce chapitre constitue la synthèse de cette étude. Il contient ainsi, toutes les interprétations et les courbes les plus significatives, montrant le comportement des granulats étudiés sous les différentes sollicitations.

On commencera par l'interprétation des résultats du compactage de la couche de base, avec les différents ajouts (tuf, chaux vive et granulats de caoutchouc recyclés), puisqu'ils constituent la première série des essais réalisés. On passera ensuite aux résultats des essais C.B.R après poinçonnement des échantillons, compactés à la teneur en eau optimale, obtenue lors des essais Proctor modifié, réalisés au niveau de laboratoire de la mécanique des sols de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

V.2. Interprétation des résultats

Les résultats expérimentaux relatifs, au compactage des différents matériaux utilisés, dans la couche de base, après ajout de tuf, de la chaux vive et de granulats de caoutchouc, sont illustrés par les courbes présentées sur les figures ci-après et interprétés au fur et à mesure en fonction, de la nature et du pourcentage d'ajout exigé selon le cas pratique.

V.2.1. Interprétation des résultats d'essais Proctor modifié

V.2.1.1. Traitement avec le tuf

La figure (V.1), regroupe les courbes Proctor des matériaux traités avec le tuf, pour la couche de base d'une chaussée souple.

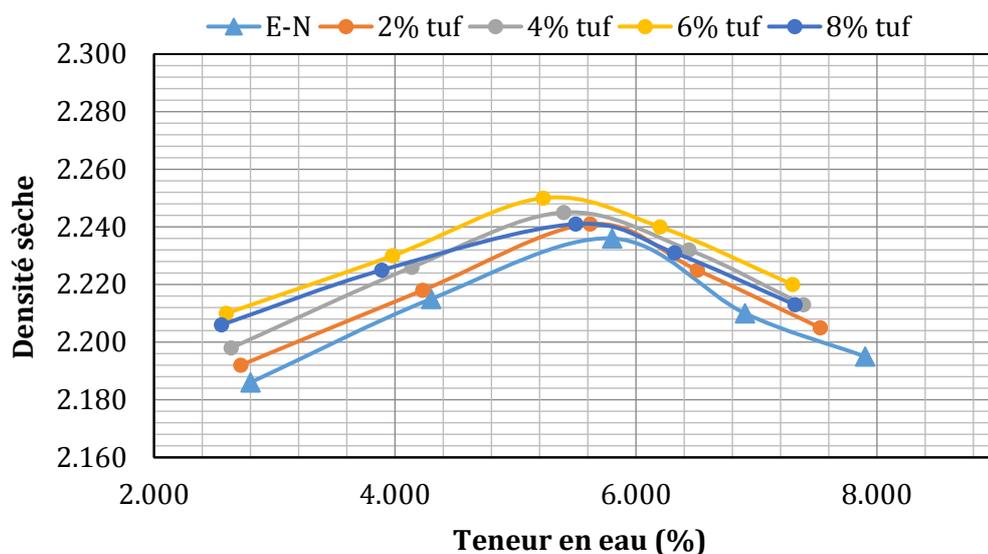


Figure V.1. Courbes Proctor, en fonction du pourcentage du tuf rajouté

En se référant à la figure (V.1), nous constatons que l'ajout du tuf, influe considérablement sur le comportement des granulats naturels de la couche de base au compactage.

La densité sèche du matériau utilisé, s'améliore sensiblement dès le premier ajout de tuf et atteint la valeur de 2.241. Elle s'améliore d'avantage pour atteindre la valeur de 2.250 avec l'ajout de 6% de tuf, et se dégrade à la valeur de 2.241 avec l'ajout de 8%.

La teneur en eau diminue dès le premier ajout de tuf et passe de la valeur 5.802% sans traitement à la valeur de 5.620% et 5.400%, pour les ajouts de 2% et 4% de tuf respectivement, et atteint la valeur de 5.230% avec l'ajout de 6% de tuf, pour augmenter à une valeur de 5.50% avec l'ajout de 8%.

V.2.1.2. Traitement avec la chaux

La figure (V.2), représente les courbes Proctor des matériaux traités avec la chaux, pour la couche de base d'une chaussée souple.

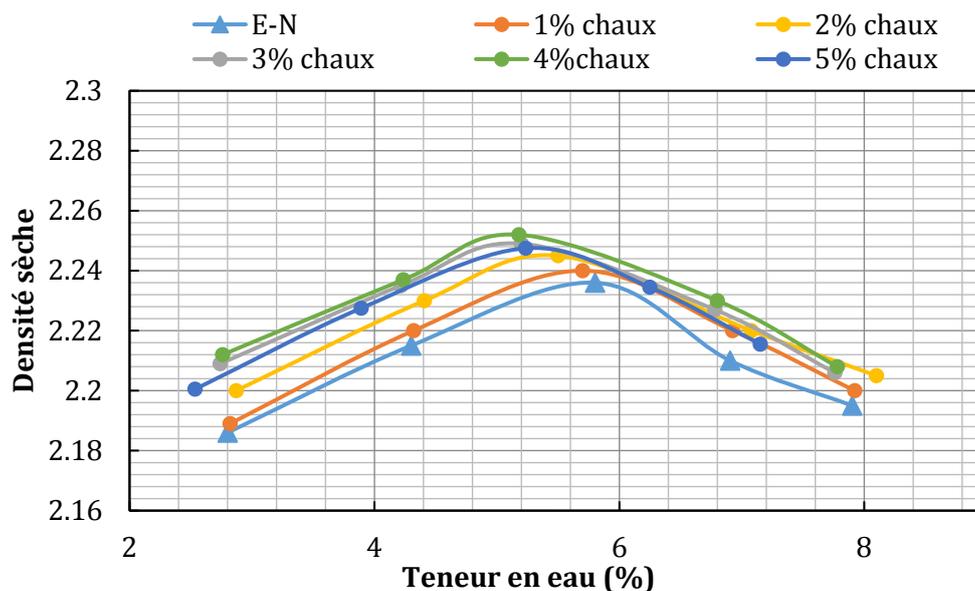


Figure V.2. Courbes Proctor, en fonction du pourcentage de la chaux rajouté

D'après la figure (V.2), nous constatons que l'ajout de la chaux, a permis d'augmenter la densité et de diminuer la teneur en eau, des granulats naturels.

La teneur en eau optimale est 5.802% à l'état naturel. Elle passe de 5.7% avec l'ajout de 1%, à la valeur de 5.2% avec l'ajout de 3% de la chaux, pour atteindre la valeur de 5.18% avec l'ajout de 4% de la chaux, et augmente à 5.235% avec l'ajout de 5%.

La densité sèche maximale est de 2.236 dans le cas sans traitement. Elle s'améliore légèrement avec le premier ajout et atteint les valeurs de 2.24, 2.245 et 2.249 avec les ajouts de 1%, 2% et 3% respectivement.

La densité sèche optimale est de 2.252 avec l'ajout de 4% de la chaux, cette densité se dégrade à 2.2475 pour l'ajout de 5% de la chaux.

V.2.1.3. Traitement avec les granulats de caoutchouc

Les figure (V.3), regroupe les courbes Proctor des matériaux traités avec les granulats de caoutchouc, pour la couche de base d'une chaussée souple.

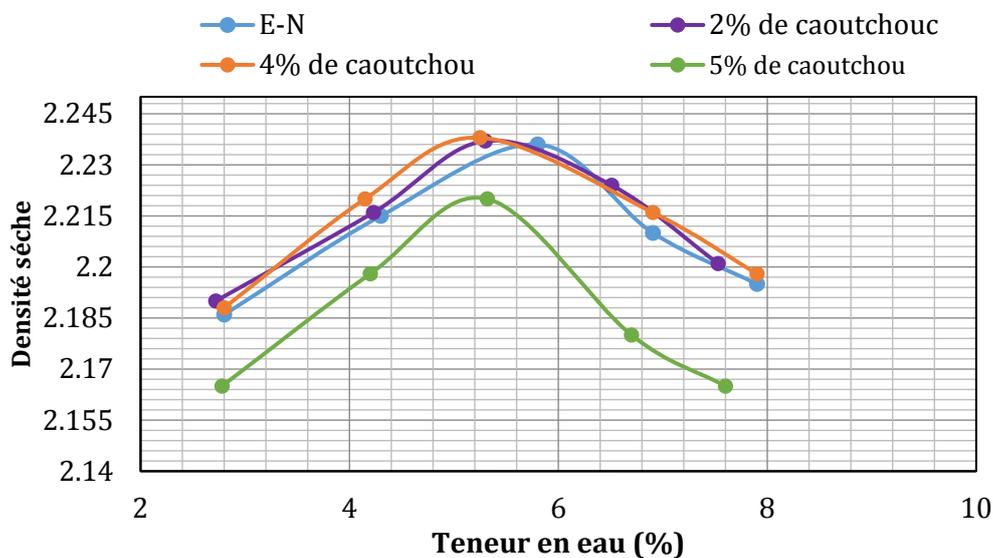


Figure V.3. Courbes Proctor, en fonction du pourcentage des granulats de caoutchouc rajouté

D'après la figure (V.3), la teneur en eau optimale est 5.802% à l'état naturel. Elle passe de 5.300% avec l'ajout de 2%, à la valeur de 5.250% avec l'ajout de 4% de caoutchouc, pour augmente et atteindre la valeur de 5.320% avec l'ajout de 5%.

La densité sèche maximale est de 2.236 dans le cas sans traitement. Elle s'améliore légèrement avec le premier ajout et atteint les valeurs de 2.237 et 2.238 avec les ajouts 2% et 4% respectivement, cette densité se dégrade à 2.220 pour l'ajout de 5% de caoutchouc.

V.2.2. Etude comparative des trois techniques de traitement

V.2.2.1. Evolution de la densité sèche en fonction du pourcentage d'ajout

La figure (V.4), regroupe l'évolution de la densité sèche du matériau, en fonction du du pourcentage d'ajout.

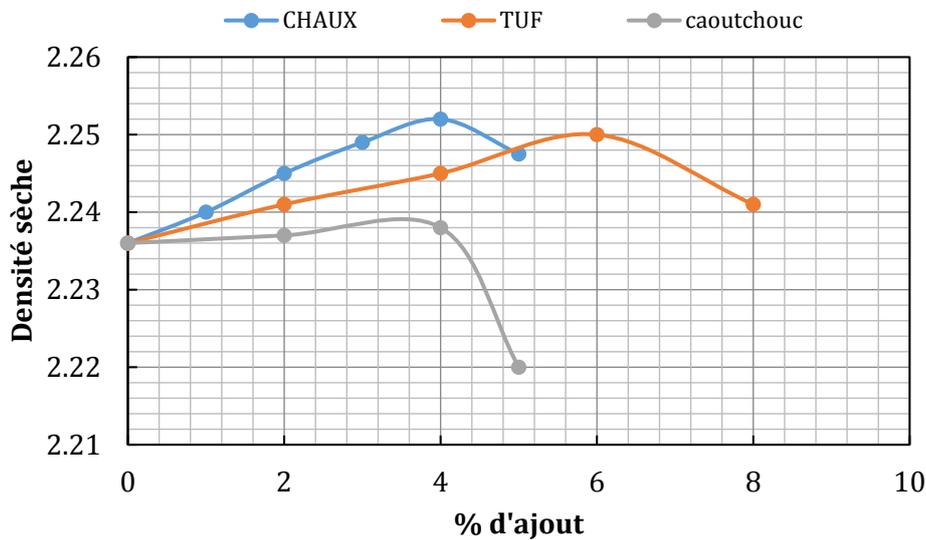


Figure V.4. Évolution de la densité sèche du matériau, en fonction du pourcentage d'ajout

Le traitement avec ajout de matériaux, de nature différente, nous a permis de remarquer, l'influence de ces trois ajouts sur le comportement du matériau au compactage.

D'après la figure (V.4), nous constatons que, le traitement avec la chaux présente des résultats meilleurs par rapport à celui du tuf et de granulats de caoutchouc. Cela peut se traduire par, le comportement de la chaux au compactage, qui a conduit à colmater les vides et à former une structure plus dense que celle obtenue par le tuf et les granulats de caoutchouc.

Les densités maximales pour la chaux et les granulats de caoutchouc, sont obtenues à une valeur de 4% d'ajout. Par contre, la densité du tuf peut atteindre jusqu'à 6%. Cela peut être dû à la nature du matériau d'une part, et à la forme des grains d'autre part.

V.2.2.2. Evolution de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout

La figure (V.5), représente l'évolution de la teneur en eau du matériau, en fonction du pourcentage d'ajout.

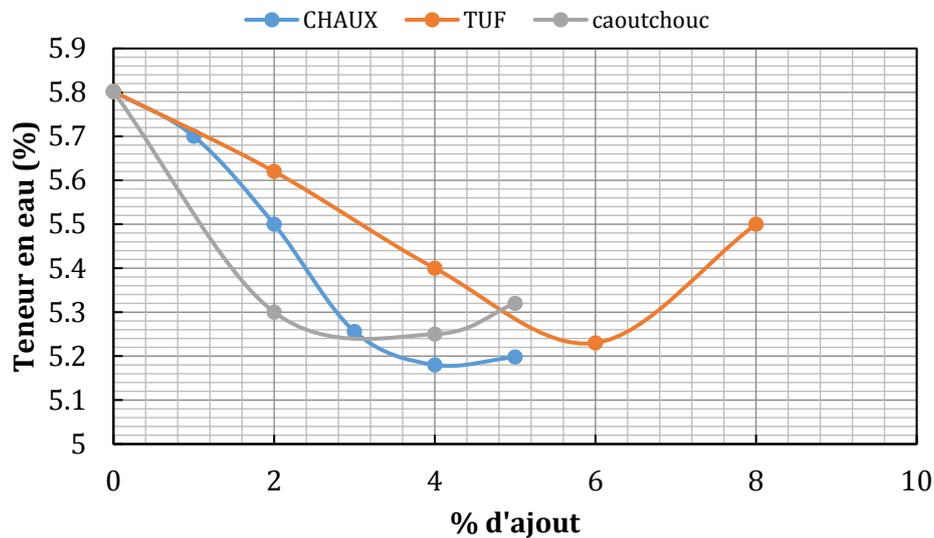


Figure V.5. Évolution de la teneur en eau en fonction du pourcentage d'ajout

D'après la figure (V.5), La teneur en eau du matériau étudié, varie en fonction de la nature et du pourcentage du liant rajouté.

À 2% d'ajout, les teneurs en eau sont 5.6%, 5.5% et 5.30% pour les ajouts de tuf, la chaux et le caoutchouc respectivement.

À 4% d'ajout, les teneurs en eau sont 5.40%, 5.18% et 5.250% pour les ajouts de tuf, la chaux et le caoutchouc respectivement.

La teneur en eau des trois ajouts augmente et reprennent leur allure et passent aux valeurs de 5.50% pour le tuf, 5.235% pour la chaux et 5.320% pour les ajouts de 8%, 5% et 5% respectivement.

D'après ces résultats, on déduit que le traitement à la chaux nous donne de meilleurs résultats. Cela est dû la réaction chimique de la chaux, en présence de l'eau qui a conduit à la diminution de la teneur en eau.

V.2.2. Interprétation des résultats d'essais C.B.R

V.2.2.1. Traitement avec le tuf

Les résultats expérimentaux relatifs aux essais de portance (C.B.R), avec un optimum d'ajout de tuf, sont présentés sur les figures suivantes :

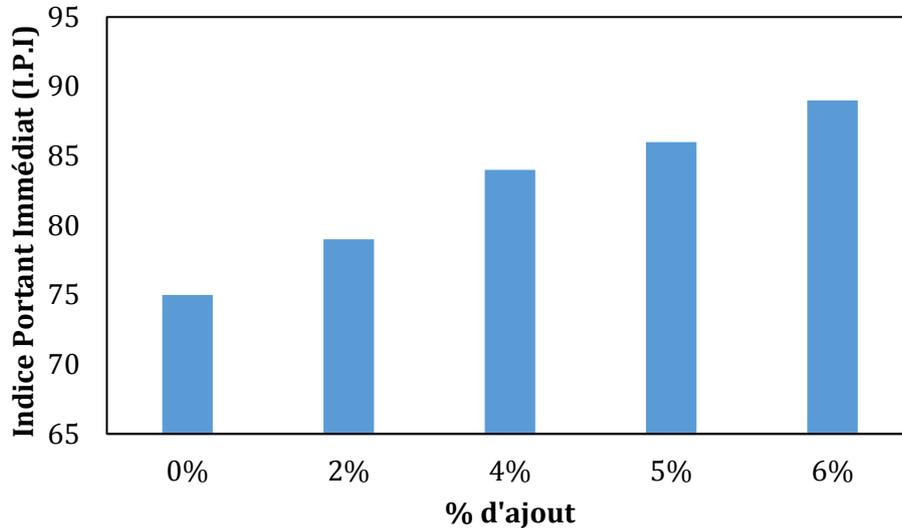


Figure V.6. Évolution de l'indice I.P.I, en fonction du pourcentage de tuf rajouté

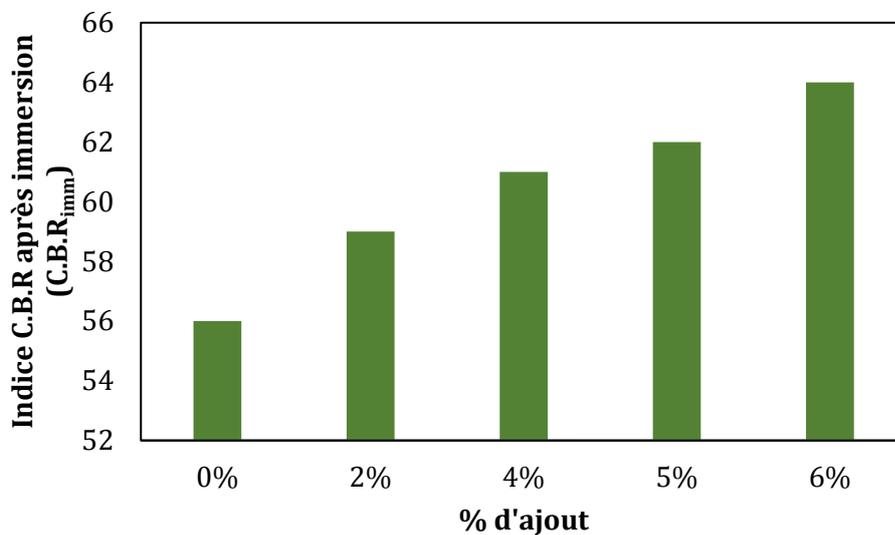


Figure V.7. Évolution de l'indice C.B.R_{imm}, en fonction du pourcentage de tuf rajouté.

Les figures (V.6) et (V.7) montrent que, les valeurs de l'I.P.I et de l'indice C.B.R_{imm} à l'état naturel, sont respectivement 75% et 56%. L'ajout de 2% à 6% de tuf, améliore la

portance du matériau pour atteindre les valeurs de 79% et 59% à 89% et 64% respectivement.

Les valeurs de l'indice portant immédiat (I.P.I) avant et après traitement, sont supérieures aux valeurs de l'indice C.B.R après immersion. Cela peut être dû à l'effet de l'eau sur la résistance du matériau traité.

V.2.2.2. Traitement avec la chaux

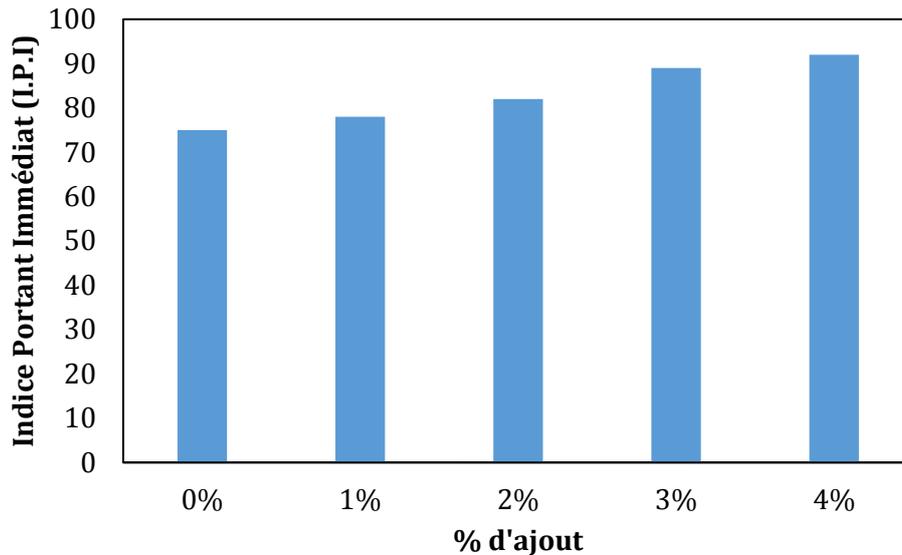


Figure V.8. Evolution de l'indice I.P.I, en fonction du pourcentage de la chaux rajouté

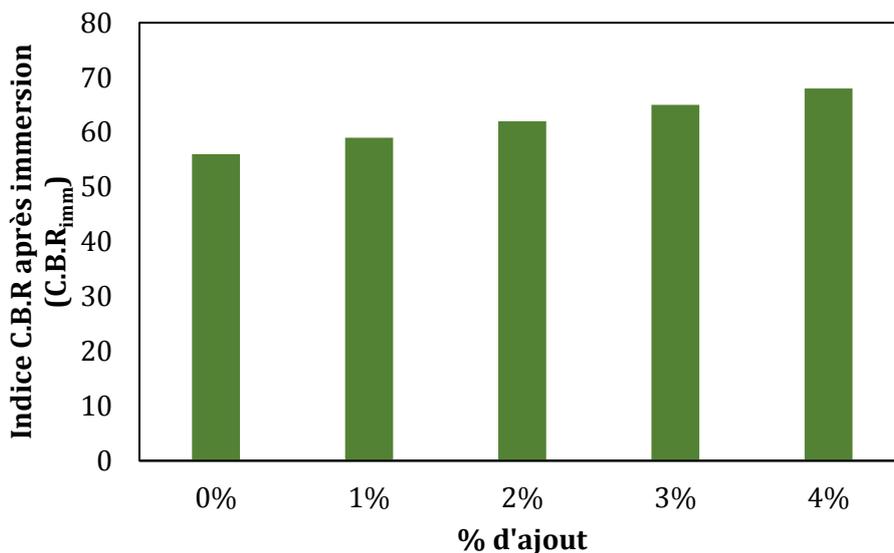


Figure V.9. Évolution de l'indice C.B.R_{imm}, en fonction du pourcentage de la chaux

Les figures (V.8) et (V.9) montrent que, le traitement avec ajout de la chaux, présente un comportement positif sous les essais de portance C.B.R.

Les valeurs de l'IPI et de l'indice C.B.R_{imm} à l'état naturel, sont respectivement 75% et 56%, Ces deux valeurs s'améliorent légèrement pour atteindre les valeurs de 78% et 59% respectivement à 1% de la chaux. L'ajout progressif des différents pourcentages d'ajouts, influe sur les valeurs de l'I.P.I et de l'indice C.B.R_{imm} jusqu'à atteindre les valeurs de 92% et 68% respectivement à 4% d'ajout de la chaux.

Les valeurs de l'indice portant immédiat (I.P.I) avant et après traitement, sont supérieures aux valeurs de l'indice C.B.R après immersion. Cela peut être dû à l'effet de l'eau sur la résistance du matériau traité.

V.2.2.3. Traitement avec les granulats de caoutchouc

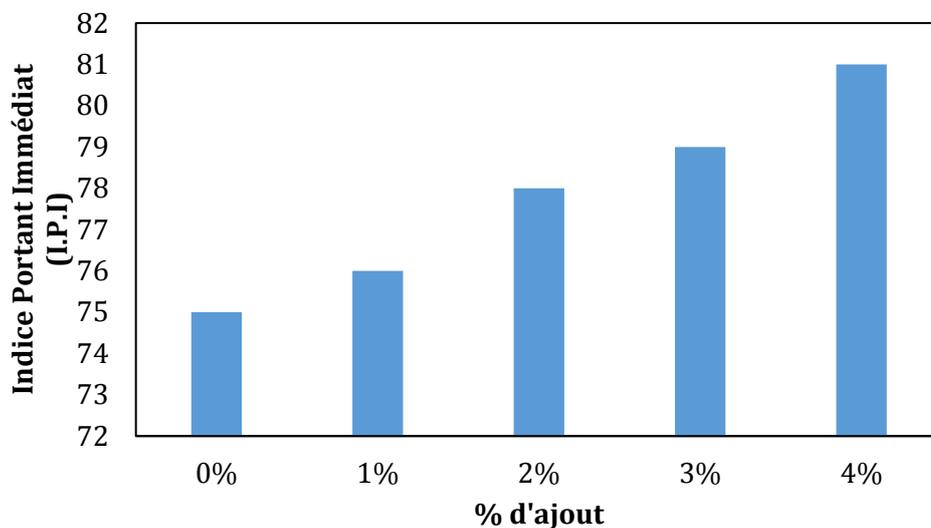


Figure V.10. Évolution de l'indice I.P.I, en fonction du pourcentage des granulats de caoutchouc rajouté

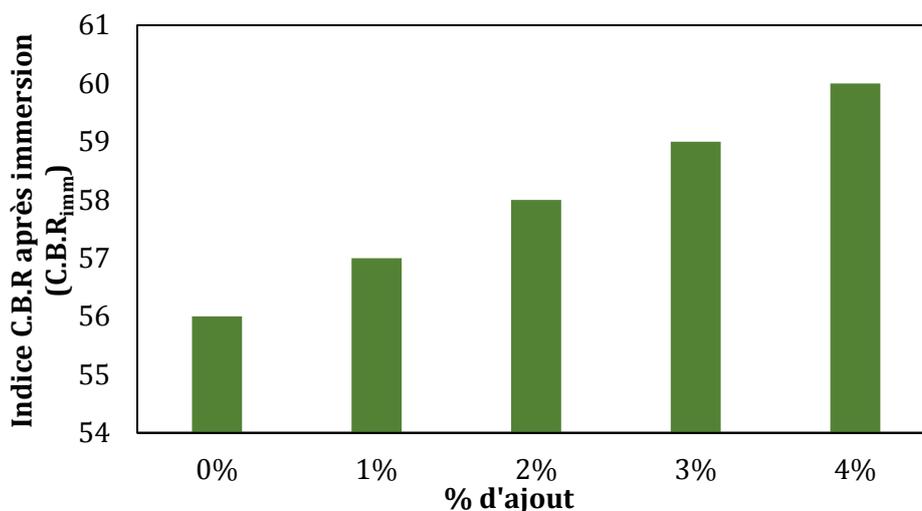


Figure V.11. Évolution de l'indice C.B.R_{imm}, en fonction du pourcentage des granulats de caoutchouc rajouté

Les figures (V.10) et (V.11) montrent que, les valeurs de l'I.P.I et de l'indice $C.B.R_{imm}$ à l'état naturel, sont respectivement 75% et 56%. L'ajout de 1% à 4% du caoutchouc, améliore la portance du matériau pour atteindre les valeurs de 76% et 57% à 81% et 60% respectivement.

Les valeurs de l'indice portant immédiat (I.P.I) avant et après traitement, sont supérieures aux valeurs de l'indice C.B.R après immersion. Cela peut être dû à l'effet de l'eau sur la résistance du matériau traité.

V.2.2.4. Évolution de l'indice I.P.I et $C.B.R_{imm}$, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout

La figure (V.12) et (V. 13), représentent respectivement, l'évolution de l'indice I.P.I et $C.B.R_{imm}$ et du matériau, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout.

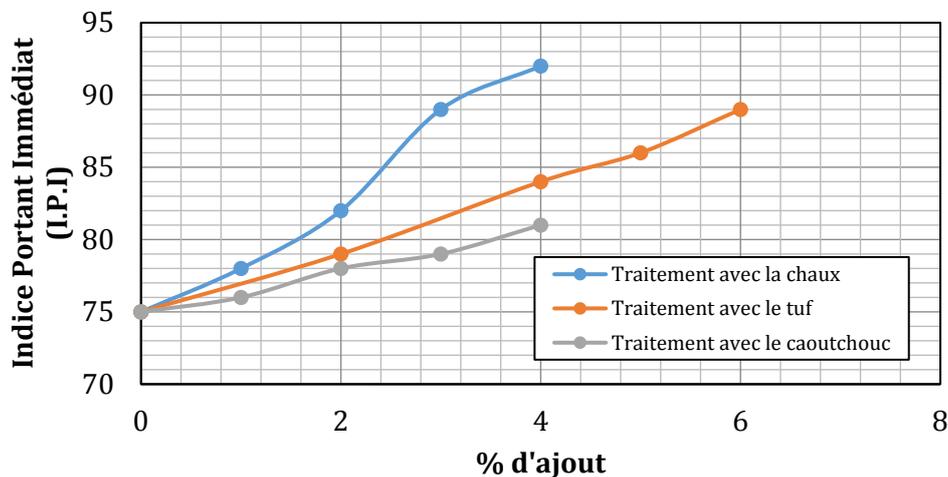


Figure V.12. Évolution de l'indice I.P.I, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout

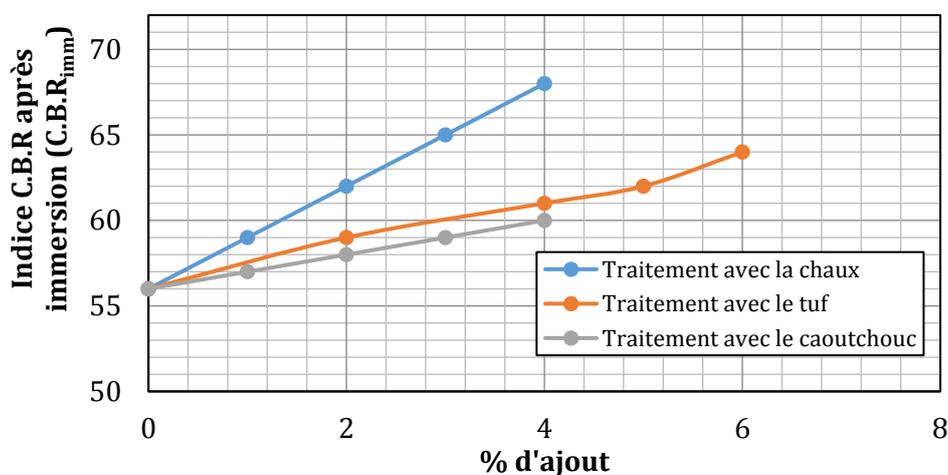


Figure V.13. Évolution de l'indice $C.B.R_{imm}$, en fonction de la nature et du pourcentage d'ajout

D'après les figures (V.12) et (V.13), on remarque que Les résultats obtenus avec l'ajout de chaux, sont supérieurs à ceux obtenus avec l'ajout du tuf et des granulats de caoutchouc. Cela peut être dû à la nature et au comportement du matériau, à l'état sec et en présence d'eau de l'ajout, utilisé pour le traitement.

Les valeurs de l'indice portant immédiat (I.P.I) avant et après traitement, sont supérieures aux valeurs de l'indice C.B.R après immersion. Cela peut être dû à l'effet de l'eau sur la résistance du matériau traité, mais restent des valeurs acceptables dans le domaine routier.

V.3. CONCLUSION

Les interprétations présentées dans ce chapitre, montrent des résultats positifs et satisfaisants, obtenus par des granulats naturels, utilisés dans la construction des couches de base d'une chaussée souple, stabilisés par différents ajouts et soumis sous sollicitations du compactage.

Les granulats utilisés ont présentés des densités sèches et des portances appréciables aux essais Proctor et aux essais C.B.R, notamment par le traitement effectué par ajout de la chaux.

L'ajout du tuf avec pourcentage différents au mélange granulaire utilisé, nous a permis d'améliorer la stabilité et la résistance des granulats.

L'ajout des granulats de caoutchouc avec des pourcentages différents au mélange granulaire utilisé, a légèrement amélioré la stabilité et la résistance des granulats.

Néanmoins, il faut signaler l'influence négative de l'ajout d'un pourcentage de granulats de caoutchouc supérieur à 5% sur la stabilité du mélange granulaire étudié.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans cette étude expérimentale, nous avons fixé comme objectif, la réduction de la sensibilité à l'eau des différents matériaux utilisés dans la construction, des couches de base des chaussées souples, pour leur conférer densité et cohésion, par ajout de différents pourcentages d'ajouts, de nature différente (tuf, chaux et granulats de caoutchouc recyclés).

Les différents granulats utilisés sont soumis aux essais d'identification, ensuite aux essais mécaniques, voire, les essais de compactage (Proctor modifié), les essais de portance (C.B.R), tout en leur incorporant des ajouts de tuf, de chaux et de granulats de caoutchouc obtenus après broyage des pneumatiques usagés.

Les résultats obtenus permettent de conclure ce qui suit :

Les courbes Proctor obtenues des matériaux étudiés, pour la couche de base, sont des courbes plates, c'est-à-dire que la densité sèche maximum varie peu lorsque la teneur en eau varie appréciablement, il y a toujours intérêt, pour arriver à la compacité et à la stabilité maximum, à bien contrôler la teneur en eau.

Après l'ajout des différents pourcentages de tuf, de chaux et de granulats de caoutchouc, les courbes restent plates pour les premiers pourcentages d'ajouts, mais au-delà de 4%, pour la chaux et les granulats de caoutchouc, la courbe devienne légèrement pointue, cela est dû à la sensibilité du matériau traité en présence d'eau et à la difficulté du compactage.

La variation de la densité et de la teneur en eau, est fonction de la nature du matériau traité et du pourcentage d'ajout.

- L'ajout du tuf nous a permis d'avoir une densité maximale de 2.249 à un pourcentage d'ajout de 5% pour une teneur en eau de 5.400%.

- L'ajout de la chaux nous a permis d'avoir une densité maximale de 2.252 à un pourcentage d'ajout de 4% pour une teneur en eau de 5.18%.

- L'ajout du caoutchouc nous a permis d'avoir une densité maximale de 2.238 à un pourcentage d'ajout de 4% pour une teneur en eau de 5.250%.

Les résultats obtenus montrent, l'influence positive des différents liants au compactage des granulats utilisés.

Les densités sèches sont améliorées, et les teneurs en eau optimales sont réduites, pour tous les échantillons avec les différents ajouts, de tuf et de chaux et de granulats de caoutchouc.

Les résultats obtenus pour le traitement avec la chaux, sont supérieurs à ceux obtenus pour les deux autres ajouts, cela est dû à la nature du liant et à la réaction chimique de ce matériau en présence de l'eau, qui a influencé sur le comportement des granulats au compactage.

L'ajout des différents pourcentages de granulats de caoutchouc, influe positivement sur la résistance du mélange granulaire. La densité maximale, atteint la valeur limite avec 4% d'ajout de granulats de caoutchouc, mais au-delà de cette valeur, la densité du matériau traité décroît, cela est dû à la difficulté de compacter le matériau traité.

Les différents granulats utilisés après traitement présentent des résultats satisfaisants aux essais C.B.R (I.P.I et C.B.Rimm). Les deux indices C.B.R obtenus pour les mélanges, sont supérieurs à ceux obtenus à l'état naturel (sans ajout).

Les granulats utilisés avec ou sans ajout présentent des gonflements très faibles après immersion de quatre jours dans l'eau, qui peuvent être considérés comme nuls. Cela traduit la stabilité de ces matériaux après leur mise en service même en présence d'eau.

Ces résultats permettent de les proposer initialement, pour une utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic. Toutefois, d'autres essais sont indispensables pour mieux cerner la réponse de ces matériaux, sous l'effet d'autres types de sollicitations et confirmer davantage leur utilisation dans le domaine routier, à savoir le comportement sous chargement cyclique, les essais à long terme sous l'effet de facteurs climatiques, etc.

En perspectives, il est souhaitable que le recyclage des pneus usés soit un domaine ouvert à l'innovation. Il est ainsi intéressant, d'associer les universitaires et les entreprises pour élargir de plus en plus, l'emploi de ce matériau en construction routière, dans le but de préserver l'environnement.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : [AFNOR, 1997], " Sols : reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion – Indice CBR Immédiat, 1997.
- [2] : [AFNOR, 1999], " Sols : reconnaissance et essais – Détermination des références de compactage d'un matériau – Essai Proctor Normal – Essai Proctor Modifié, 1999.
- [3] : [Arquie et Morel, 1988]- Georges Arquie et Guy Morel, " Le compactage ", édition Eyrolles, 1988.
- [4] : [Brunel, 2004-2005]- Hervé Brunel, " Cours de route", département de génie civil IUT Bourges, université d'Orléans, année universitaire, 2004-2005.
- [5] : [Coquand, 1978]- Roger Coquand, "Routes (Circulation – Tracé - Construction)", livre II" Construction et Entretien", 6^{ème} édition, Eyrolles, 1978.
- [6] : [Costet et Sanglerat, 1981]-Jean Costet et Guy Sanglerat, "Cours pratiques de mécanique des sols ", plasticité et calcul des tassements, 3^{ème} Edition, Dunod, janvier 1981.
- [7] : [Dupain, Lanchant et Saint-Arroman, 2000]- R. Dupain, R. Lanchon, J.C. Saint Arroman, "granulats, sols, ciments et bétons", caractérisations des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire ,2^{ème} édition, Casteilla, 2000.
- [8] : [Faure, 1998]- Michel Fauré, " Routes", cours de l'ENTPE, Tome II, édition Aléas, juin 1998.
- [9] : [Goual, 2012]- Idriss Goual, "Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application en construction routière", Thèse de doctorat en génie civil (Option : Géomatériaux), Université ABOUBAKR Belkaid, TLEMCEM, 2012.
- [10] : [Jeuffroy, 1974]- Georges Jeuffroy, "Conception et construction des chaussées", Tome II "les matériaux, les matériels, les techniques d'exécution des travaux",3^{ème} édition, Eyrolles, 1974.
- [11] : [Jeuffroy, Sauterey, 1985]- Georges Jeuffroy, Raymond Sauterey "Assises de chaussées", Département Edition de l'Association Amicale des Ingénieurs Anciens Elèves de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées, 1985.
- [12] : [Kelanemer et Hamadou, 2016]- Aboubakr Kelanemer et Mourade Hamadou, "Stabilisation du gonflement à la chaux et au ciment appliquée aux couches de formes des chaussées routières", Mémoire de Master en génie civil (Option : Géotechnique), UMBB, 2016.

[13] : [LCPC, 2000]- LCPC, "Réalisation des remblais et des couches de forme", Guide technique fascicules I et II 2^{ème} édition, juillet 2000.

[14] : [Léreau, 2006]- Jacques Léreau, "Cours de géotechnique", Institut National des Sciences appliquées de Toulouse, avril 2006.

[15] : [Manuel d'identification des dégradations des chaussées flexibles, 2002]- Association des ingénieurs municipaux du Québec, 2002.

[16] : [Merrien, Amitrano et Piguet, 2005]- V. Merrien-Soukatchoff, D. Amitrano et J.P.Piguet, "Elément de géotechnique", département sciences de la terre et environnement, Ecole des mines de Nancy, mai 2005.

[17] : [Meziani, 2008]- Faroudja Meziani, "Amélioration des caractéristiques mécaniques d'une couche de chaussée souple par des matériaux composites", Thèse de magistère en génie civil (Option : Géotechnique et Environnement), UMMTO, 2008.