



# Mémoire de Fin d'Etudes

## Présenté au

**Département** : Sciences de la Technologie  
**Domaine** : Sciences et Techniques  
**Filière** : Génie Civil  
**Spécialité** : Infrastructure de transport

## Réalisé par :

**CHOUKRI Mhamed et BAITICHE Nacereddine**

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

## Intitulé

*Valorisation de sable de dune traité aux liants hydraulique et la poudrette de caoutchouc des pneus usées en technique routières*

Soutenu le : 17/06/2017

Devant le jury de soutenance composé de :

MM : ZERGUIN abderahman	MAA	Univ. Djelfa	Président
BEKHITI Melik	MAA	Univ. Djelfa	Encadreur
DHIF foudhil	MAA	Univ. Djelfa	Examineur

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier infiniment Monsieur l'encadreur de mémoire **BEKHITI Melik** pour tous les conseils et les idées qu'il nous a donné et également pour son soutien moral et technique.

Nous exprimons notre profonde gratitude au chef de département pour ses encouragements et son assistance qu'il n'a cessé de nous prodiguer.

Nous exprimons nos vifs remerciements à Monsieur le président de jury, pour l'honneur qu'il nous 'a fait en présidant le jury de soutenance, nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance.

Nous tenons à exprimer notre sincère remerciement aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être membres de jury et de bien vouloir juger ce travail.

# Dedicaces

*Nous dédions ce modeste travail*

*À nos chers parents en témoignage pour leur amour et leurs sacrifices sans limites.*

*À nos frères et sœurs*

*À nos oncles, mes tantes, cousins et cousines ainsi qu'à toutes nos familles et tous nos amis.*

## ملخص:

يهدف هذا البحث إلى تثمين الكثيبان الرملية الموجودة بكميات معتبرة في منطقة الجلفة(الجزائر) بقصد استخدامه في عمليات إنشاء الطرق. تم اقتراح طريقة لصياغة الخليط في هذا البحث وذلك بتثبيت الرمل المدروس باستخدام مسحوق المطاط و رابط هيدروليكي (الجير)

بداية بتحديد قيم بروكتور المثالي لكل خليط ثم قياس مقاومة القص وأخيرا حساب المعامل (CBR) بالغمر وبدونه ومقاومة الانضغاط و الشد لمعرفة قدرة التحمل، بعد ذلك تجري تحليل لتأثير هذا الرابط الهيدروليكي في الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية أظهرت كل النتائج أن أداء الصيغ المختارة يعد كافيا لإستخدامها في أساسات الطرق.

**كلمات مفتاحية:** رمل زعفران - الجير - مسحوق المطاط – تجربة حجم الحبيبات "الغزيلة"- تجربة بروكتور-تجربة نسبة تحمل كاليفورنيا-CBRمقاومة القص الضغط البسيط الشد البسيط.

## Résumé:

Le but du travail présenté dans ce document est la valorisation du sable dunaire, qui est abondant dans la wilaya de Djelfa (Algérie). Cette étude à pour but de valoriser un matériel local dans la construction de routes. Plusieurs étapes ont été considérées dans cette recherche. On a proposé une méthode de formulation des mélanges, qui est basée sur la stabilisation des sables étudiés en utilisant un liant hydraulique (chaux)et la poudre de caoutchouc des pneus usées. Pour chaque mélange on déterminé, la teneur en optimum (Proctor modifié), la résistance au cisaillement, l'indice immédiat CBR immédiat et à l'immersion ; la résistance à la compression et la résistance à la traction, puis une analyse des résultats a été faite pour examiner l'influence d'origine de sable et la proportion d'agent de stabilisation sur les caractéristiques physiques et mécaniques des mélanges. Les résultats obtenus prouvent que les formulations choisies ont des exécutions suffisantes à employer dans les assises des chaussées des routes.

**Mots clés :** Sable de dune zaafrane, la chaux, la poudre de caoutchouc des pneus usées, Assises des chaussées, Comportement mécanique, Essai granulométrique, Essai de Proctor modifié, Essai CBR, Essais Cisaillement ; résistance à la compression.

## **Abstract**

The aim of the work presented in this paper is the valorization of dune sand, which is abundant in Djelfa(Algeria). This study consists of valorizing a local material in road construction. Several stages were considered in this investigation. A method of formulation of the mixtures has been proposed, which is based on the stabilization of the studied sands using a hydraulic binder (lime) and tyre rubber powder. For each mixture, the optimum Proctor, shear strength, immediate index CBR and immersion were determined. After that, an analysis of the results was made to examine the influence of the sand origin and the stabilization agent proportion on the physical and mechanical characteristics of mixtures. The stabilized sands were classified according to current standards; the optimal formulations were then selected, on which additional tests were carried out. The results obtained show that the formulations selected have sufficient performances to be used in road foundation.

**Keywords:** Dune sand Hydraulic binder (lime) • tyre rubber powder • Stabilization • Mechanical performances • Valorization • Road material

---

## Sommaire

Introduction générale	01
<b>CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
I.1 – Principaux modes de fonctionnement de dégradations des chaussées	03
I .1.1 Les chaussées souples	03
I.1.2 Les chaussées bitumineuses épaisses	04
I.1.3 - Les chaussées à assise traitée aux Liants hydrauliques	05
I.1.4 - Les chaussées à structure mixte	08
I.1.5 - Les structures inverses	09
I.2 - Facteurs influant sur les dégradations	10
I.2.1 - Facteurs extérieurs	10
I.2.2 - Facteurs liés à la structure	12
I.2.3 - Facteurs liés aux matériaux	13
I.2.3.1 - Tous matériaux	13
I.2.3.2 - Matériaux non traités	13
I.2.3.3 - Matériaux bitumineux	14

---

I.2.3.4 - Matériaux traités aux liants hydrauliques	15
I.3 - Le traitement des sols en place à la chaux	16
I.3.1 - Aperçu historique	16
I.3.2 - Le traitement des sols en place à la chaux	16
I.3.3 - La portance d'un sol	17
I.4 - Les sols	17
I.4.1 - définition	17
I.4.2 caractérisation	17
I.4.3 Avantage du traitement des sols	18
I.5 La chaux	18
I.5.1 Production des chaux vives	18
I.5.3 Etude préalable	19
I.5.4 Action de la chaux sur les sols	19
I.5.5 Teneur en eau	19
I.5.6 Amélioration des propriétés géotechniques	19
I.5.7 Modification à long terme d'un sol par l'ajout de chaux	20
I.5.8 Eléments perturbateurs de la prise du liant hydraulique	20
I.5.9 Autre types de traitements	20

---

**CHAPITRE II : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES**

II.1 Analyse chimique du sable de dune	23
II.2 Analyse minéralogique de sable de dune	23
II.3 Caractéristiques physiques	24
II.4 Caractéristiques mécaniques	24
II.4.1 Etude du sable	24
II.4.1.1 Analyses granulométriques et sédimentométriques	24
II.4.1.2- Essai de Proctor modifié	25
II 4.1.3 Equivalent de sable	26
II 4.1.4 ESSAI C.B.R	27
II. 4.2 Essai Résistance à la compression des mortiers et bétons	29
II.5 La chaux de SAIDA	30
II.5.1 Caractéristiques physiques	30
II.5.2 Temps de prise	31
II.5.3 Analyse chimique et minéralogique de la chaux	31
II.6 La poudrette de caoutchouc	32

---

## **CHAPITRE III : ETUDE DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MÉLANGES TRAITÉS**

III.1 INTRODUCTION	33
III.2 Influence de l'ajout de caoutchouc et de chaux sur les propriétés de sable	33
III.2.1 Effet de l'ajout de caoutchouc et de chaux sur la granulométrie	33
III.2.2 Effet de l'ajout de caoutchouc et de chaux sur les paramètres de Proctor	34
III.2.3 Effet de l'ajout de chaux sur le pourcentage des vides (Porosité)	36
III.3. Essai CBR immédiat et immersion	37
III.3.1 Principe	38
III.3.2 Résultats CBR immédiat	38
III.3.3 Exploitation des résultats	41
L'indice portatif Californien	41
III.3.4 Résultats CBR immersion	46
III.4 RESISTANCE AU CISAILLEMENT	53
III.4.1 Essai de cisaillement direct	53
III.4.2 Principe de l'essai	54
III.4.3 Les différents types d'essais	55
III.4.4 Choix des paramètres de résistance au cisaillement	55

III.5. Effet de caoutchouc et chaux sur la résistance mécanique	56
III.6 Resistance a la Compression	58
III.7 Resistance a la Traction	58
• Conclusion	59
<b>Conclusion Générale</b>	60
<b>Références Bibliographiques</b>	62
<b>Annexes</b>	65

## Listes des figures

<b>Figure I.1</b>	chaussées souples.	03
<b>Figure I.2</b>	chaussées Bitumineuses épaisses.	04
<b>Figure I.3</b>	chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.	06
<b>Figure I.4</b>	chaussées à structure mixte.	08
<b>Figure I.5</b>	chaussées à structure inverse.	09
<b>Figure I.6</b>	la Grande Muraille de Chine.	16
<b>Figure I.7</b>	traitement d'un sol en place à la chaux.	17
<b>Figure II.1</b>	Analyse minéralogique du sable de zaafrane	23
<b>Figure II.2</b>	courbe granulométrique de sable de zaafrane	25
<b>Figure II.3</b>	Essai de Proctor modifié de sable de zaafrane	26
<b>Figure II.4</b>	Aspect des poudrettes de caoutchouc	32
<b>Figure II.5</b>	courbe granulométrique de la poudrettes de caoutchouc	32
<b>Figure III.1</b>	Courbe granulométrique des différents mélanges (sable+caoutchouc(%) +chaux(%)).	33
<b>Figure III.2</b>	Essai de Proctor modifié pour sable seul	34
<b>Figure III.3</b>	Essai de Proctor modifié pour les mélanges sable + caoutchouc(%) chaux%	35
<b>Figure III.4</b>	Variation de la densité sèche $\gamma_d$ en fonction du pourcentage de caoutchouc et chaux	36
<b>Figure III.5</b>	Variation de porosité $n(\%)$ en fonction du pourcentage de caoutchouc et chaux ajouté	37
<b>Figure III.6</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable seul	39
<b>Figure III.7</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +8% caoutchouc+ 2% chaux	39

---

<b>Figure III.8</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +12% caoutchouc+ 3% chaux	40
<b>Figure III.9</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable+16% caoutchouc +4% chaux	40
<b>Figure III.10</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +20% caoutchouc 5% chaux	41
<b>Figure III.11</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de sable seul.	43
<b>Figure III.12</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable + 8% caoutchouc +2% chaux	43
<b>Figure III.13</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+ 12 % caoutchouc +3% chaux	44
<b>Figure III.14</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+16% caoutchouc +4% chaux	44
<b>Figure III.15</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+20% caoutchouc+5% chaux	45
<b>Figure III.16</b>	Evolution de CBR à 95% en fonction des pourcentages en caoutchouc et chaux	45
<b>Figure III.17</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable	46
<b>Figure III.18</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable+8% caoutchouc +2% chaux	47
<b>Figure III.19</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +12%caoutchouc +3% chaux	47
<b>Figure III.20</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable+16% caoutchouc +4% chaux	48
<b>Figure III.21</b>	Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable+20% caoutchouc+5% chaux	48
<b>Figure III.22</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de sable seul	50
<b>Figure III.23</b>	l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable +2% chaux	50

chaux.

- Figure III.24** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+12% caoutchouc +3% chaux 51
- Figure III.25** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable +16% caoutchouc+4%chaux 51
- Figure III.26** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable +20% caoutchouc+5% chaux 52
- Figure III.27** Evolution de CBR à 95% en fonction des pourcentages en caoutchouc et chaux 52
- Figure III.28** Principe d un essai de cisaillement rectiligne à la boîte 54
- Figure III.29** Les caractéristiques mécaniques de résistance au cisaillement 54
- Figure III.30** Variation de cohésion en fonction des pourcentages de caoutchouc et chaux 57
- Figure III.31** Variation de l angle de frottement en fonction des pourcentages de caoutchouc et chaux 57
- Figure III.32** Variation de la résistance à la compression en fonction des pourcentages de caoutchouc et chaux 58
- Figure III.33** Variation de la résistance à la traction en fonction des pourcentages de caoutchouc et chaux 58

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b>	Analyse chimique de sablede ZAAFRANE	23
<b>Tableau II.2</b>	Caractéristiques physiques du sable	24
<b>Tableau II.3</b>	Résultats de l'essai de Proctor modifié	26
<b>Tableau II.4</b>	Caractéristiques physique de sable	27
<b>Tableau II.5</b>	Caractéristique de la chaux	31
<b>Tableau II.6</b>	Résultats des caractéristiques physiques de la chaux.	31
<b>Tableau II.7</b>	Analyse chimique et minéralogique de la chaux	31
<b>Tableau III.1</b>	Résultats de l'ajout de caoutchouc et chaux sur les paramètres de Proctor modifié	35
<b>Tableau III.2</b>	Résultats de l'ajout de caoutchouc et chaux sur le pourcentage des vides	36
<b>Tableau III.3</b>	Résultats obtenu pour le CBR à 95% de immédiat l'OPM	42
<b>Tableau III.4</b>	Résultats obtenu pour le CBR immersion à 95% de l'OPM	47
<b>Tableau III.5</b>	Vitesses des essais de cisaillement.	55
<b>Tableau III.6</b>	Choix des paramètres caractéristiques de cisaillement de sols cité par Smaida,2008)	56
<b>Tableau III.7</b>	Caractéristiques mécaniques des mélanges Sable de dune+caoutchouc(%) +chaux (%)	56

# Introduction Générale

## Introduction Générale

Le réseau routier Algérien avait atteint d'après le rapport de la direction des routes du ministère des travaux publics plus de 112696 km (Sebaa, 2006), dont 75% revêtus, sa valeur économique est estimée à environ 25 milliards de dollars.

Il reste l'infrastructure de transport prédominante par excellence, puisqu'il assure près de 90 % (Avec un taux de 30% de poids lourds) du volume des échanges, dont le plus important est enregistré sur le réseau économique de base. Cela reflète la prédominance du mode de transport routier par rapport aux autres modes.

Ce réseau est dominé par les échanges Est-Ouest, il est constitué d'un réseau principal de 22000 km et d'un réseau économique de base de 12000 km. 60% des routes Algériennes ont une largeur supérieure ou égale à 7 m, conçues totalement en structure souple. Le secteur des travaux publics a connu ces dernières années un regain de dynamisme, caractérisé par l'intensification du processus de relance de projet de construction et de réhabilitation du réseau routier après une décennie marquée par une sévère crise économique.

Au titre de l'année 2005, le secteur a enregistré : 2299 km de réhabilitation, de renforcement et de modernisation, 612 km de construction en routes nationales et de chemins de wilayas ainsi qu'un linéaire de 350 km de routes (routes neuves ou renforcées) qui ont permis le désenclavement d'environ 600.000 habitants. (Bilan d'activité de développement 2005). En matière de développement, le secteur des travaux publics a poursuivi ses efforts et a enregistré des résultats très satisfaisants. Dans cette optique, les autorités du pays ont mis en place, à la faveur d'une embellie financière sans précédent, un ambitieux programme qui va contribuer au développement et au renforcement du réseau routier. Ce programme a été estimé à plus de 10 milliards de dollars, et porte sur la réalisation à l'échéance 2014 d'un nombre important de routes et autoroutes et ouvrages d'arts annexés, ainsi que la réhabilitation, le renforcement et l'aménagement de milliers de kilomètres de routes anciennes. Ces actions ont été complétées par un riche programme de développement et de désenclavement pour les régions des hauts plateaux et du Sud Algérien. Ce programme très ambitieux va connaître sans doute un besoin en matériaux de chaussées de plus en plus important qui dépasse ce que peut offrir la nature en graves « nobles ». Ces dernières sont considérées depuis longtemps, comme les seuls matériaux acceptables et qui répondent rigoureusement à certains critères géotechniques (dureté, propreté, granulométrie,... etc.)[02].

Par ailleurs, dans certaines régions, notamment sahariennes, ces matériaux sont rares voir même inexistant. Ceci a poussé les ingénieurs et les techniciens du domaine routier à recourir vers l'utilisation des matériaux locaux tels que les sables, tufs, les latérites, etc. en les adaptant aux particularités des zones arides liées aux conditions climatiques, aux matériaux locaux, au faible trafic et à la portance du sol support qui diffère de celle des régions humides.

La valorisation des matériaux locaux en géotechnique routière reste un thème d'actualité ; il s'agit de mieux maîtriser leur comportement et leur mise en œuvre dans diverses situations afin d'arriver à une caractérisation qui facilitera leur classification et leur utilisation par les ingénieurs et les techniciens du domaine routier.

Dans l'objectif de valorisation de sable de dune de la région de Djelfa(Algérie), l'idée de les associer avec un liant (chaux) et la poudre de caoutchouc des pneus usées en vue d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques peut s'avérer intéressante, non seulement d'un point de vue économique mais également environnemental. C'est dans cette optique que se sont orientés nos travaux. Il s'agit de l'étude du comportement mécanique d'un mélange de sable de dune ZAAFRANE et un liant hydraulique (chaux)+la poudre de caoutchouc des pneus usées en vue de son utilisation en techniques routières. L'originalité du présent travail réside premièrement dans le choix du mélange (Sable de dune+caoutchouc+Chaux), et le second est dans l'étude de son comportement et mécanique.

En premier lieu, on a cité les différents type des chaussées t ses structures ; leur déformations et endommagements.

Dans le deuxième chapitre ont caractérisé nos matériaux locaux utilisés dans cette étude, sable de dune de ZAAFRNE , la poudre de caoutchouc des pneus usées et la chaux de SAIDA.

Le troisième chapitre a été réservé à l'indentification et l'étude de la portance du sol afin de déterminer la teneur en chaux optimum pour obtenir des meilleures propriétés mécaniques ; et on a terminé avec une conclusion sur les différentes étapes de cette recherche.

**Chapitre I :**

**Étude bibliographique**

## I.1 Principaux modes de fonctionnement et de dégradations des chaussées :

Les modes de fonctionnement et de dégradations décrits ci-après sont ceux de chaussées construites suivant les règles de l'art (sans défauts notoires à la construction). L'expression sol support utilisée ci-après désigne la ou les couches sur lesquelles reposent les assises de chaussée. Il peut s'agir du sol naturel ou de la plate forme[02].

### I.1.1 Les chaussées souples :

Chaussées dont l'assise est constituée de matériaux non traités, recouverte par une épaisseur bitumineuse relativement faible (inférieure ou égale à 12 cm).

#### I.1.1.1 Modes de fonctionnement :

L'assise en matériaux non traités présente une faible rigidité qui est en relation avec l'épaisseur de la couche granulaire et la rigidité du sol ; cela a pour effet de rendre ces chaussées particulièrement sensibles aux variations d'état hydrique des matériaux non traités et des sols supports.

La couverture bitumineuse relativement mince ( $\leq 12$  cm) assure peu la diffusion des contraintes verticales dues au trafic et subit à sa base des efforts répétés de traction par flexion.

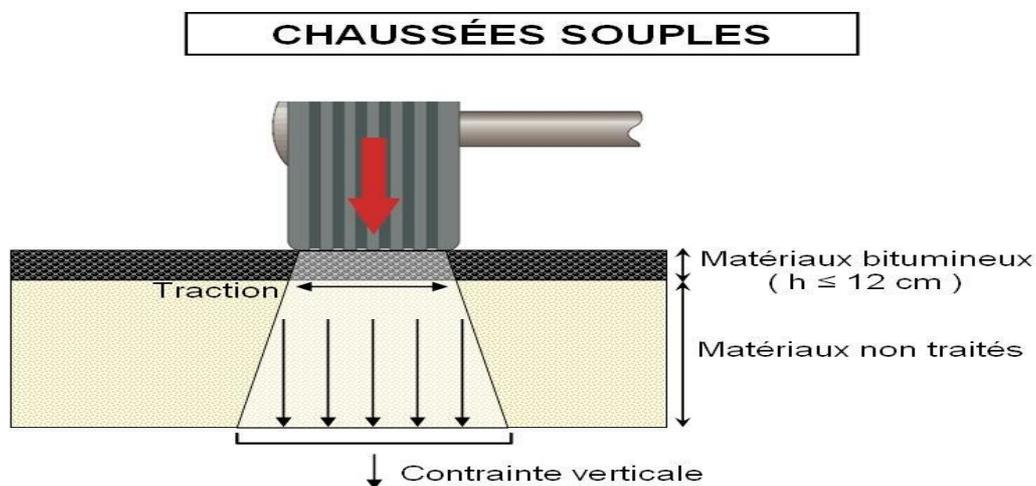


Figure I.1: chaussées souples.

#### I.1.1.2 Mode d'endommagement :

Les efforts verticaux transmis aux matériaux non traités et au sol support sont relativement élevés ce qui a pour effet d'entraîner l'apparition de déformations permanentes en surface (orniérage à grand rayon, flaches et affaissements) ; ces déformations croissent avec le cumul du trafic. Les efforts répétés de traction - flexion à la base de la couverture bitumineuse entraînent une fatigue de celle-ci, qui se traduit en surface par l'apparition de

fissuration longitudinale évoluant rapidement vers un faïençage à mailles fines.

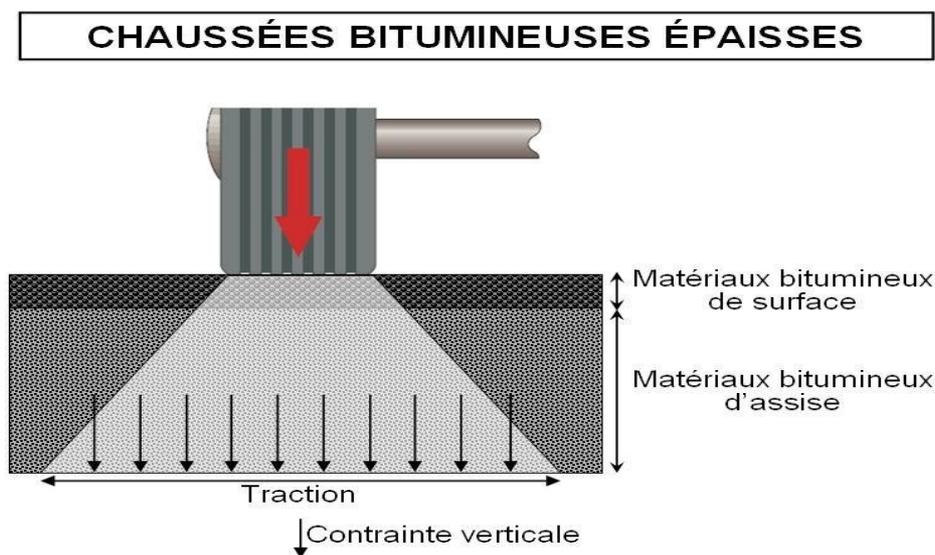
La possibilité pour les eaux superficielles de s'infiltrer dans l'assise provoque une accélération des dégradations[03] :

- épaufrures aux lèvres des fissures avec départ de matériaux, augmentation de l'amplitude des déformations, puis apparition de nid-de-poule.

## I.1.2 Les chaussées bitumineuses épaisses:

Chaussées dont l'assise est constituée en matériaux bitumineux, et dont l'épaisseur totale de matériaux bitumineux est supérieure à 12 cm.

### I.1.2.1 Mode de fonctionnement :



**Figure I.2:** chaussées Bitumineuses épaisses.

La rigidité des couches en matériaux bitumineux permet de diffuser, en les atténuant fortement, les contraintes verticales transmises au support. Les efforts induits par les charges roulantes sont repris en traction-flexion dans les couches bitumineuses.

Tant que les interfaces entre les différentes couches restent collées, les efforts de traction maximaux se produisent à la base de la couche la plus profonde. Si les couches sont décollées, chacune d'elles se trouve sollicitée en traction et peut se rompre par fatigue. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées.

### I.1 .2.2 Mode d'endommagement:

Dans le cas d'une chaussée correctement dimensionnée vis-à-vis du trafic et de la plate-forme support, les premières dégradations affectent généralement les couches de

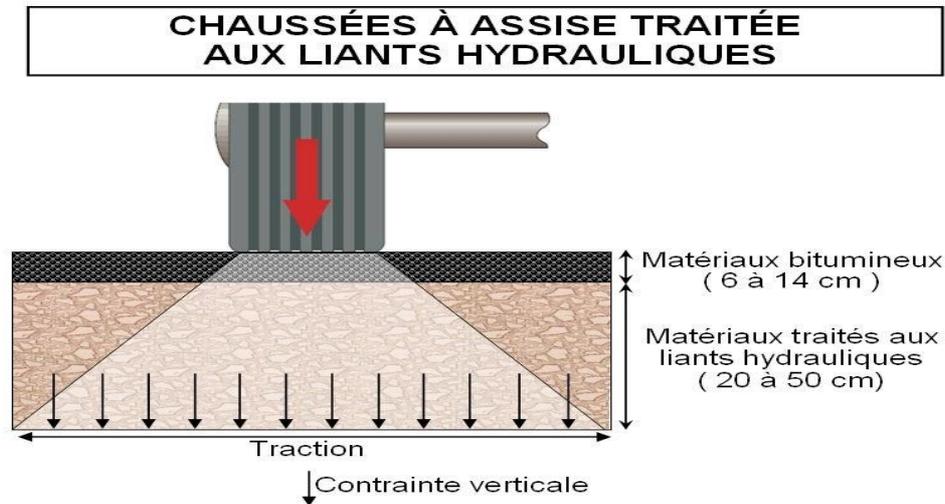
surface[04] :

- orniérage par fluage de la couche de surface, favorisé par des températures élevées, un trafic lourd lent ou des choix inadaptés de matériaux et de formulation ;
- arrachement de gravillons sous l'effet des efforts tangentiels engendrés par le trafic ;
- apparition d'une fissuration anarchique traduisant un durcissement par vieillissement du bitume de la couche de roulement (oxydation, gradients thermiques, lessivage des eaux superficielles) ;
- les efforts verticaux transmis au support sont généralement suffisamment faibles pour ne pas entraîner de sollicitations excessives du sol à l'origine de déformations permanentes avant l'endommagement par fatigue des couches bitumineuses liées (sauf cas exceptionnels tels qu'une circulation intense après un hiver très rigoureux ou un défaut d'exécution par exemple) ;
- à plus long terme, les efforts répétés de traction-flexion à la base de l'assise bitumineuse entraînent une dégradation par fatigue de celle-ci, se traduisant par l'apparition d'une fissuration remontant peu à peu du fond de la structure jusqu'à affecter la couche de roulement. La fissuration longitudinale observée dès lors en surface évolue vers du faïençage dont la dimension des mailles se réduit peu à peu, cette transformatif s'amorçant dans les zones plus faibles (qualité de portance du support, caractéristiques du matériau lié, zone de décollement entre couches) ;
- de la fissuration longitudinale dans les bandes de roulement peuvent aussi apparaître en progressant du haut vers le bas des couches bitumineuses.

### **I.1.3 Les chaussées à assise traitée aux Liants hydrauliques :**

Chaussées dont l'assise est constituée de matériaux traités avec liant hydraulique.

### I.1.3.1 Mode de fonctionnement:



**Figure I.3:** chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.

La grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques permet d'atténuer fortement les contraintes verticales transmises au support de chaussée.

L'assise traitée subit des contraintes de traction-flexion qui s'avèrent déterminantes pour le dimensionnement de ce type de chaussée.

Tant que l'interface entre la couche de base et la couche de fondation est collée, la contrainte maximale de traction est observée à la base de la couche de fondation. Si cette interface est décollée ou glissante, les couches travaillent toutes deux en traction à leur base. La qualité des interfaces a donc une grande incidence sur le comportement de ces chaussées.

Les assises traitées aux liants hydrauliques sont sujettes aux retraits de prise et thermique qui provoquent une fissuration transversale remontant rapidement au travers de la couche de roulement (de l'ordre du centimètre par an), selon un espacement assez régulier (entre 5 et 15 m).

Suivant les variations thermiques, l'ouverture de la fissuration évolue de quelques dixièmes de mm à quelques mm entraînant des conditions d'engrènement variables[05].

### I.1.3.2 Mode d'endommagement:

Au droit des fissures transversales de retrait :

- souvent franche lors de son apparition, la fissuration transversale tend à se dédoubler et à se ramifier sous l'effet du trafic. L'étanchéité de surface n'étant plus assurée, la

pénétration des eaux superficielles lors de précipitations entraîne une dégradation de la structure. Sous l'effet du trafic lourd, l'eau présente dans la fissure transversale fait l'objet d'un pompage (surpression – dépression) ayant pour conséquences :

- une diminution de la qualité du collage des interfaces et une désagrégation de la partie supérieure de l'assise et des parois de la fissure ;
- une augmentation de l'allongement à la base de la couverture bitumineuse ;
- un accroissement des contraintes de traction à la base des couches traitées et indirectement de la contrainte verticale sur le support de chaussée.

➤ en l'absence d'entretien (scellement des fissures de retrait), la dégradation de la fissuration transversale peut se traduire par l'apparition de remontées de boues en surface en période humide, la formation de flaches associées à du faïençage et des départs de matériaux (nids de poule).

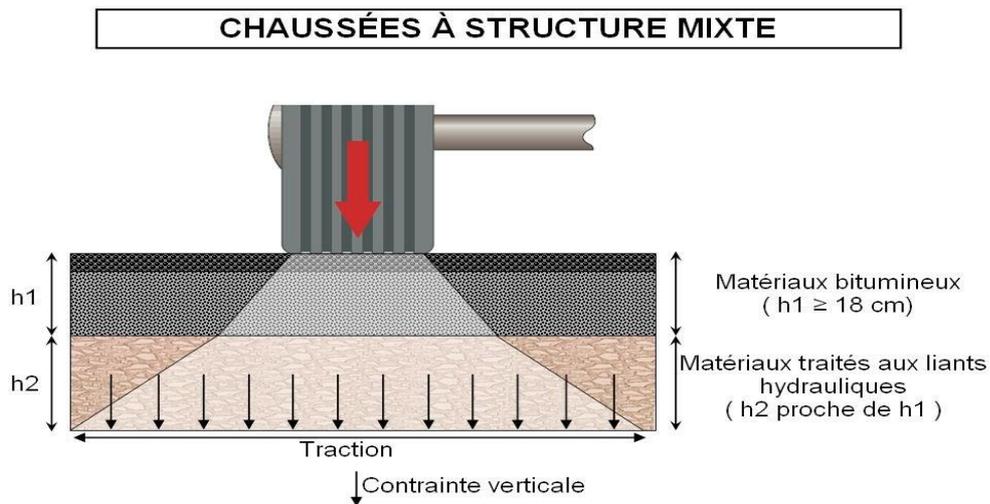
Sur l'ensemble de la chaussée:

- par suite de coefficients de dilatation thermique différents entre les matériaux bitumineux et hydrauliques et des contraintes tangentielles induites par l'action du trafic, l'interface entre matériaux bitumineux et matériaux hydrauliques peut être amenée à se décoller. Les quelques centimètres supérieurs de l'assise traitée étant souvent de plus faible résistance, un glissement partiel peut rapidement apparaître, ce qui a alors pour conséquence une dégradation rapide de la couche bitumineuse, par fatigue structurelle ;
- les efforts répétés de traction à la base de l'assise hydraulique entraînent sa dégradation par fatigue, traduite par une fissuration longitudinale qui se développe dans les bandes de roulement, et conduit à terme à la ruine de la structure en se maillant avec les fissures deretrait.

### I.1.4 Les chaussées à structure mixte :

Chaussées dont l'assise est constituée de deux couches de matériaux différents : fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques et base en matériaux bitumineux ; le rapport entre les épaisseurs bitumineuses totales et la couche de fondation doit être voisin de 1.

#### I.1.4.1 Mode de fonctionnement:



**Figure I.4:** chaussées à structure mixte.

Les matériaux hydrauliques de la couche de fondation diffusent et atténuent, du fait de leur rigidité élevée, les efforts transmis au sol support.

Grâce à son épaisseur, la couche de base en matériaux bitumineux permet de ralentir la remontée des fissures transversales de la couche de fondation et d'atténuer les gradients thermiques journaliers ; en sus, ses performances mécaniques lui permettent de réduire les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation.

Par suite de coefficients de dilatation thermique différents entre les matériaux bitumineux et hydrauliques et de l'action du trafic, les couches de base et de fondation peuvent finir par se décoller et se rompre dans certaines zones, ce qui conduit à considérer un mode de fonctionnement mécanique de la structure en deux temps :

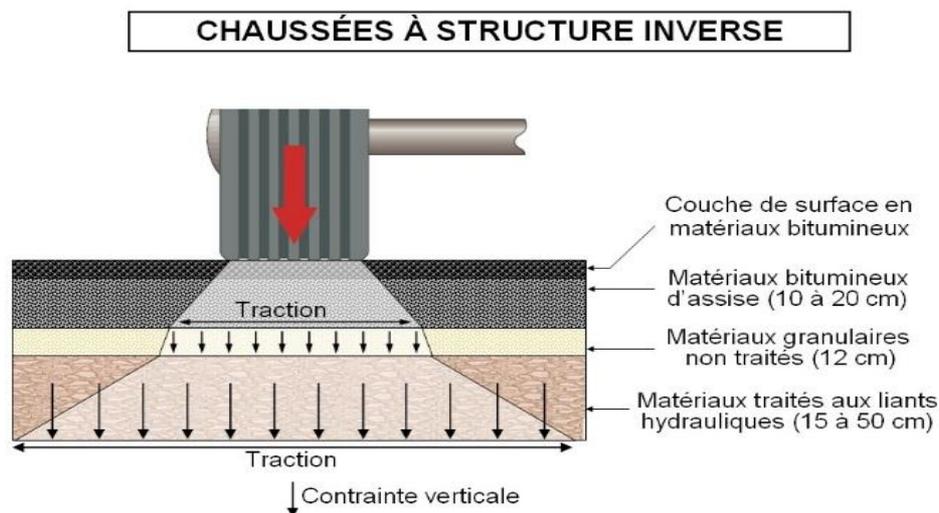
- 1<sup>er</sup> temps : l'interface entre les couches de fondation et de base est considérée collée : la base de la couche traitée aux liants hydrauliques est sollicitée en fatigue par traction ;
- 2<sup>nd</sup> temps : l'interface entre les couches de fondation et de base est localement décollée : dès lors, les deux couches sont fortement sollicitées en traction à leur base.

### I.1.4.2 Mode d'endommagement:

La fissuration transversale de retrait de la couche de fondation affecte au fil du temps les couches bitumineuses. Ces fissures par l'effet du trafic et des pénétrations d'eau évoluent en se dédoublant, entraînant une dégradation des matériaux bitumineux[06].

Les efforts répétés de traction à la base de l'assise hydraulique entraînent sa dégradation par fatigue traduite par l'apparition d'une fissuration longitudinale remontant peu à peu dans la structure. Lorsque la grave hydraulique est dégradée et/ou que l'interface entre les matériaux hydrauliques et bitumineux présente des signes de faiblesse, la couche de base est sollicitée à son tour par fatigue, ce qui se traduit alors par l'apparition d'une fissuration longitudinale.

### I.1.5 Les structures inverses:



**Figure I.5:** chaussées à structure inverse.

Chaussées dont l'assise est constituée de Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques, recouverte par une couche intermédiaire en Grave Non Traitée de faible épaisseur (~ 12 cm), et d'une couche de base en matériaux bitumineux

#### I.1.5.1 Mode de fonctionnement:

La grande rigidité des MTLH permet d'atténuer fortement les contraintes verticales transmises au support de chaussée.

La rigidité des couches bitumineuses permet de diffuser, en les atténuant, les contraintes verticales transmises à la couche de GNT. Les efforts induits par les charges roulantes sont repris en traction par flexion dans les couches bitumineuses.

Le rôle de la GNT est de ralentir la remontée des fissures de retrait thermique de la Grave Hydraulique.

Tant que les interfaces entre les couches bitumineuses restent collées, les efforts de traction maximaux se produisent à la base de la couche bitumineuse inférieure.

### **I.1.5.2 Mode d'endommagement:**

Deux modes d'endommagement concourent à la ruine de la chaussée :

➤ la fissuration longitudinale de fatigue des couches bitumineuses qui favorise les entrées d'eau dans la GNT, altère sa rigidité et la rend plus sensible aux déformations permanentes. Ce phénomène amplifie la fatigue des couches bitumineuses avec une évolution rapide vers du faïençage ;

la fissuration transversale de retrait thermique du MTLH qui apparaît en surface sous forme de fissures irrégulières, dédoublées donc difficile à étanche

## **I .2 Facteurs influant sur les dégradations :**

Les structures de chaussée sont conçues pour répondre aux objectifs définis par le Maître d'Ouvrage. Elles vont se dégrader sous l'action de différents facteurs qui peuvent être classés en trois catégories :

- Extérieurs à la chaussées;
- liés à la structure elle-même, à ses défauts de conception et de réalisation ;
- Lies aux matériaux constitutifs.

### **I .2.1 Facteurs extérieurs:**

Le trafic est le premier des facteurs extérieurs provoquant la ruine des chaussées. Il agit d'une part en sollicitant les couches traitées en traction/extension par flexion et en poinçonnant les couches non liées (sol support et GNT), provoquant respectivement fissures et déformations permanentes.

Il peut également susciter l'orniérage par fluage des couches de surface bitumineuses. Les facteurs extérieurs suivants pouvant intervenir à ce niveau sont : une température durablement élevée (période de canicule), une vitesse de sollicitation lente (rampe) ou une zone de fort cisaillement (virage, présence de feux ou stop).

Le trafic exerce également une augmentation de pression dans les fissures où l'eau s'est infiltrée. Par suite, cette eau sous pression attaque les éventuels points faibles des matériaux et de la structure, à savoir décolle les interfaces entre couches, entraîne les

fines produites par l'attrition (au niveau de la fissure ou des interfaces), déchausse les granulats.

Les conditions climatiques influent sur le comportement des structures, de façon directe ou induite :

- la pluviométrie influe sur la teneur en eau des sols support et sur leur portance, sur la rigidité des matériaux non traités et sur la dégradation des discontinuités de la structure (fissures, interfaces). L'influence de ce facteur est amplifiée par le profil de la route (remblai, déblai), la nature et la largeur des accotements, l'état du dispositif de drainage et l'état de surface de la chaussée (déjà dégradé ou intact) ;
- les températures estivales augmentent la sensibilité à l'orniérage ou au ressuage des couches de surface ;
- les températures hivernales augmentent la fragilité des couches bitumineuses et les sollicitations au voisinage des discontinuités dans les structures rigides et à assise traitée aux liants hydrauliques ;
- les variations journalières de température influent sur le fonctionnement des structures, notamment en modifiant la cambrure des dalles rigides et leur mode de fonctionnement, ainsi que sur la susceptibilité des matériaux bitumineux dans le cas où une trop grande amplitude journalière de température fragilise le matériau à basse température (pas d'accommodation possible) ;
- les variations saisonnières de température influent elles-aussi sur le fonctionnement de la structure, en agissant sur la rigidité des matériaux pour les structures à couches bitumineuses et sur les conditions d'engrènement pour les structures à couches traitées aux liants hydrauliques ;
- l'ensoleillement et l'exposition aux intempéries provoquent un vieillissement des matériaux, qui se traduit par un durcissement des liants bitumineux et une fragilisation des liaisons granulats/liants ;
- le gel peut, lorsqu'il est intense, provoquer le soulèvement de la structure (principalement sous nos latitudes si ses couches non traitées sont gorgées d'eau) et une dégradation de certains matériaux après de nombreux cycles de gel ;
- plus dommageable, le dégel induit une dégradation accélérée de la structure par chute de portance du sol support (cas des sols fins, des craies ...) ;
- des périodes de grande sécheresse entraînent la dessiccation des sols (surtout ceux présentant des indices de plasticité élevés) et l'apparition de fissures de retrait en surface des chaussées.

### **I .2.2 Facteurs liés à la structure :**

L'épaisseur de la structure est déterminée afin que la chaussée assure la circulation d'un trafic poids lourds sur un sol support donné pendant une certaine durée. Des travaux réalisés selon les règles de l'art intègrent des variations « usuelles » d'épaisseur qui sont prises en compte dans le calcul de l'épaisseur nominale. Toute sous- épaisseur, ponctuelle ou étendue, induit dès l'origine un excès de sollicitation dans la zone sous-dimensionnée, qui se traduit à plus ou moins long terme par l'apparition prématurée de fissures ou de faïençage. Ces sous- épaisseurs sont d'autant plus dommageables que le matériau est rigide[07].

Les cas les plus fréquents de sous-épaisseurs se rencontrent en traverse d'agglomération, sur giratoire, ou sur plate-forme mal nivelée.

Les conditions de collage entre couches sont également déterminantes sur la durabilité des structures. Celles-ci sont calculées en adoptant des hypothèses de collage représentatives des conditions habituellement rencontrées : par exemple, les couches bitumineuses sont supposées collées sur leur support. Tout défaut de collage entre deux couches supposées solidaires conduit à une sollicitation excessive de chacune des couches de la structure, et donc à leur ruine prématurée. Il n'est pas rare, sur chaussées souples et bitumineuses épaisses sous fort trafic, de rencontrer des fissures longitudinales voire du faïençage dans les bandes de roulement et de mettre en évidence le décollement de la seule couche de surface par carottage.

Un défaut d'accrochage peut résulter de l'absence ou d'un mauvais dosage de la couche d'accrochage, des conditions météorologiques lors de la mise en œuvre (averses) ou de la présence d'une pollution sur la couche sous-jacente avant mise en œuvre.

Les structures rigides et à assise traitée aux liants hydrauliques génèrent quelques jours à quelques mois après leur mise en œuvre des fissures par retrait hydraulique des matériaux traités. Ces fissures ou joints doivent être étanchés et entretenus périodiquement, afin que l'eau ne pénètre dans la structure et n'altère les conditions d'engrènement et d'interface, sous l'effet conjugué du trafic lourd.

Les travaux de type élargissements constituent souvent des points faibles de la structure. Des comportements différentiels entre ancienne chaussée et élargissement peuvent être observés, résultant :

- des matériaux utilisés pour ces élargissements qui ne sont pas nécessairement de même nature que ceux du corps de chaussée ;

- du sol support remanié lors des terrassements des élargissements ;
- des difficultés de mise en œuvre en faible largeur.
- Le joint entre élargissement et chaussée ancienne, réalisé à froid, a tendance à s'ouvrir rapidement, puis à s'épaufrer, d'autant plus qu'il est placé en bande de roulement et que des dispositions constructives de type redans n'ont pas été adoptées lors des travaux. (cf. § Conception des structures des élargissements).
- Les tranchées réalisées dans les chaussées pour les interventions sur réseaux enterrés causent les mêmes types de désordres que les élargissements.

### **I .2.3 Facteurs liés aux matériaux:**

#### **I .2.3.1 Tous matériaux:**

La rigidité d'un matériau de chaussée dépend de son taux de compactage. Tous les matériaux requièrent un niveau de compactage minimal, garantissant une rigidité et un comportement en fatigue. Tout défaut de compactage affecte la rigidité du matériau, et par suite suscite une augmentation de la sollicitation induite au passage des charges lourdes. La durée de vie de la chaussée s'en voit réduite. Outre les facteurs extérieurs cités au § 2.1, un matériau non adapté au trafic (squelette non optimisé, teneur en liant ou en sable trop élevée, susceptibilité thermique du liant bitumineux trop forte), peut également être un facteur à l'origine de l'orniérage des chaussées.

#### **I .2.3.2 Matériaux non traités :**

Une teneur en eau trop élevée altère les performances mécaniques de ces matériaux, aussi bien en rigidité qu'en résistance à la déformation permanente.

Cette teneur en eau augmente lorsque les couches supérieures ne sont plus imperméables (forte fissuration par exemple), qu'une alimentation en eau peut se faire par un terre plein central et/ou que le dispositif de drainage ne fonctionne pas (problème d'altimétrie, de colmatage des exutoires ...).

La teneur en fines et la propreté (MB) sont également des facteurs déterminants, en ce sens qu'elles contribuent à la rétention d'eau libre et adsorbée et au mouvement d'eau libre (par capillarité), rendant de ce fait le matériau sensible au gel. Cette instabilité conduit généralement à une fissuration des couches supérieures et à l'orniérage.

### **I .2.3.3 Matériaux bitumieux:**

La teneur en liant, dont l'optimum a été déterminé lors de l'étude de formulation du mélange, est également un facteur déterminant[08].

➤ Un sous dosage conduit à :

- une réduction des performances en fatigue (donc à une moindre durabilité des matériaux) ;
- une moindre maniabilité du mélange (donc à une plus grande difficulté à atteindre la compacité requise) ;
- une plus grande sensibilité à l'eau (décohésionnement de la liaison liant/granulats) ;
- dans une moindre mesure, une perte de rigidité du mélange.

➤ Un surdosage en liant a peu de conséquence pour les couches d'assise, mais est plus pénalisant pour les couches de surface où il conduit à :

- une plus grande sensibilité à l'orniérage et au ressuage ;
- un état de surface plus fermé (donc une moindre macro texture) défavorable à l'adhérence sur chaussée humide.

Un manque de fines important conduit à une plus grande sensibilité du mélange à l'orniérage.

La surchauffe des mélanges bitumineux à la fabrication en centrale entraîne un vieillissement prématuré du liant et conduit généralement aux dés enrobage et à la fissuration des couches de surface.

Le sur-compactage des couches de surface induit un risque accru d'orniérage, et un manque de macro texture.

Le sous-compactage des matériaux bitumineux peut également conduire, en plus d'un affaiblissement des caractéristiques mécaniques (module et fatigue), à un risque d'orniérage par post-compactage.

L'emploi de bitumes durs, qui s'est développé ces dernières années pour améliorer la résistance à l'orniérage des couches de roulement et rigidifier les couches d'assises, conduit généralement à une plus grande sensibilité des matériaux aux basses températures, ce qui peut poser problème dans les zones à forts écarts thermiques. Cela se traduit alors par l'apparition en surface de la chaussée de fissures orientées de façon aléatoire, dans et hors bandes de roulement, initiées par le haut de la couche de roulement. Cette fissuration peut être aggravée dans les bandes de roulement sous l'effet du trafic lourd.

Cette fragilité du matériau bitumineux face aux températures les plus basses peut également se rencontrer pour des couches de surface élaborées à partir d'agrégats d'enrobés (bitume résultant après mélange plutôt dur), ou ayant fait l'objet de thermo-recyclage (thermo reprofilage ou thermo-régénération), pour peu que les études préalables n'aient pas suffisamment anticipé ce phénomène.

#### **I .2.3.4 Matériaux traités aux liants hydrauliques :**

Un sous-dosage en liant hydraulique (ou en eau) conduit à une moindre performance du mélange, aussi bien en rigidité qu'en résistance en traction. Cette réduction des performances mécaniques conduit à une réduction importante de la durée de vie.

Un surdosage en liant hydraulique rend le matériau plus rigide et plus résistant à la traction ; mais l'expérience montre que :

- le délai de maniabilité est réduit ;
- la prise hydraulique s'effectue plus rapidement, ce qui a pour conséquence d'augmenter la fissuration de retrait ;
- la rigidité croît plus vite que la résistance en traction, ce qui a pour effet de fragiliser le matériau, de le rendre moins durable et plus sensible aux surcharges.

Le surdosage en eau conduit à une diminution des performances mécaniques, tandis qu'un sous-dosage réduit le délai de maniabilité.

Les conditions de mise en œuvre sont déterminantes sur la durabilité de ces matériaux :

- la dessiccation de la partie supérieure de la couche doit être évitée par mise en œuvre de couche de cure ;
- le sur-compactage et/ou l'apport de couche en faible épaisseur peuvent provoquer le feuilletage de la partie supérieure de la couche ;
- les travaux en arrière saison et en hiver sont à proscrire (risque de gel) ;

Un délai minimal doit être respecté avant remise sous circulation.

### **I.3 Le traitement des sols en place à la chaux**

#### **I.3.1 Aperçu historique :**



**Figure I.6:** la Grande Muraille de Chine.

Le traitement des sols à la chaux est une pratique très ancienne, comme en témoignent les bétons de terre traditionnels (argile+sable+chaux) et de façon plus spectaculaire, la Grande Muraille de Chine dont le matériau de nombreuses sections est un mélange compacté d'argile et de chaux.

#### **I.3.2 Le traitement des sols en place à la chaux :**

Le traitement des sols par un liant hydraulique vise à rendre un sol, dont les caractéristiques ne seraient pas adéquates, apte à supporter une chaussée, une plateforme (parking, aire commerciale ou industrielle) ou tout simplement le passage d'engins de travaux. Ce traitement vise également à le rendre résistant aux aléas climatiques auxquels il peut être soumis. L'idée de base, éminemment économique, du traitement de sol est de considérer le sol lui-même comme un matériau. Cette technique, développée dans les années 50 pour la réalisation d'assises de chaussées dans des pays tropicaux, s'est acclimatée en France dans les années 60.



**Figure I.7:** traitement d'un sol en place à la chaux.

### **I.3.3 La portance d'un sol :**

La capacité d'un sol à supporter une charge est définie par sa portance. La portance d'un sol est fonction de la nature de ce sol, de sa teneur en eau et de son compactage. La portance d'un sol et sa teneur en eau optimum sont déterminés, le plus usuellement, par l'essai Proctor pour ce qui concerne la compacité et par l'essai CBR pour ce qui concerne la résistance au poinçonnement. Le traitement à la chaux d'un sol permet une augmentation rapide et importante de sa portance[09].

## **I.4 Les sols :**

### **I.4.1 définition :**

Les sols sont des données naturelles dont la variété est infinie. Malgré les classifications (nomenclature GTR : norme NF P 11 300) qui rassemblent les sols d'identités ou de comportements analogues, chaque sol, du fait de son hétérogénéité, reste au fond un cas particulier.

### **I.4.2 caractérisation :**

Les sols sont le résultat des altérations mécaniques, physiques et chimiques des roches. Ils sont également constitués de matières organiques déposés par la biosphère (végétation, vie animale). Ils présentent 3 phases, solide, liquide et gazeuse et un squelette ou mortier de sol dont la granulométrie est très étendue.

L'aptitude d'un sol au traitement est définie par des études préalables qui précisent les caractéristiques à prendre en compte : nature (granularité, argilo site, plasticité, chimie),

comportement mécanique (résistance à la fragmentation, résistance à l'usure, friabilité), teneur en eau.

### **I.4.3 Avantage du traitement des sols :**

#### **I.4.3.1 Avantages économiques :**

L'utilisation du sol en place est économique dans la mesure où tout en étant un facteur de rapidité du chantier, elle évite les coûts du déblaiement, de la mise en décharge, du transport.

#### **I.4.3.2 Avantages environnementaux :**

Le traitement du sol en place, en limitant le transport de matériaux réduit la pollution et la consommation d'énergie liée aux transports. Il évite aussi l'extraction de granulats qui sont des ressources naturelles non renouvelables.

### **I.5 La chaux :**

La chaux est l'un des liants les plus anciennement utilisés. Les Romains l'additionnaient de pouzzolane pour donner un mortier qui, dans des constructions remarquables, dure encore. Les travaux de Louis Vicat, à partir de 1820 permirent de comprendre l'importance de l'argile dans les chaux hydrauliques (qui font prise sous l'eau) et de les fabriquer artificiellement.

#### **I.5.1 Production des chaux vives :**

Le calcaire aussi pur que possible est extrait, trié, lavé et concassé puis calciné dans des fours dont la température est comprise entre 1050 et 1250°C. La chaux vive en poudre s'obtient par broyage de la chaux vive.

### **I.5.3 Etude préalable :**

Une étude d'analyse des sols avant traitement est toujours nécessaire afin que celui-ci soit aussi adapté que possible. Cette étude est confiée à des laboratoires spécialisés qui peuvent :

- caractériser la nature de l'argile par diffraction des rayons X
- évaluer la teneur en argile par sédimentométrie
- évaluer différents teneurs des sols par des analyses chimiques : teneur en carbone organique, teneur en nitrates, capacité d'échanges ioniques.

Le traitement du sol proprement dit est précédé de planches d'essais qui permettent d'approcher les formulations et les dosages adéquats. Les sols étant très hétérogènes, les chantiers de grandes surfaces doivent multiplier ces types d'essais

### **I.5.4 Action de la chaux sur les sols :**

Les sols fins à teneur élevées en argiles ou limons ne présentent aucune stabilité au regard des conditions météorologiques : ils gonflent en présence d'eau, se rétractent par sécheresse et foisonnent quand il gèle. Leur utilisation routière est donc très incertaine. Le traitement à la chaux est recommandé pour les sols dont la teneur en argile est supérieure à 40%. Le dosage en chaux varie en fonction des sols et des résultats recherchés généralement entre 1 et 3%. Le comportement de ces sols fins est modifié par l'ajout de chaux[10].

### **I.5.5 Teneur en eau :**

La teneur en eau du sol est abaissée du fait de la consommation d'eau liée à l'hydratation de la chaux vive,  $\{CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 12 \text{ kJ.mol}^{-1}\}$ , de l'évaporation provoquée par la chaleur d'hydratation de la chaux, par l'apport de matériau sec, enfin par l'aération du sol provoquée par le malaxage.

Pour mémoire, la teneur en eau d'un sol peut baisser de 1 à 2% pour un ajout de 1% de chaux.

### **I.5.6 Amélioration des propriétés géotechniques :**

L'agglomération par floculation des particules argileuses sous l'action de la chaux modifie très rapidement les paramètres géotechniques du sol considéré :

- Diminution de l'indice de plasticité

- Augmentation de l'indice portant immédiat
- Diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale.

En d'autres termes, le sol passe d'un état plastique à un état solide.

### **I.5.7 Modification à long terme d'un sol par l'ajout de chaux :**

La chaux, qui est une base forte, élève le pH du sol. Ce fort pH favorise l'attaque des constituants du sol (silice et alumine). Ces produits en solution réagissent avec le calcium du sol pour produire des aluminates et des silicates de calcium hydratés, ainsi que des silicoaluminates de calcium hydratés qui jouent le rôle de liant en cristallisant entre les grains du sol (réaction pouzzolanique). Cette réaction peut se prolonger sur des mois et même des années.

### **I.5.8 Eléments perturbateurs de la prise du liant hydraulique :**

Certains éléments sont défavorables à une prise normale du liant hydraulique et peuvent même l'empêcher. D'autres éléments provoqueront des gonflements dommageables : minéraux soufrés, micas, matière organique, fertilisants et engrais, teneur excessive en argile... Ces perturbations peuvent être anticipées par des études préalables menées dans les laboratoires compétents.

### **I.5.9 Autre types de traitements :**

Nous avons ici porté notre attention sur le traitement des sols à la chaux. Ce traitement peut être associé à un traitement au ciment et/ou aux cendres volantes. Le ciment peut lui-même se voir ajouter du laitier de haut fourneau ou des fillers. Il existe également aujourd'hui des liants hydrauliques routiers (LHR) fournis par les cimentiers.

Le choix et le dosage du liant est fonction de la connaissance de la nature du sol, de son état hydrique, de l'environnement météorologique prévu et de la portance visée.

Enfin, des recherches et des expérimentations sont en cours pour l'introduction de fibres végétales dans les sols avant traitement aux liants hydrauliques, de façon à réduire le risque de fissuration.

- ABRIAK et al (2000) ont effectué une étude sur trois formulations d'une grave routière de sable de dragage et Sable 0/4 dite de boulonnais et de ciment. Le but d'étude est de valoriser le sable de dragage qui se trouve en quantité considérable en ports et chenaux d'accès de lui valoriser en assises des chaussées[11].
  - 52 % de sable de dragage, 40 % de sable du Boulonnais 0/4 mm, 8% de CEM III/C 32.5 PMES.
  - 60 % de sable de dragage, 30 % de sable du Boulonnais 0/4 mm, 10 % de CEM III/C 32.5PMES,
  - 72 % de sable de dragage, 21 % de sable du Boulonnais 0/4 mm, 7 % de CEM III/C 32.5 PMES.

L'étude est consacré pour déterminer le performance mécanique de chaque formulation et en domaine routier et voir de qu'elle classe appartienne (utilisable ou non utilisable en assises des chaussées) selon l'abaque traction directe en fonction de module d'élasticité ; après faire injecter dans l'abaque ils ont conclus que les deux mélange derniers possèdent une performance mécanique (classe S<sub>2</sub>) en déduisant leur utilités en couche de surface des chaussées.

- S Kolias et al (2005) ont effectué une étude sur la stabilisation de trois différents types d'argile par des différents pourcentages de 5% ; 10% et 20% de cendre volante ils sont notés des remarques suivantes[27] :
  - Diminution de la densité sèche et la teneur en eau proportionnellement à l'augmentation de pourcentage de cendre volante
  - L'amélioration de la résistance à la compression avec l'augmentation de pourcentage relativement avec la durée de cure.
- Ghrieb et al (2013) ont étudié la stabilisation un sable dune fin avec une combinaison de ciment de m'sila et fillers de sable siliceux ils ont remarqué :
  - Diminution de la teneur en eau avec l'augmentation de pourcentage d'ajouts (ciment ou fillers)
  - Augmentation de la densité sèche de tous les mélanges par rapport au mélange témoin (sable de dune).
  - Une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours et l'augmentation de la résistance à la traction à 90 jours.

**Chapitre II :**  
**Caractérisation**  
**Des matériaux utilisés**

### II.1 Analyse chimique du sable de dune :

Le sable de dune se trouve en abondance sous formes des dunes à la place nommé ZAAFRANE à environ 57 km au nord ouest de Djelfa, utilisé en construction comme sable pour béton.

L'analyse chimique réalisée sur les échantillons prélevés a donné les résultats suivants :

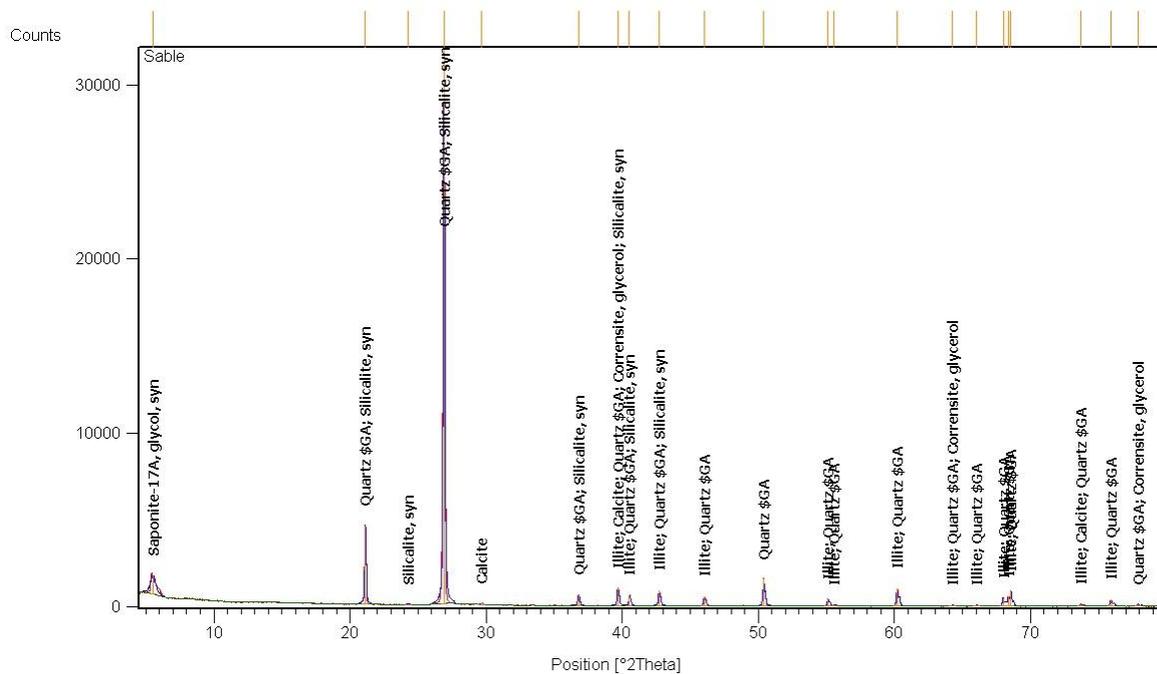
**Tableau II.1 :** Analyse chimique de sable de zaafrane

Matériau	SiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ,Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub> ,H <sub>2</sub> O	NaCl	CaCO <sub>3</sub>	P.F <sup>1</sup>	H <sub>2</sub> O	Bilan
<b>Sable de dune</b>	93.56%	1.49%	1%	Traces	0.29%	3.39%	1.73%	0.24	98.48%

- Il est que notre sable est un sable siliceux ; formé en grande quantité de SiO<sub>2</sub> (silice), avec la présence de quelques traces d'espèces calciques et magnésiques.

### II.2 Analyse minéralogique de sable de dune :

L'essai à pour but de déterminer les différentes proportions de minéraux constituants, où en a utilisé le diffractomètre aux rayons X au laboratoire de physique à l'université de Amar Tlédji Laghouat. Les résultats de ces analyses sont présentés dans la Figure II.1



**Figure II.1** Analyse minéralogique de sable de dune [18].

- Les analyses diffractométriques du sable montrent la présence et avec un fort pourcentage de quartz, et un faible pourcentage d'Illite et de calcite.

### II.3 Caractéristiques physiques :

Il est nécessaire tout d'abord de déterminer les propriétés physiques de ce matériau valorisé en domaine routier c'est-à-dire de connaître les paramètres suivants : Poids spécifique, masse volumique réelle, masse volumique apparente, propreté et valeur de bleu de méthylène.

Les essais pour la détermination de ces différents éléments ont permis d'obtenir les résultats suivants :

**Tableau II.2 :** Caractéristiques physiques du sable

La densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.56
La densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.45
Propreté	85 %
VBS por 100g	0.07
Module de finesse	0.88

### II.4 Caractéristiques mécaniques :

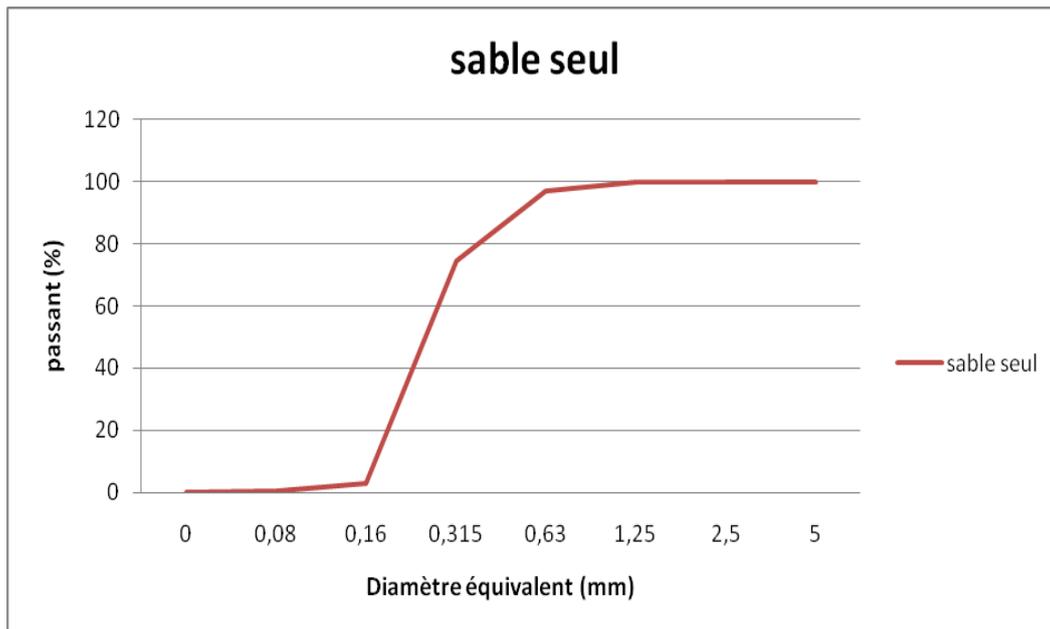
#### II.4.1 Etude du sable

##### II.4.1.2 Analyses granulométriques et sédimentométriques :

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

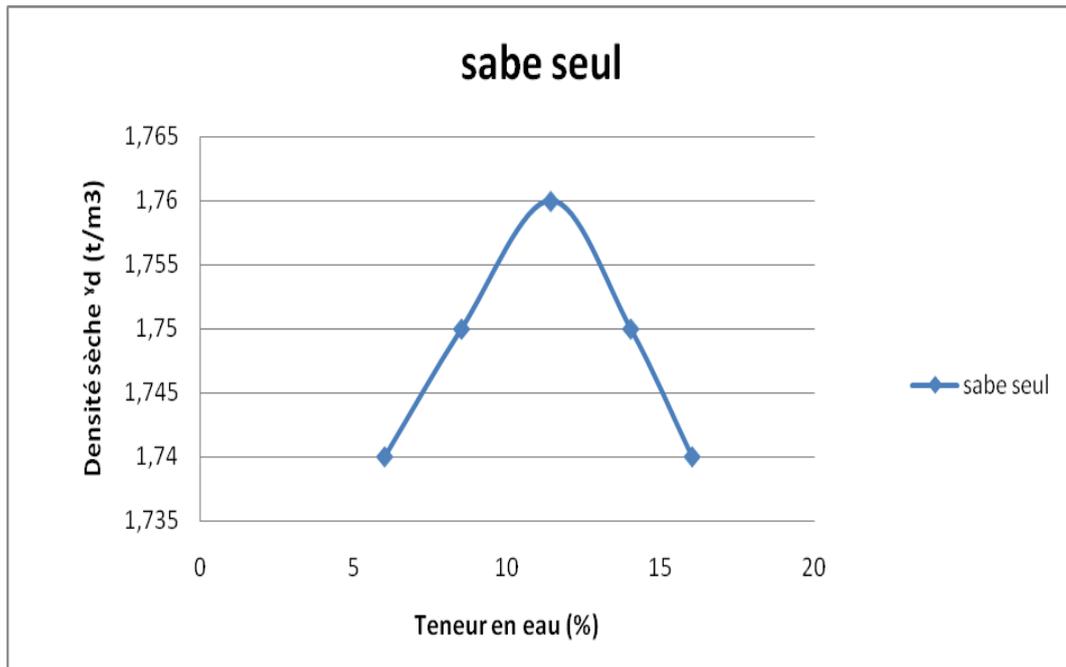
- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions  $\geq 80\mu\text{m}$  (0.08mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056.
- La sédimentométrie pour les particules de dimensions  $< 80\mu\text{m}$  qui complète la première, elle est effectuée selon la norme (NF P94-056). Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.
- La distribution des granulats de calcaire est traduite par la courbe appelée « courbe granulométrique »



**Figure II.2 :** courbe granulométrique de sable de dune zaafrane .

#### **II.4.1.3- Essai de Proctor modifié :**

Cet essai normalisé (NF P 94-093), permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor standard (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette investigation. Si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation de  $v_d$  en fonction de  $w\%$ , on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut qu'on l'appelle « optimum Proctor ». La figure II.3. Représente la courbe Proctor de sable utilisé.



**Figure II.3 :** Essai de Proctor modifié de sable de dune de zaafrane

A partir de cette courbe on peut avoir les paramètres fondamentaux de cet essai (paramètres de Proctor), qui sont la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Le résultat est regroupé dans le tableau III.6.

**Tableau II.3 :** Résultats de l'essai de Proctor modifié

	$\gamma_d$ (t/ m <sup>3</sup> )	w% <sub>opt</sub>
Sable de zaafrane	1.76	11.4

### III.4 Equivalent de sable

Cet essai par la norme (NF P 18-598), est utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon selon un processus normalisé et on laisse reposer le tout .au bout de 20 mn, on mesure les éléments suivants :

- La hauteur  $h_1$  : sable propre + éléments fins.
- La hauteur  $h_2$  : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

Selon que la hauteur  $h_2$  est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable, poids spécifique et la densité apparente de sable sont résumés dans le tableau II.4.

$$ES = \left( \frac{h_2}{h_1} \right) \times 100$$

**Tableau II.4 :** Caractéristiques physique de sable

Désignation	Poids spécifique (t/m <sup>3</sup> )	La densité apparente	Propreté
Valeur trouvé	2.63	1.35	85%

#### II 4.1.4 ESSAI C.B.R :

##### Définition :

Le mode de construction d'une chaussée ou d'une piste souple dépend de :

- L'intensité du trafic
- Caractéristiques du sous-jacent

Il doit y avoir une relation entre ces éléments :

1. Sol sous-jacent
2. Couche de fondation
3. Trafic prévu

Le but de l'essai C.B.R est précisément d'apprécier l'aptitude du sol à supporter des charges routières pour permettre de dimensionner la couche de fondation.

##### • Principe :

Le matériau est compacté dans conditions de l'essai Proctor modifié puis on l'immerge dans l'eau pendant une période, ensuite une charge de poinçonnement égale à la charge de service est appliquée sur l'échantillon, on note les pressions, qui correspondent à des enfoncements donnés.

Par définition, l'indice pour C.B.R est le rapport exprimé en pourcentage de pression obtenue sur un matériau standard pour le même enfoncement. On distingue deux types d'essais C.B.R :

- Essai C.B.R immédiat pour laquelle l'échantillon est compacté avec une teneur en eau donnée, puis immédiatement après compactage on procède au poinçonnement.
- Essai C.B.R normalisé, c'est le même que le précédent, la seule différence est que le poinçonnement se fait après quatre jours d'immersion. C'est cet essai qu'on utilise dans notre étude.

- **Préparation du matériau :**

Le compactage devra être fait dans les conditions de l'essai Proctor modifié, il faut que le matériau passe à travers le tamis  $\emptyset$  **20mm**.

- Faire l'essai Proctor modifié pour connaître la teneur en eau optimum
- Humidifier le matériau à cette teneur en eau  $W_{opt}$ .
- On mélange bien le matériau pour avoir une humidité uniforme.
- On pèse le moule plus la plaque de base.
- Compactage : on compacte le sol avec la teneur en eau  $W_{opt}$  suivant l'essai Proctor modifié (5 couches et 55 coups pour chaque couche).
- Araser et déterminer la teneur en eau.
- Enlever la plaque de base, ôter le disque d'espacement et fixer de nouveau le moule sur la plaque de base.
- Poinçonnement
  - Il est recommandé d'utiliser une presse muni d'une tige de poinçonnement de  $\emptyset = 5cm$  ( $D = 4.96$  cm,  $S = 19.3$  cm<sup>3</sup>) et pourvue d'un contrôleur de cadence, ainsi que d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements : On place l'échantillon sur un plateau bien axé sur la tige de poinçonnement, les charges annulaires sont remises en place (leur trou central correspond à la tige de poinçonnement).
  - On mène la tige au contact du sol et quand l'aiguille commence à bouger, on arrête le mouvement et on met le comparateur à zéro, puis on actionne la presse à une vitesse constante d'enfoncement égale à 1.27 mm/min et on note les forces qui correspondent aux enfoncements suivants :

0.625 mm	Soit au bout de	30 secondes
1.25 mm	Soit au bout de	1 minute
2 mm	Soit au bout de	1.5 minutes
2.5 mm	Soit au bout de	2 minutes
5 mm	Soit au bout de	4 minutes
7.5 mm	Soit au bout de	6 minutes
10 mm	Soit au bout de	8 minutes

- Exploitation des résultats

- L'indice portant Californien

On compare la pression qui a provoqué un certain enfoncement dans l'échantillon avec celle qui a provoqué le même enfoncement d'un sol type, on note les pressions correspondantes aux enfoncements 2.5 mm et 5 mm : l'indice est égal au maximum des deux rapports suivants :

$$I_{2.5} = \frac{P_{2.5}}{0.7} \text{ et } I_{2.5} = \frac{P_5}{1.05}$$

$P_{2.5}$  : Pression correspond à un enfoncement de 2.5 mm.

$P_5$  : Pression correspond à un enfoncement de 5 mm.

0.7 Et 1.05 correspond à un enfoncement aux pressions d'enfoncement de matériau standard.

Remarque :

Les valeurs de  $P_{2.5}$  et  $P_5$  ne sont pas toujours celles qui ont été déterminées par l'essai, il y'a éventuellement correction des erreurs expérimentales.

- **Abaque C.B.R :**

Cet abaque sert à calculer l'épaisseur de la chaussée en fonction de la charge maximale (P) par roue en tonnes et l'indice portant (I) avec la formule de e :

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

#### II.4.2-Essai de Résistance à la compression des mortiers et bétons.

On réalise des essais de compression simple sur tous nos matériaux à chaque échéance (7,14, 28, 60 jours).

La norme ASTM C 109/C 109M décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai effectué sur éprouvettes 50x50x50 mm<sup>3</sup> et des éprouvettes de 70x70x70 mm<sup>3</sup> pour le béton.

Chaque éprouvette sera soumise à la compression. En utilisant un appareil d'écrasement caractérisé par une force maximale de 2000 KN.

- **Mode opératoire**

Une fois l'éprouvette retiré de son milieu de conservation, on l'essuyé avec un tissu sec et on la laisse pendant 2 heure à l'air libre de laboratoire, on la place dans la cellule d'écrasement de l'appareil en appliquant un taux de chargement à une vitesse de déplacement relative entre

la platine supérieure et inférieure correspondant à une vitesse de chargement sur le spécimen de (900 à 1800N/s).

En enregistrant la force maximale indiquée dans le moniteur de la machine, on calcule la résistance à la compression comme suit :

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A}$$

$\sigma_c$  : Résistance à la compression en [ MPa ],

$F_c$  : Force maximale de compression en [N],

$A$  : surface de l'éprouvette en [mm<sup>2</sup>].

## II.5 La chaux de SAIDA :

Les différents types de liants se distinguent par le mécanisme de leur durcissement qui est influencé par la composition des matières de départ. La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saida ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO<sub>2</sub>, et aluminates Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO, ce qui donne à notre liant son aspect aérien.

La fabrication de la chaux remonte à la maîtrise de la pierre. Elle était utilisée comme liant dans les constructions.

La chaux (CaO) est obtenue par cuisson de pierre calcaire à une température entre 750 et 950° C, cuisson pendant laquelle elle abandonnera son gaz carbonique. Cuire le calcaire pour le transformer en chaux s'appelle calcination. Elle est exprimée par l'équation chimique suivante :



Le produit obtenu est appelé chaux vive (oxyde de calcium CaO). Plongée dans l'eau, la chaux vive se transforme en chaux éteinte (hydroxyde de calcium Ca(OH)<sub>2</sub>), cette opération s'appelle hydratation. Elle est exprimée chimiquement par l'équation suivante :



### II.5.1 Caractéristiques physiques :

Pour caractériser notre chaux on doit se référer aux valeurs données par le tableau :

**Tableau II.5** : caractéristiques de la chaux de SAIDA

Matériaux	Masse volumique absolu (g / cm <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (g / cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> / g)
Chaux vive(CaO)	3.2 – 3.4	0.8 – 1	Très variable
Chaux éteinte	2.2 – 2.4	0.5 – 0.65	8000 – 12000
Chaux hydraulique	2.6 – 2.9	0.6 – 0.80	5000 – 8000

**II.5.2 Temps de prise :**

- Temps de début de prise 1j.
- Temps de la fin de prise 3j.

**Tableau II.6** : Résultats des caractéristiques physiques de la chaux.

Masse volumique absolu (g / cm <sup>3</sup> )	Masse volumique apparente (g / cm <sup>3</sup> )	Surface spécifique (cm <sup>2</sup> / g)	Temps début de prise (jour)	Temps fin de la prise (jour)
2.559	0.521	11053	1j	3j

**II.5.3 Analyse chimique et minéralogique de la chaux :**

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux hydratée de Saida a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.7

**Tableau II.7** Analyse chimique et minéralogique de la chaux.

Composition chimique	Pourcentage
Humidité	/
CaO	67.4%-73.25%
MgO	<0.4%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<2%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1%
SiO <sub>2</sub>	<2.2%
SO <sub>3</sub>	<1%
K <sub>2</sub> O+NaO	<0.4%
CO <sub>2</sub>	<5%

CaCO <sub>3</sub>	<10%
Ca(OH) <sub>2</sub>	<80%
Constance volumique	bonne
Insoluble	<0.35%

### II.6 La poudrette de caoutchouc:

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage. (Figure II.4)

La masse volumique apparente est :  $\rho = 0,53 \text{ g/cm}^3$

La masse volumique absolue est :  $\rho = 1,45 \text{ g/cm}^3$



Figure II.4: Aspect des poudrettes de caoutchouc

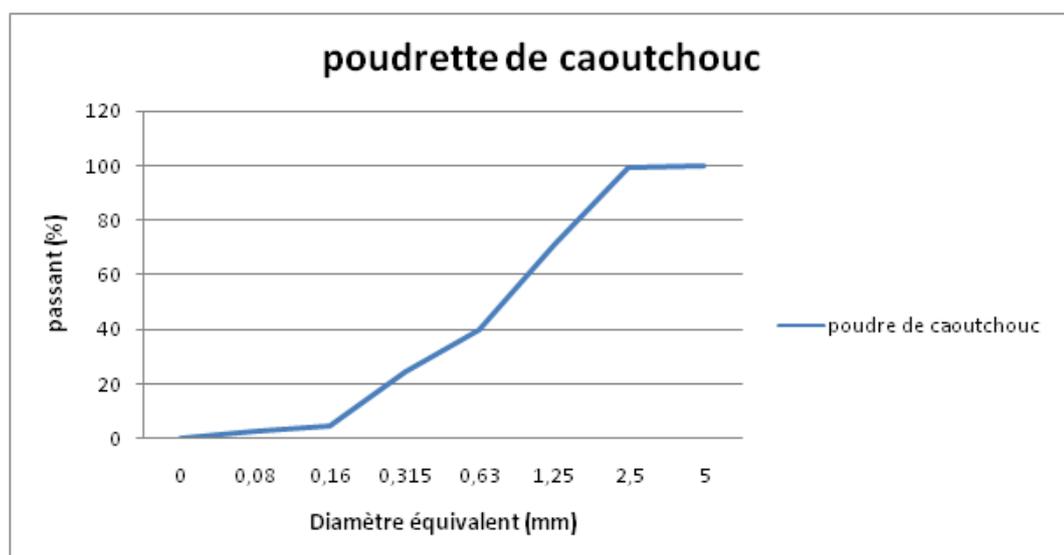


Figure II.5: courbe granulométrique de la poudrettes de caoutchouc

**Chapitre III :**  
**Etude de comportement mécanique**  
**des mélanges traités**

### III.1 INTRODUCTION :

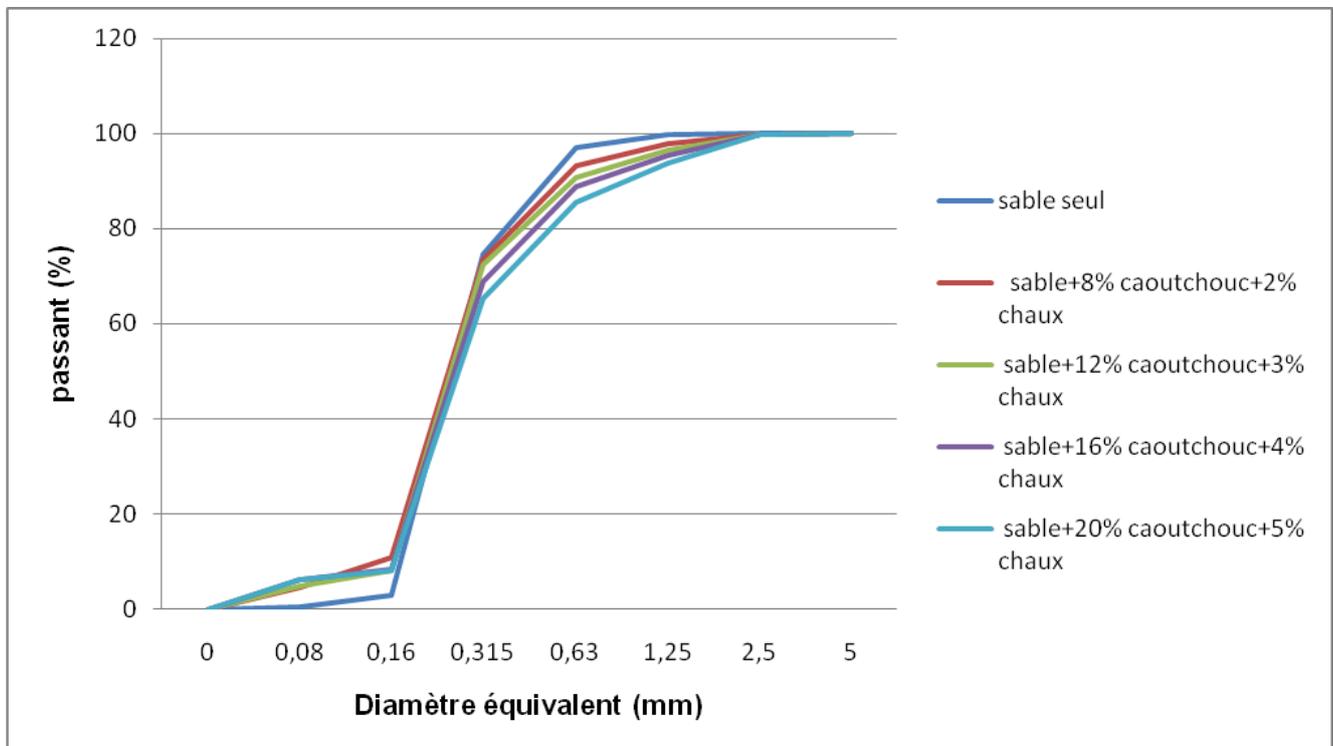
Dans ce chapitre, l'étude sera consacrée à l'effet de la stabilisation consistant à faire un apport de matériau pour corriger ses défauts du point de vue granulométrique que stabilité et portance par l'ajout de caoutchouc+ chaux , Les pourcentages de chaux ajoutés sont respectivement 8%Caoutchouc+2%Chaux,12% Caoutchouc 3%Chaux,16%Caoutchouc+4% Chaux,20% Caoutchouc+5%chaux.

Les essais menés sur les différentes formulations sable%+C% (avec C% représente les pourcentages de caoutchouc+chaux ajoutée) sont :

- Essais de l'analyse granulométriques.
- Essais de Proctor modifié.
- Essais **CBR** Immédiat et Immersion
- Essais de Cisaillement direct.
- Essais de la résistance à la compression.
- Essais de la résistance à la traction simple

### III.2 INFLUENCE DE L'AJOUT DE CAOUTCHOUC CHAUX SUR PROPRIETES DE SABLE :

#### III.2.1 Effet de l'ajout de caoutchouc et chaux sur la granulométrie :



**Figure III.1 :** Courbe granulométrique des différents mélanges (Sable +Poudrette de caoutchouc %+chaux(%)).

D'après la figure III.1 qui représente les distributions granulométriques des mélanges traités, on remarque un léger déplacement de la courbe vers la gauche ; proportionnellement à l'augmentation du pourcentage d'ajout de (chaux+caoutchouc). Ce déplacement indique une diminution du pourcentage d'éléments fins au profit d'une augmentation des plus gros éléments surtout sur la fraction 0.08mm-0.01mm.

### III.2.2 Effet de l'ajout de caoutchouc et chaux sur les paramètres de Proctor :

L'essai Proctor modifié est réalisé sur les sols obtenus pour différents mélanges (Sable – caoutchouc - chaux). Les résultats sont donnés par les courbes de compactage dans la figure III.2

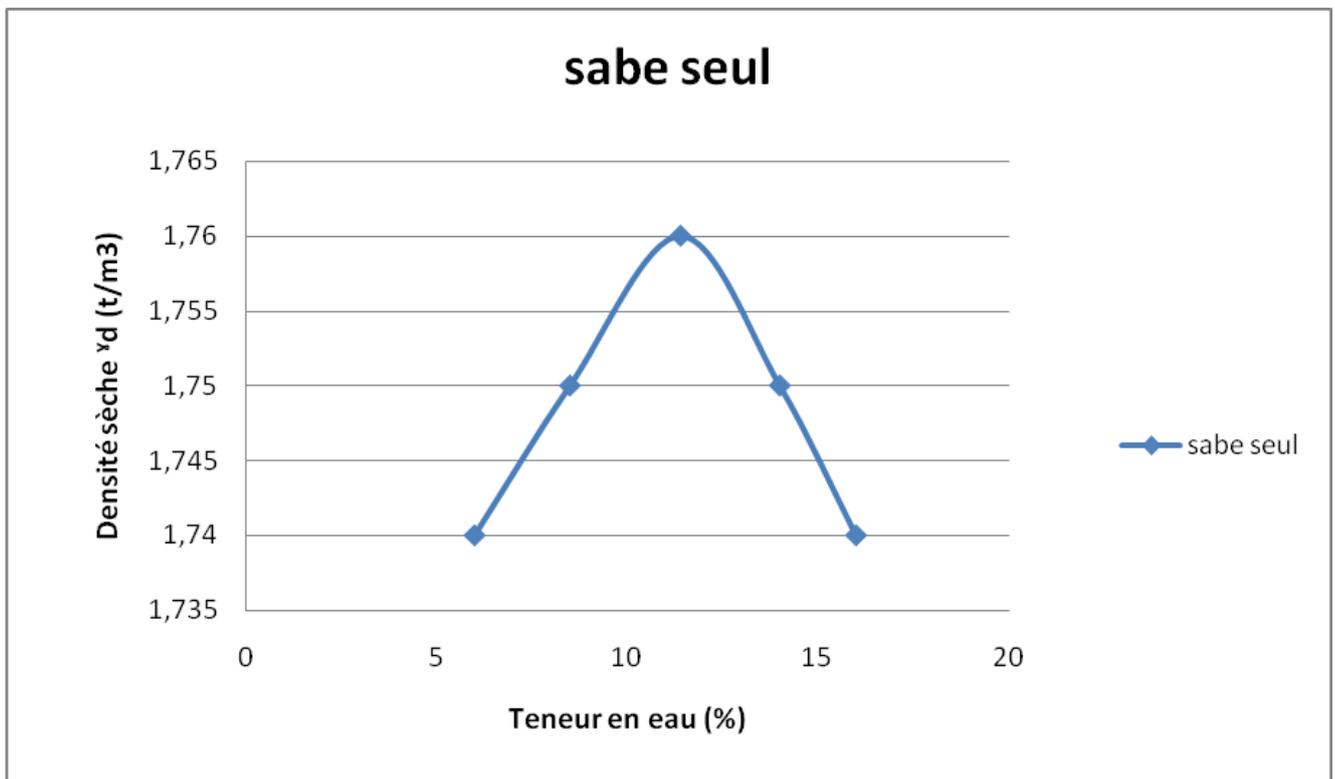
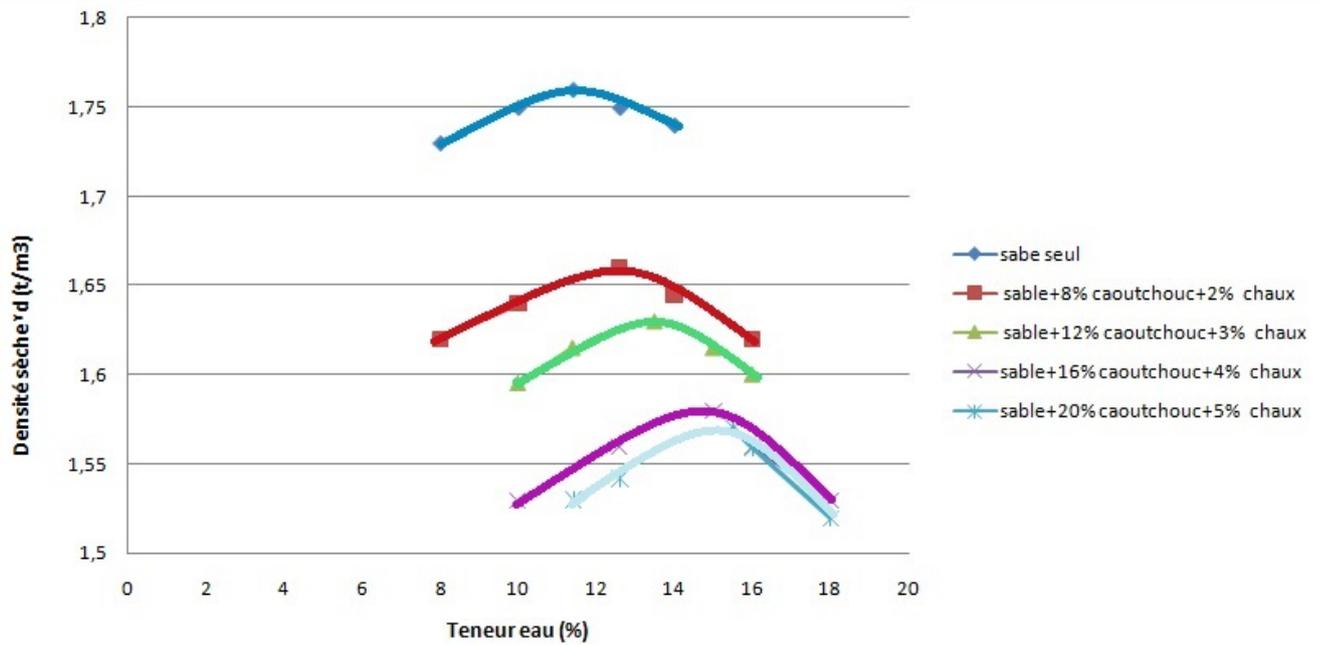


Figure III.2 : Essai de Proctor modifié pour sable seul

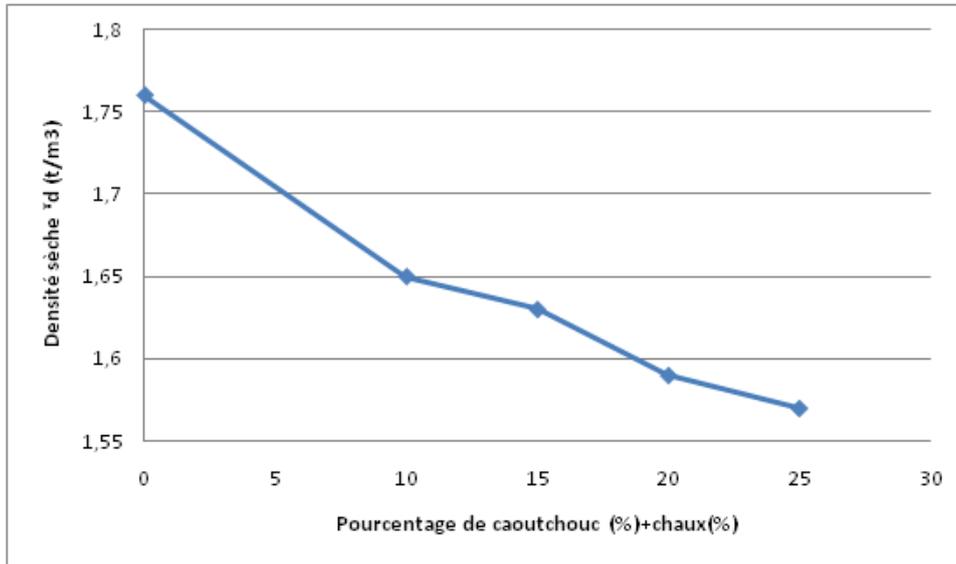


**Figure III.3 :** Essai de Proctor modifié pour les mélanges sable + caoutchouc(%) + chaux (%)

Le tableau III.1 résume les résultats de l'essai de Proctor modifié pour les différents mélanges sable +caoutchouc et chaux.

**Tableau III.1 :** Résultats de l'ajout de chaux et caoutchouc sur les paramètres de Proctor modifié.

	Sable seul	Sable + 8% caoutchouc + 2% chaux	Sable+ 12%caoutchouc + 3% chaux	Sable+ 16%caoutchouc +4% chaux	Sable + 20%caoutchouc + 5% chaux
W% <i>opt</i>	11.4	12.9	13.5	14.9	15.2
$\gamma_d$ (t /m <sup>3</sup> )	1.76	1.65	1.63	1.59	1.57



**Figure III.04 :** Variation de la densité sèche  $\gamma_d$  en fonction du pourcentage de chaux et poudrette de caoutchouc ajouté.

### III.2.3 Effet de l'ajout de caoutchouc et chaux sur le pourcentage des vides (Porosité) :

Sachant, que pour la couche de base, la porosité (pourcentage des vides) est donné par

$$n = \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}\right) \times 100 ; \text{ Avec } \gamma_s = 2.63 \text{ t/m}^3$$

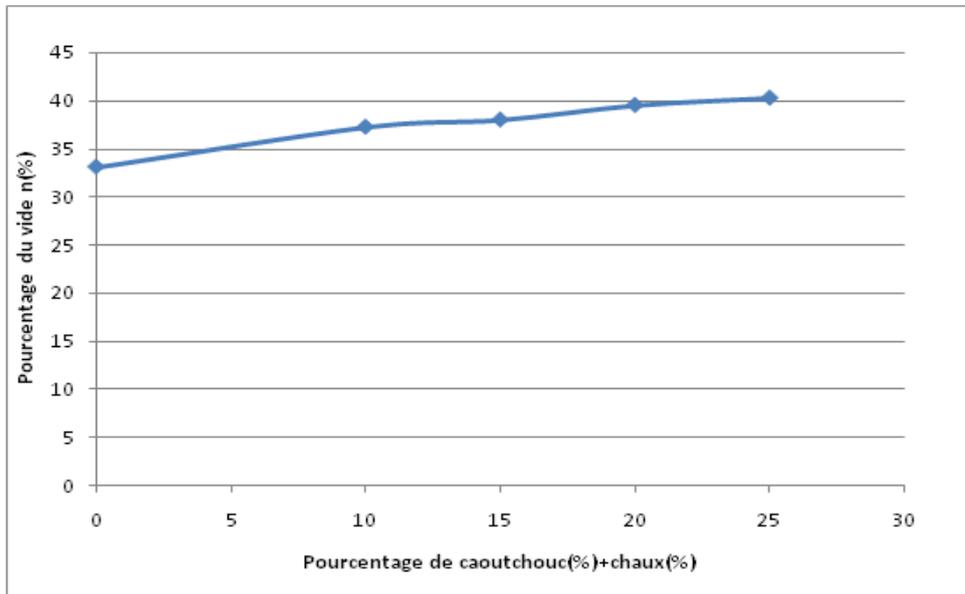
La figure III.10 montre l'évolution de pourcentage des vides en fonction de pourcentages de chaux ajouté.

Le tableau III.2 résume les résultats de pourcentage du vide pour les différents mélanges sable- chaux (%).

**Tableau III.2 :** Résultats de l'ajout de caoutchouc et chaux et caoutchouc sur le pourcentage des vides

	sable+ 0% chaux	sable+8% caoutchouc +2%chaux	sable+12% caoutchouc+ 3% chaux	sable +16% caoutchouc +4% chaux	sable +20% caoutchouc+ 5% chaux
Teneur en eau optimum Wopt%	11.4	12.9	13.5	14.9	15.2
Densité sèche $\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	1.76	1.65	1.63	1.59	1.57
Pourcentage du vide n (%)	33.08	37.26	38.02	39.54	40.30

A partir des résultats du tableau précédent, la figure III.4 représente graphiquement la variation de la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale en fonction du pourcentage de chaux et caoutchouc ajouté.



**Figure III.5 :** Variation de porosité  $n(\%)$  en fonction du pourcentage de caoutchouc et chaux ajouté.

- L'ajout de chaux+la poudrette de caoutchouc présente une influence sur la teneur en eau optimale qu'est traduite par unel'augmentation pour tous les mélanges sable (chaux+poudrette de caoutchouc) par rapport au sable seul allant de 11.4% jusqu'au 15.2%
- Le mélange sable 20% caoutchouc +5% chaux donne une densité sèche minimale avec une baisse de 1.57 t/ m3 de sable seul jusqu'au 1.76 t/ m3.
- On remarque une décroissance de la densité sèche (diminuer) jusqu'au dernier mélange sable+ (20% poudrette de caoutchouc + 5% chaux) qui de 1.57 t/m3
- Le pourcentage (20% caoutchouc+5% chaux) présente un pourcentage optimal de fine pour avoir un meilleur résultat de densité sèche et un maximal pourcentage de vide (porosité).

### III.3. Essai CBR immédiat et immersion :

Le but de l'essai C.B.R est précisément d'apprécier l'aptitude du sol à supporter des charges routières pour permettre de dimensionner la couche de fondation.

### III.3.1 Principe :

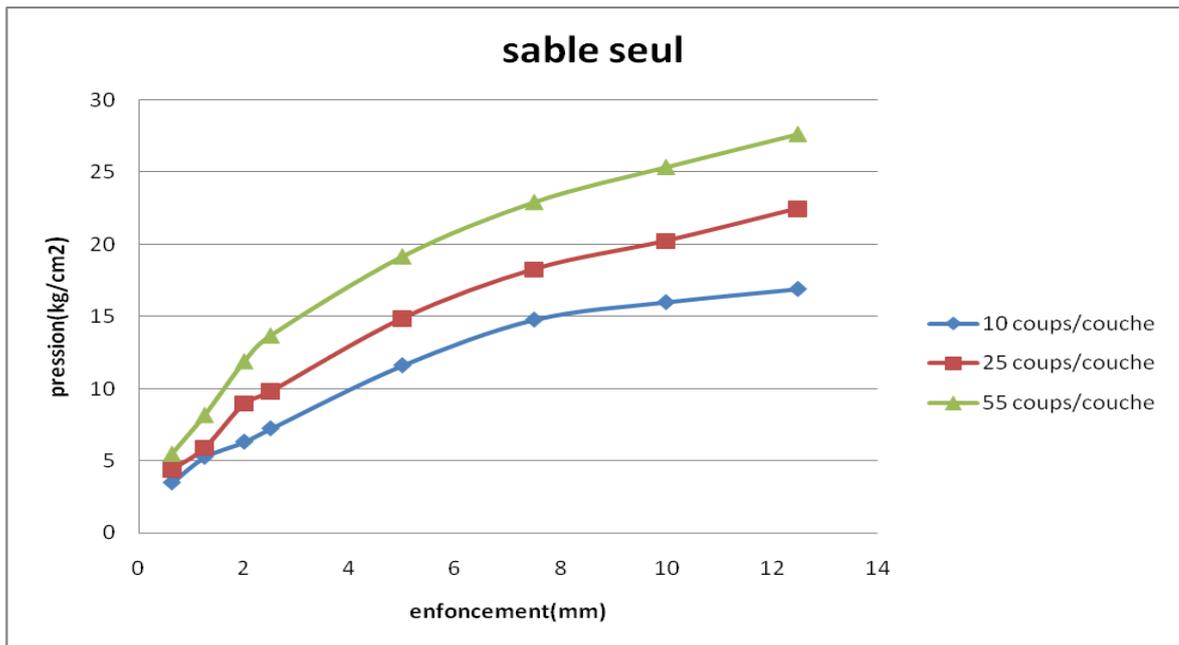
Par définition, l'indice pour C.B.R est le rapport exprimé en pourcentage de pression obtenue sur un matériau standard pour le même enfoncement. On distingue deux types d'essais C.B.R[22] :

- Essai C.B.R immédiat pour laquelle l'échantillon est compacté avec une teneur en eau donnée, puis immédiatement après compactage on procède au poinçonnement. C'est cet essai qu'on utilise dans notre étude.
- Essai C.B.R immersion, c'est le même que le précédent, la seule différence est que le poinçonnement se fait après quatre jours d'immersion.
- Le compactage devra être fait dans les conditions de l'essai Proctor modifié.
- Compactage : on compacte le sol avec la teneur en eau  $W_{opt}$  suivant l'essai Proctor modifié (5 couches 10 coups ; 25 coups et 55 coups pour chaque couche).
- La presse utilisée à une vitesse constante d'enfoncement égale à 1.27 mm/min muni d'une tige de poinçonnement de  $\varnothing = 5\text{cm}$  ( $D = 4.96\text{ cm}$ ,  $S = 19.3\text{ cm}^3$ ) et pourvue d'un contrôleur de cadence, ainsi que d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements (Coefficient de l'anneau =20.4).

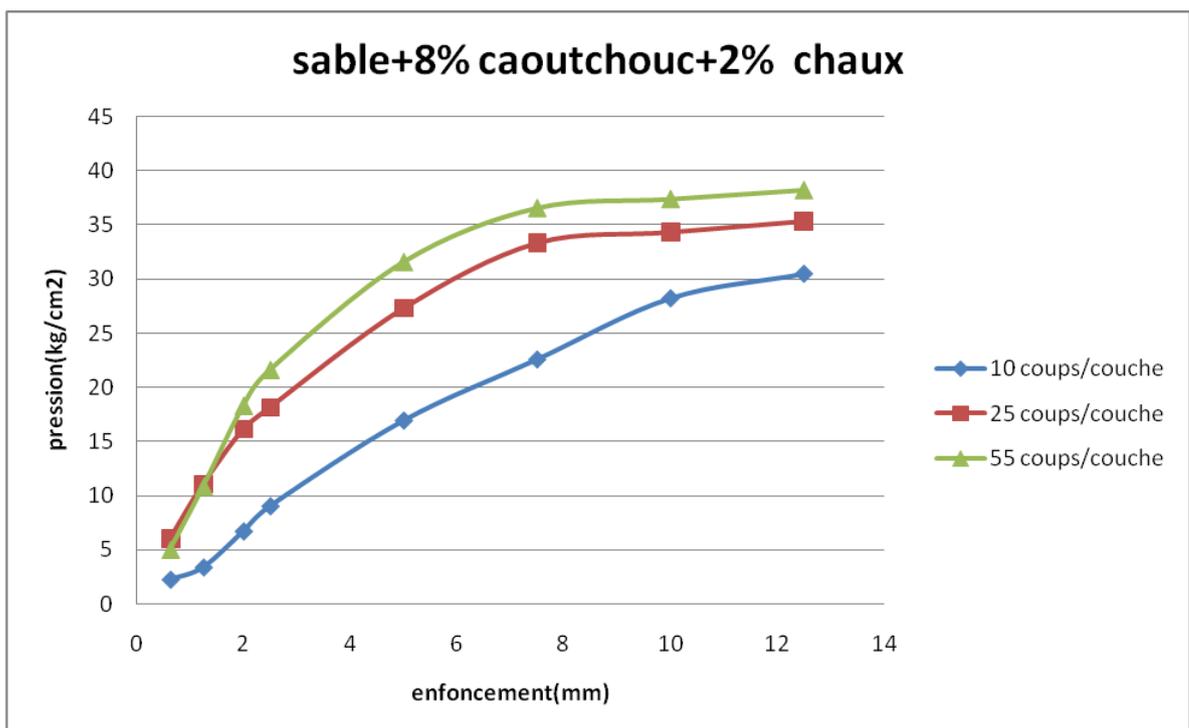
0.63 mm	1.25 mm	2 mm	2.5 mm	5 mm	7.5 mm	10 mm	12.5 mm
30 secondes	1 minute	1.4 minutes	2 minutes	4 minutes	6 minutes	8 minutes	10 minutes

### III.3.2 Résultats CBR immédiat :

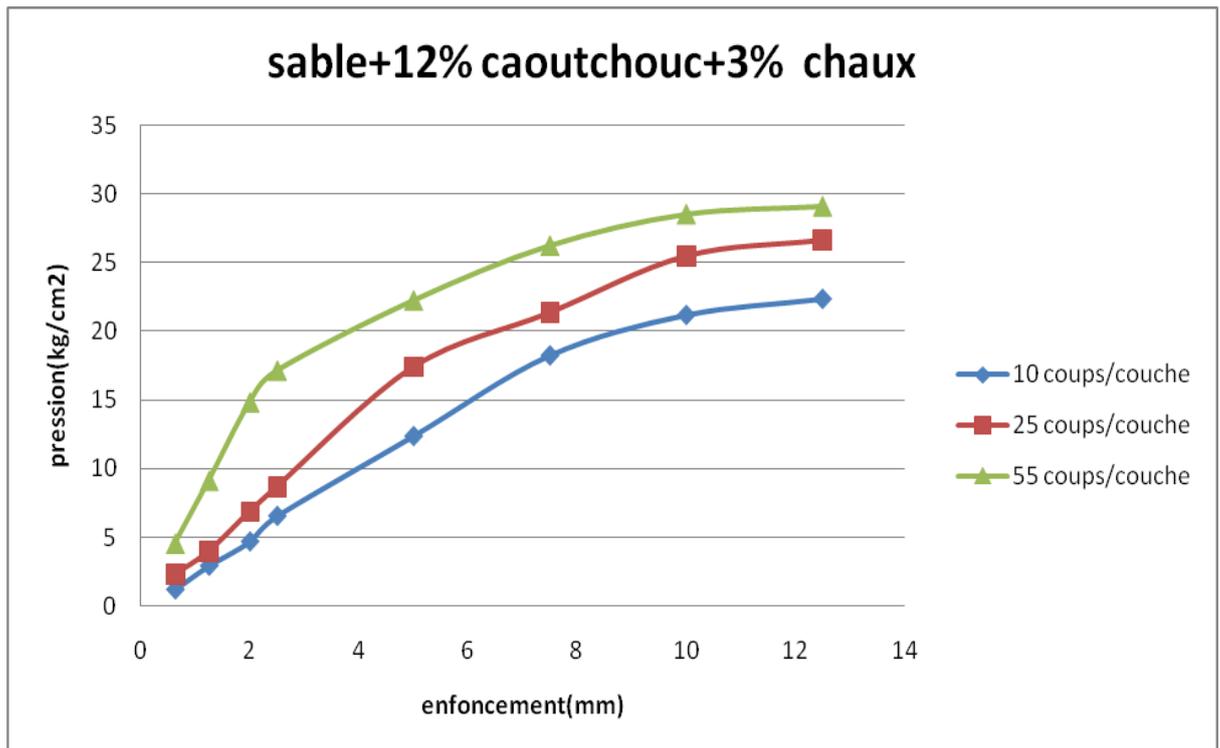
Les figures CBR immédiat (III.6) ; (III.7) ; (III.8) ; (III.9) ;(III.10) et le tableau (III.3) résumant la pression obtenue en fonction d'enfoncement pour les différents mélanges sable+chaux à 10 coups ; 25 coups et 55 coups par couche.



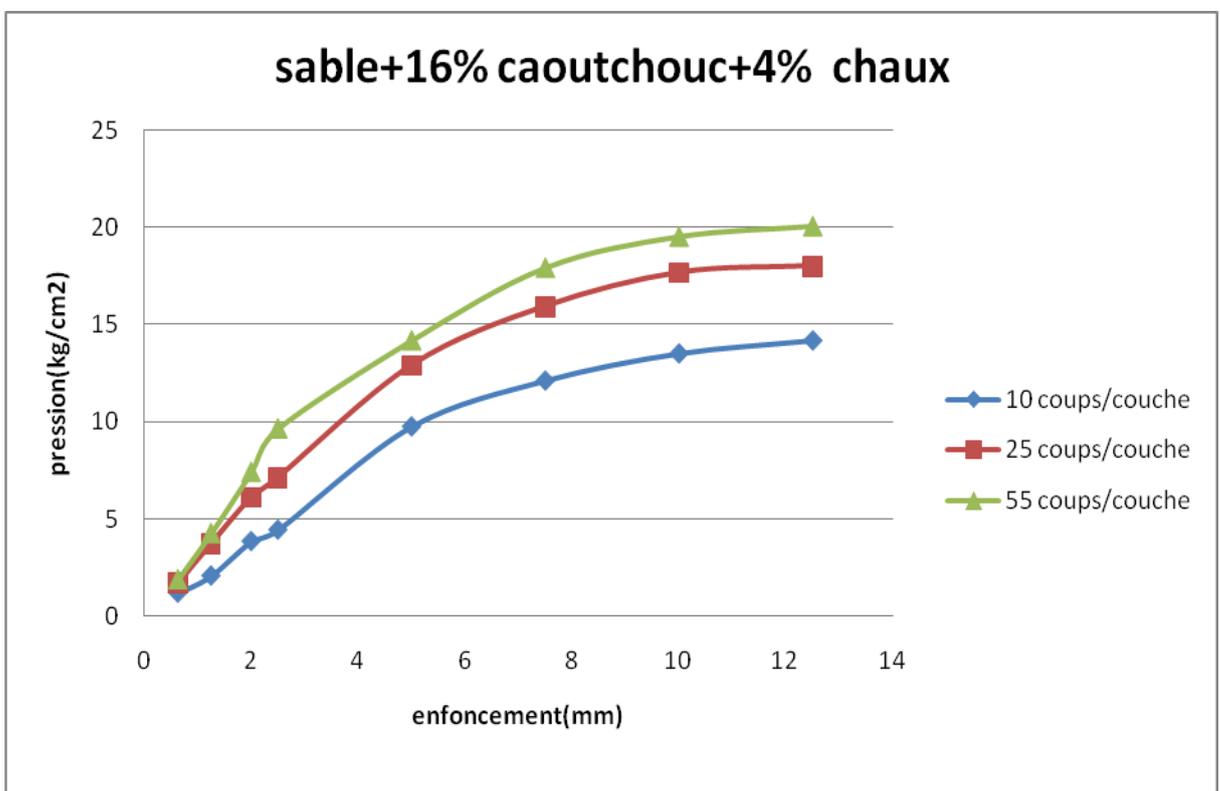
**Figure III.6:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable seul.



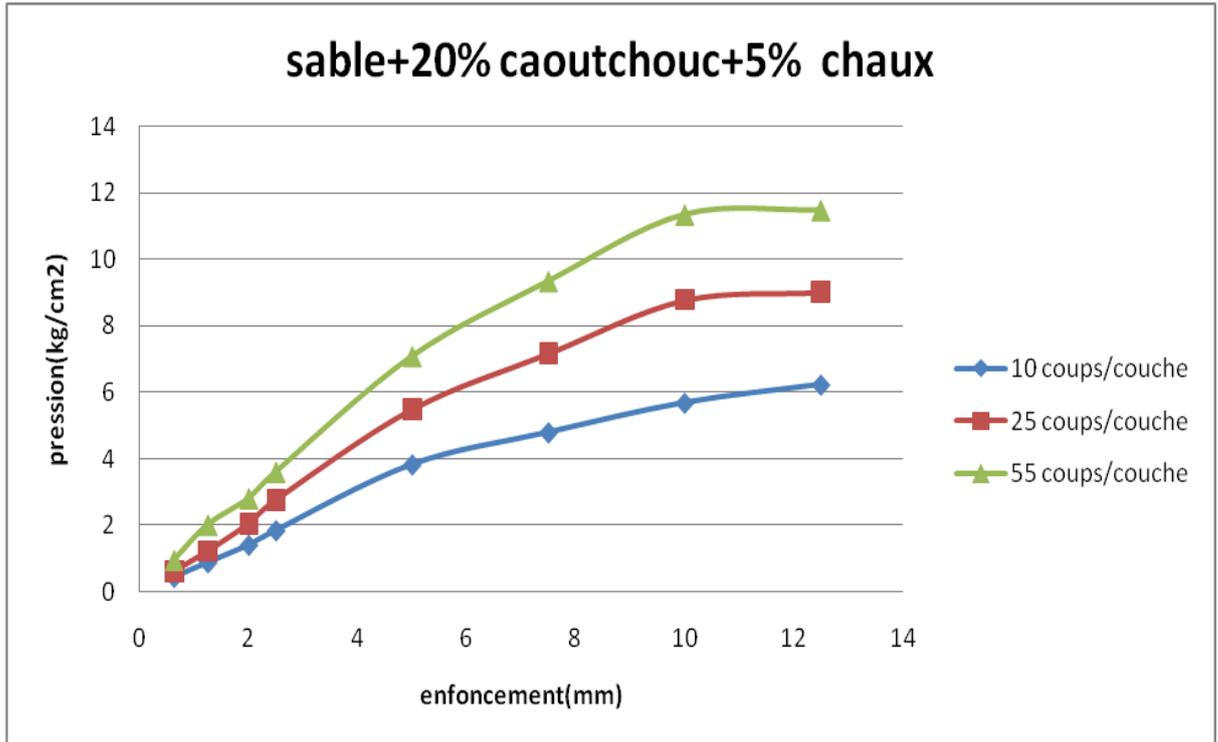
**Figure III.7:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour Sable +8%caoutchouc+ 2% chaux



**Figure III.8:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour Sable +12%caoutchouc +3% chaux



**Figure III.9:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour Sable +16%caoutchouc +4% chaux



**Figure III.10:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour Sable+20%caoutchouc +5% chaux.

### III. 3.3 Exploitation des résultats :

- **L'indice portant Californien :**

On compare la pression qui a provoqué un certain enfoncement dans l'échantillon avec celle qui a provoqué le même enfoncement d'un sol type, on note les pressions correspondantes aux enfoncements 2.5 mm et 5 mm : l'indice est égal au maximum des deux rapports suivants :

$$I_{2.5} = \frac{P_{2.5}}{0.7} \text{ et } I_5 = \frac{P_5}{1.05}$$

$P_{2.5}$  : Pression correspond à un enfoncement de 2.5 mm.

$P_5$  : Pression correspond à un enfoncement de 5 mm.

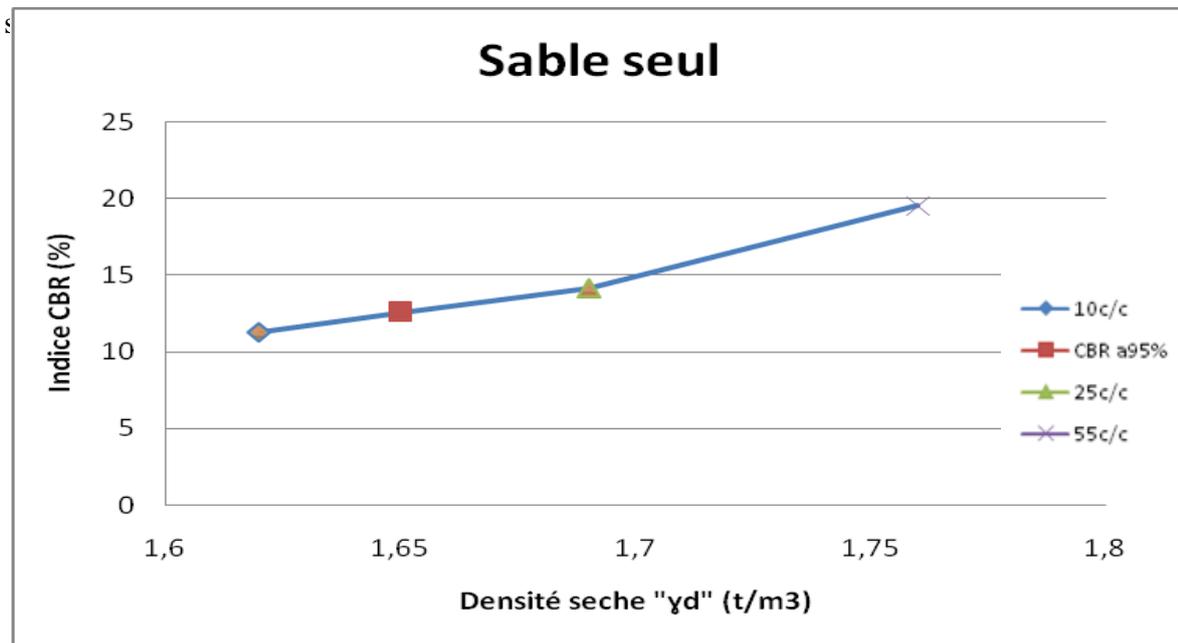
0.7 Et 1.05 correspond à un enfoncement aux pressions d'enfoncement de matériau standard.

Le tableau III.9 résume les résultats obtenu d'essai CBR indice CBR max pour les différents nombre de coups pour chaque mélange ainsi le **CBR** à 95 % de **L'OPM** [32].

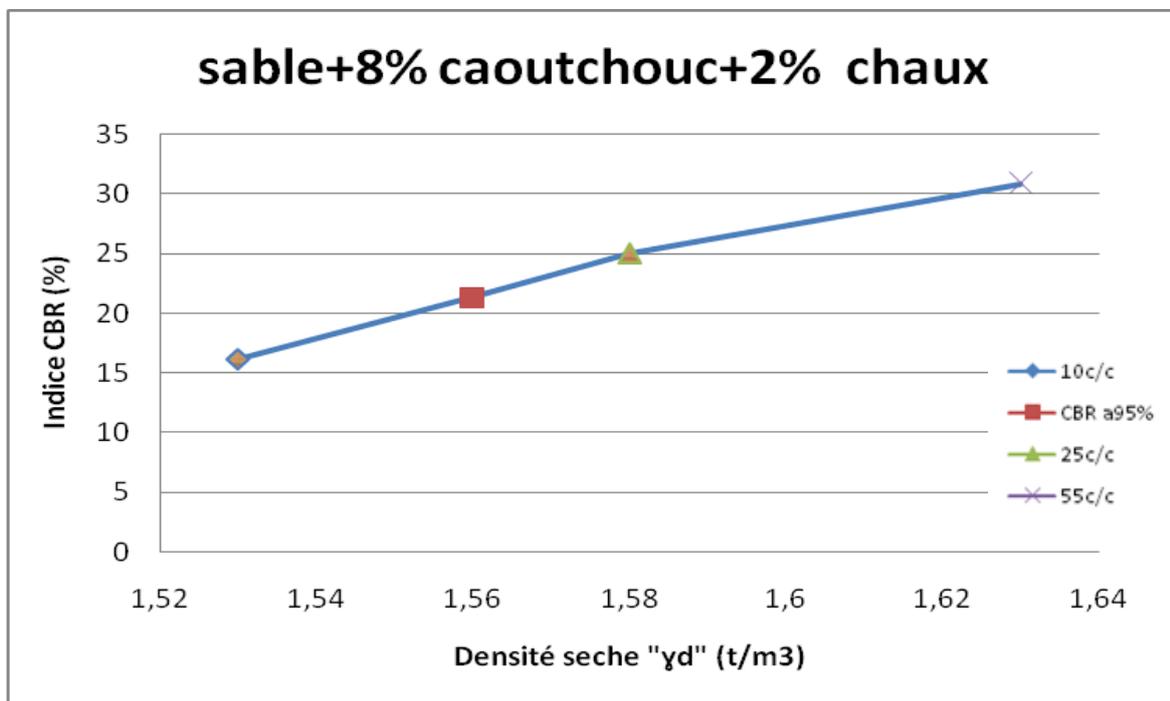
**Tableau III.3** : Résultats obtenu pour le CBR immédiat à 95% de l'OPM

Sable seul			
	10 coups/ couche	25 coups/ couche	55 coups/ couche
W (%)	11.4	11.4	11.4
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.62	1.69	1.76
Indice CBR max(%)	11.32	14.19	19.55
CBR à 95% de l'OPM (%)	12.57		
Sable +8%caoutchouc +2%chaux			
W (%)	12.9	12.9	12.9
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.53	1.58	1.63
Indice CBR max (%)	16.14	24.99	30.84
CBR à 95% de l'OPM (%)	21.24		
Sable +12%caoutchouc +3%chaux			
W (%)	13.5	13.5	13.5
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.51	1.56	1.61
Indice CBR max (%)	11.76	16.58	24.52
CBR à 95% de l'OPM (%)	14.44		
Sable +16%caoutchouc +4%chaux			
W (%)	14.9	14.9	14.9
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.50	1.54	1.57
Indice CBR max(%)	9.27	11.30	13.20
CBR à 95% de l'OPM (%)	10.50		
Sable+20%caoutchouc +5%chaux			
W (%)	15.2	15.2	15.2
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.48	1.51	1.55
Indice CBR max (%)	3.54	5.22	6.73
CBR à 95% de l'OPM (%)	4.60		

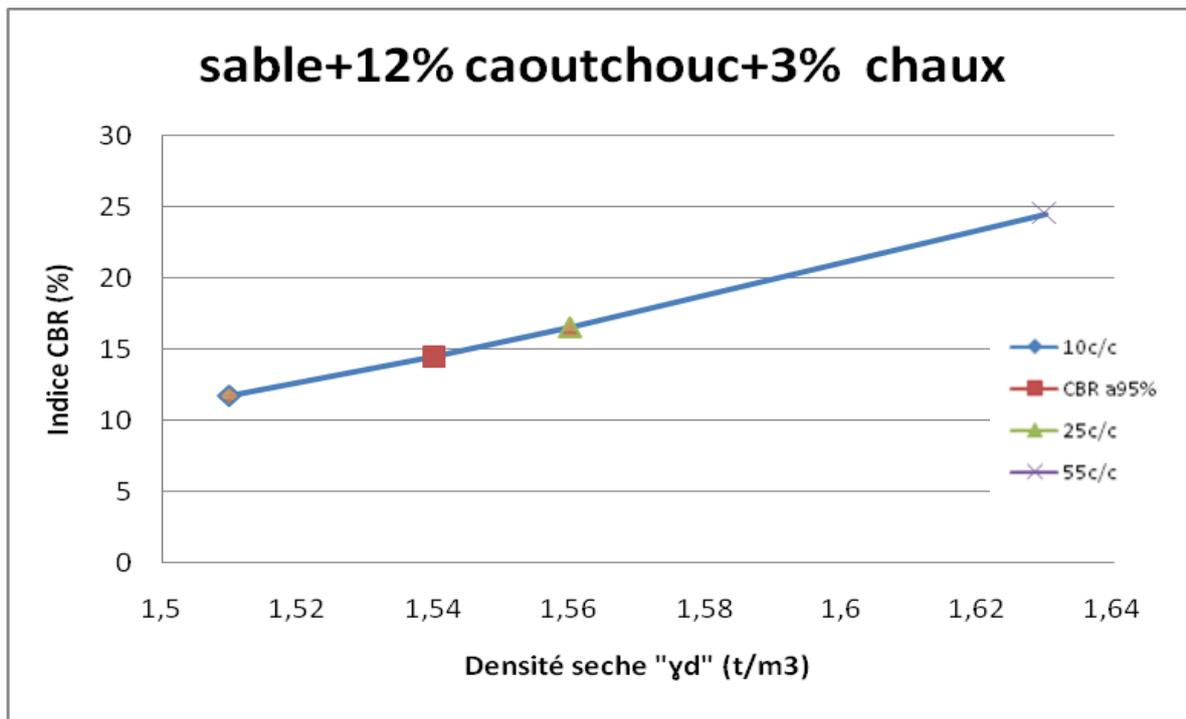
Les figures III.11 ; III.12 ; III.13 ; III.14; III.15 et III.16 montrent la déduction des valeurs CBR à 95% à partir d'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité



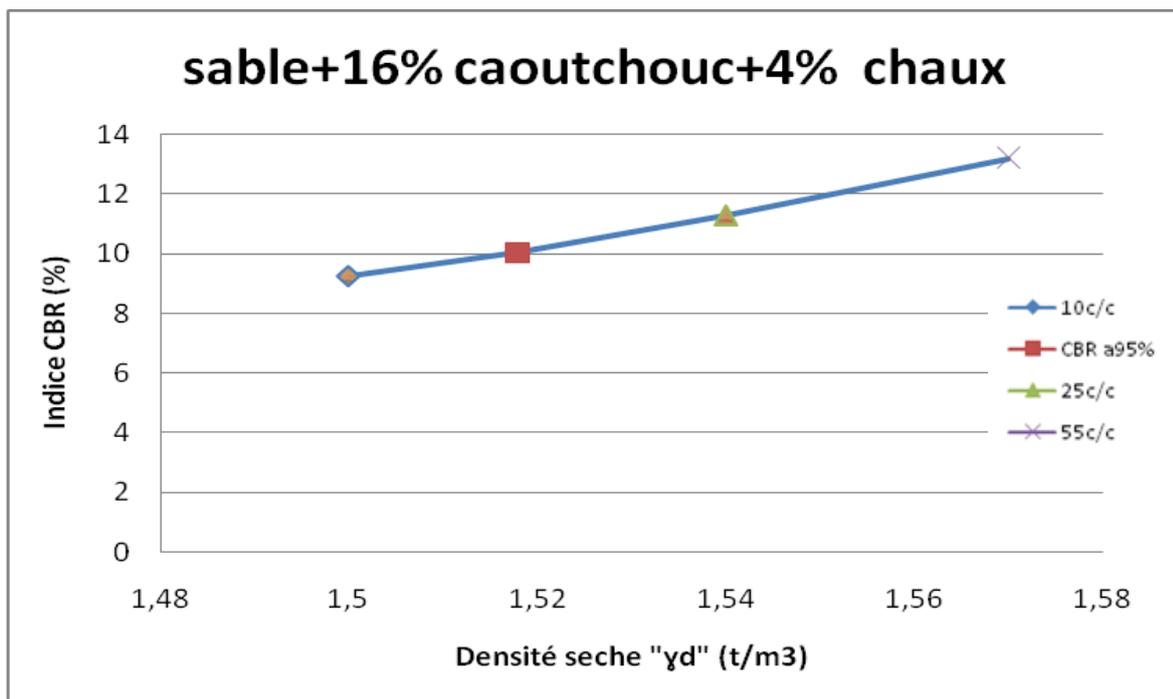
**Figure III.11** : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de sable seul



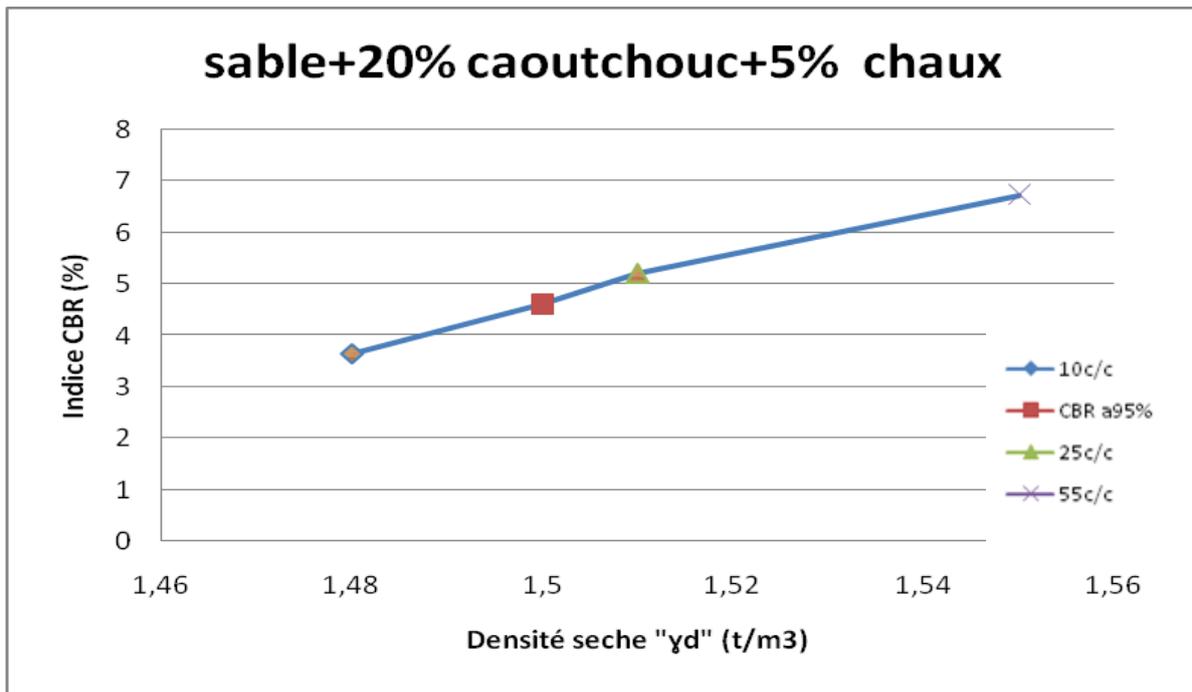
**Figure III.12**: l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+8% caoutchouc +2% chaux.



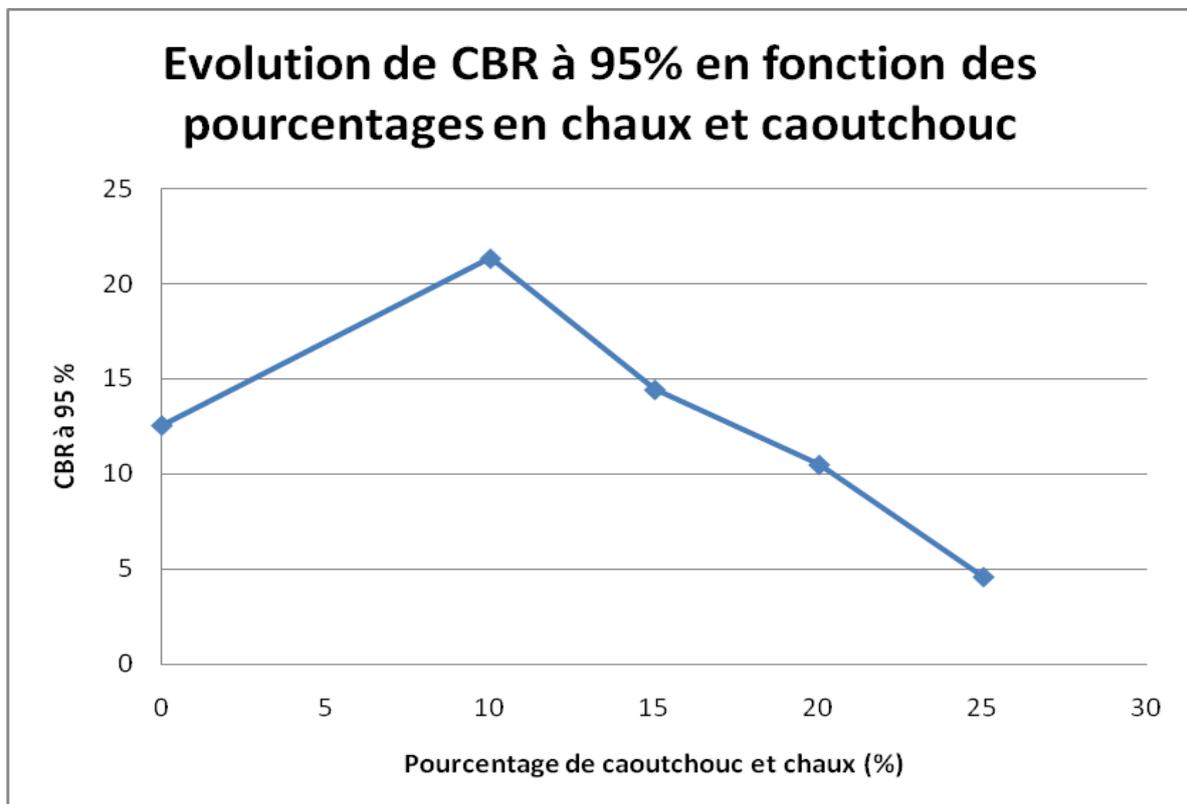
**Figure III.13 :** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+12% caoutchouc +3% chaux.



**Figure III.14 :** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+ 16% caoutchouc+4% chaux.



**Figure III.15** : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+20% caoutchouc +5% chaux.

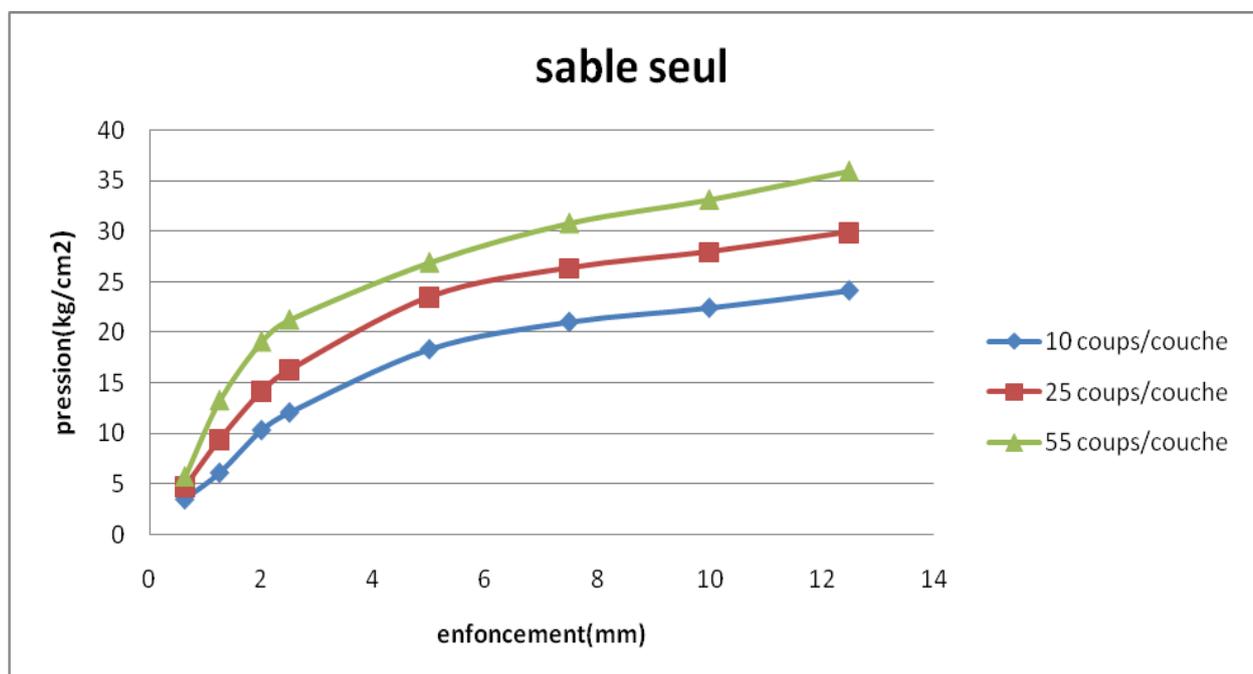


**Figure III.16** Evolution de CBR à 95% en fonction des pourcentages en caoutchouc+ chaux

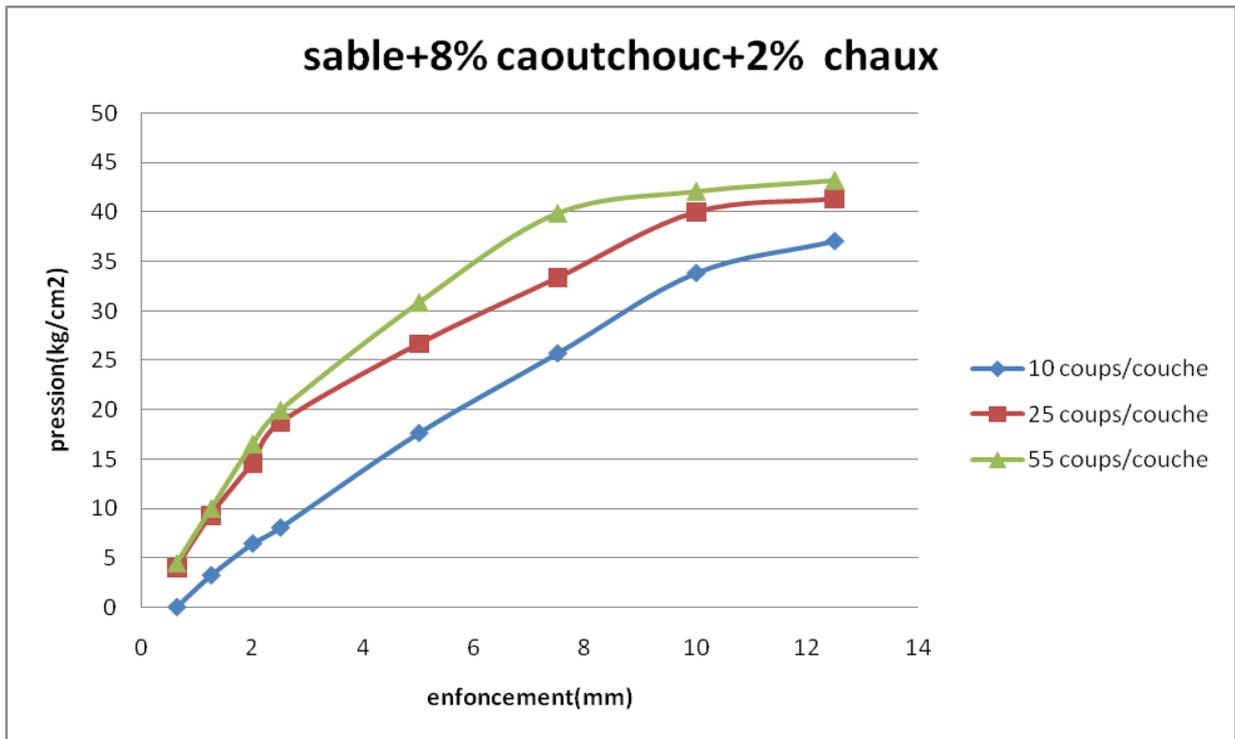
- Les résultats ont montré qu'il y a une augmentation de l'indice CBR avec le mélange de 8% caoutchouc+2% chaux et puis diminuer avec les autres mélanges et aussi une augmentation de CBR à 95% par rapport au sable seul.
- Le mélange sable+8% poudre de caoutchouc + 2% chaux donne des valeurs maximales, allant de 12.57 % de sable seul jusqu'à 21.34 % .
- Les résultats obtenus en essai CBR confirme que le pourcentage 8% caoutchouc + 2 % chaux est un teneur optimum de fine pour cette étude.

### III.3.4 Résultats CBR immersion

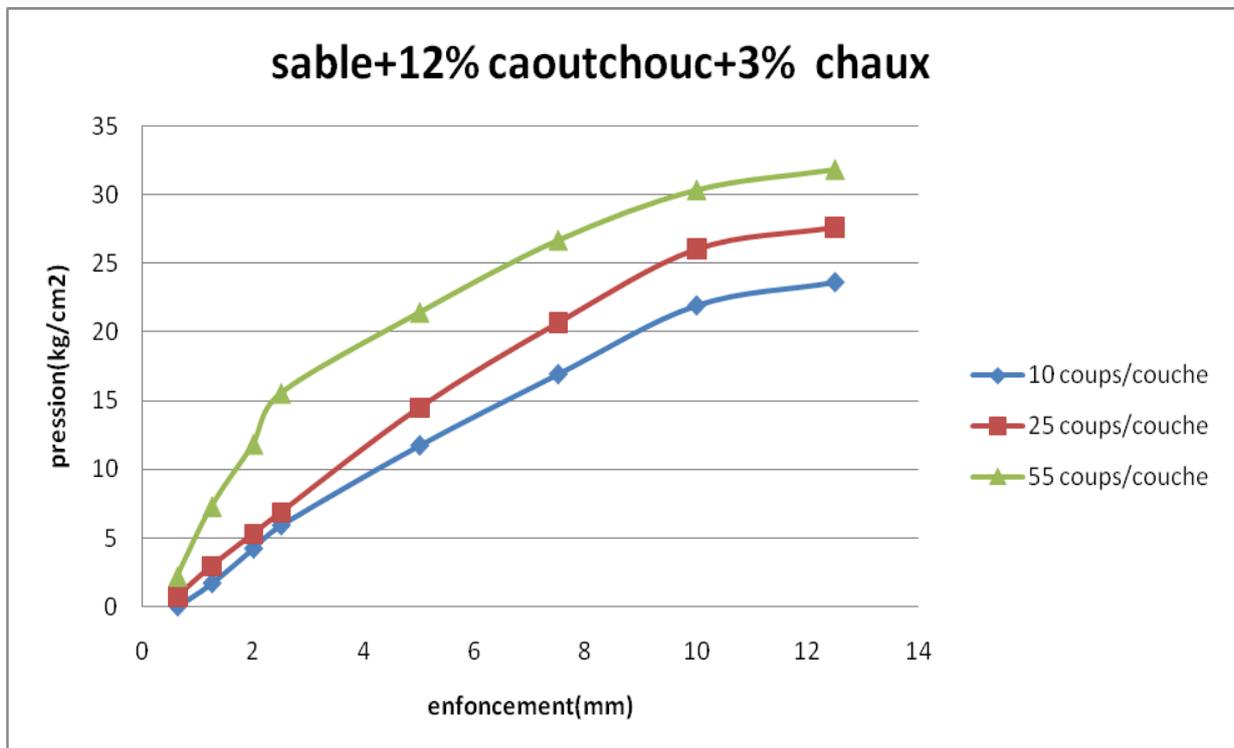
Les figures CBR immersion (III.17) ; (III.18) ; (III.19) ; (III.20) ;(III.21) et le tableau (III.4) résumant la pression obtenue en fonction d'enfoncement pour les différents mélanges sable + chaux à 10 coups ; 25 coups et 55 coups par couche



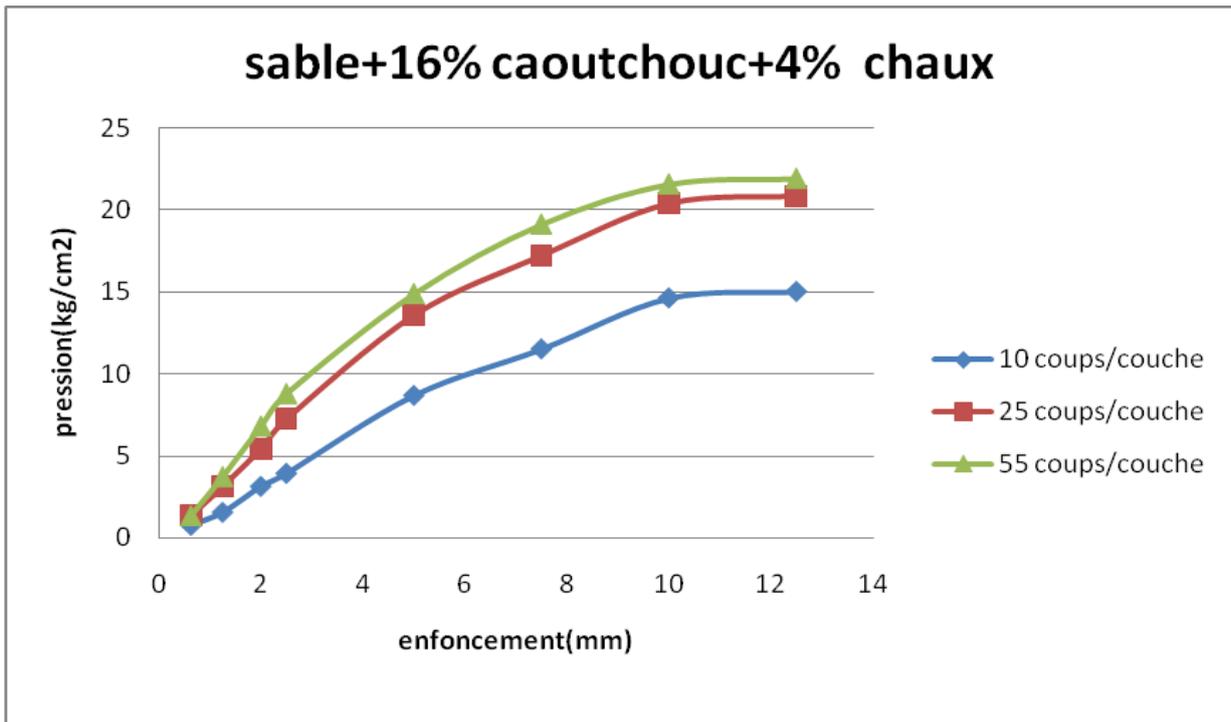
**Figure III.17:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable



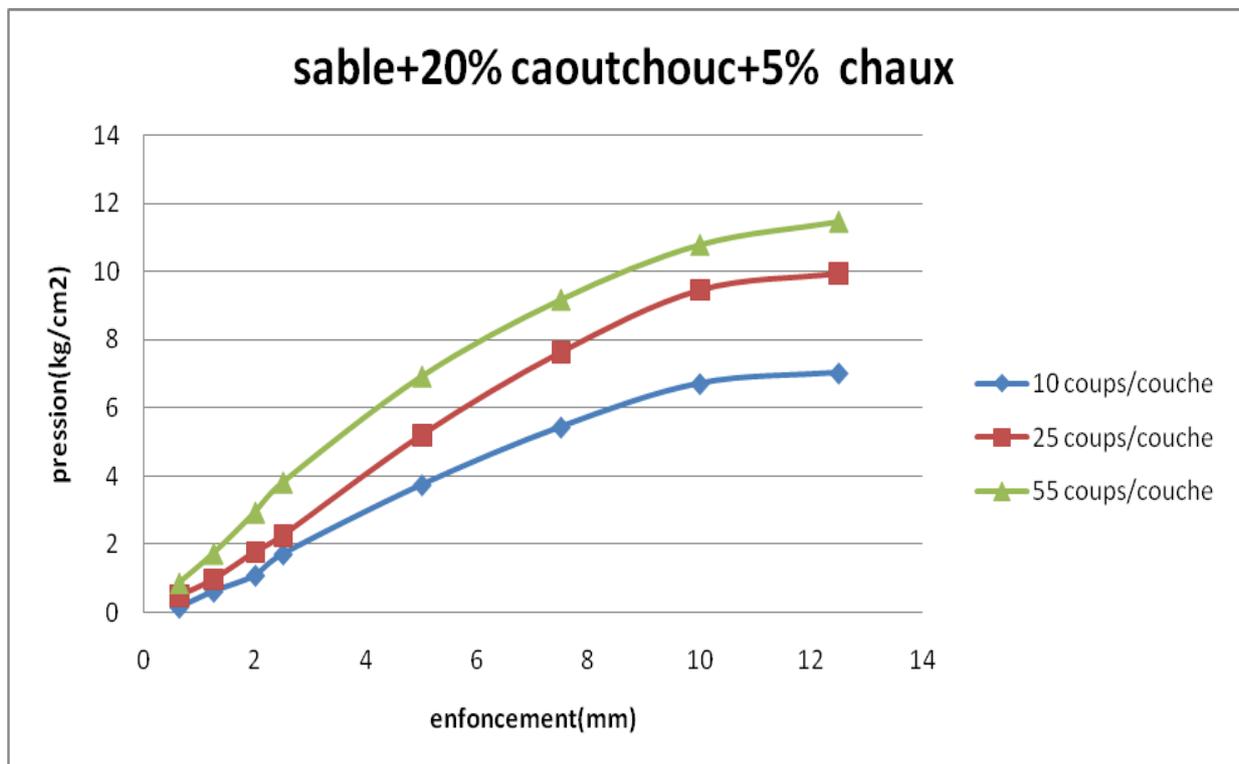
**Figure III.18:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +8%caoutchouc+2% chaux



**Figure III.19:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +12%caoutchouc 3% chaux.



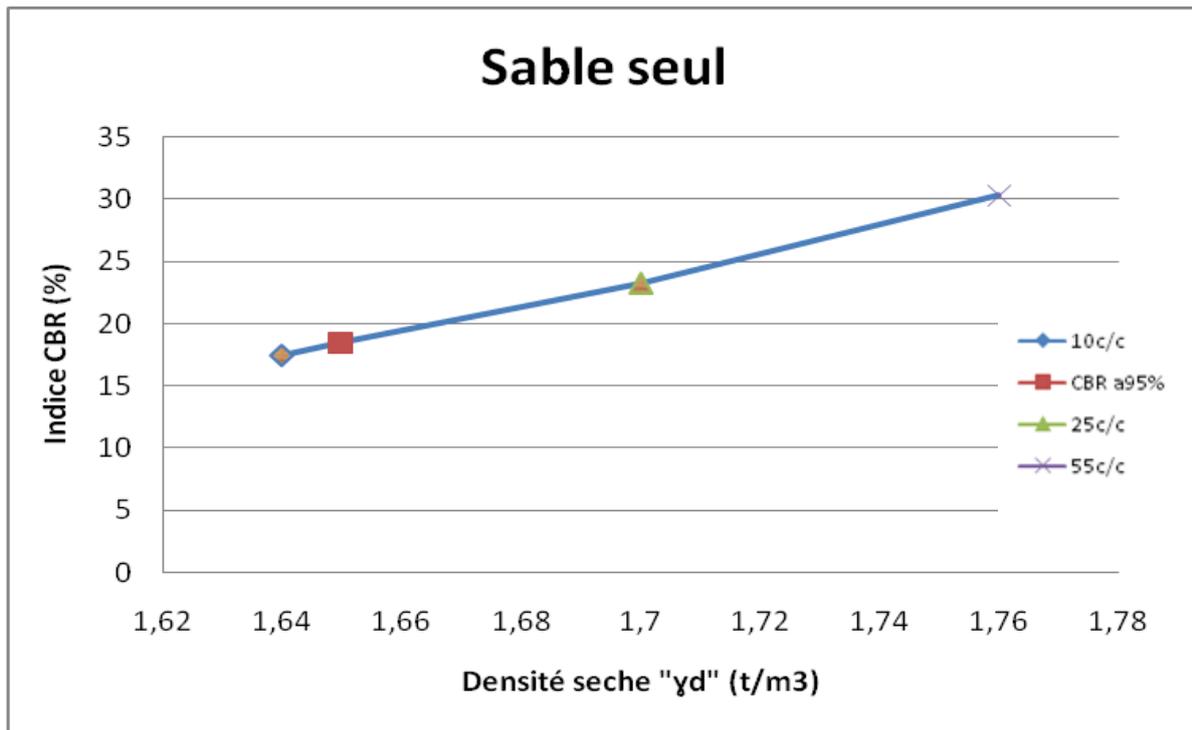
**Figure III.20:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +16% caoutchouc 4% chaux



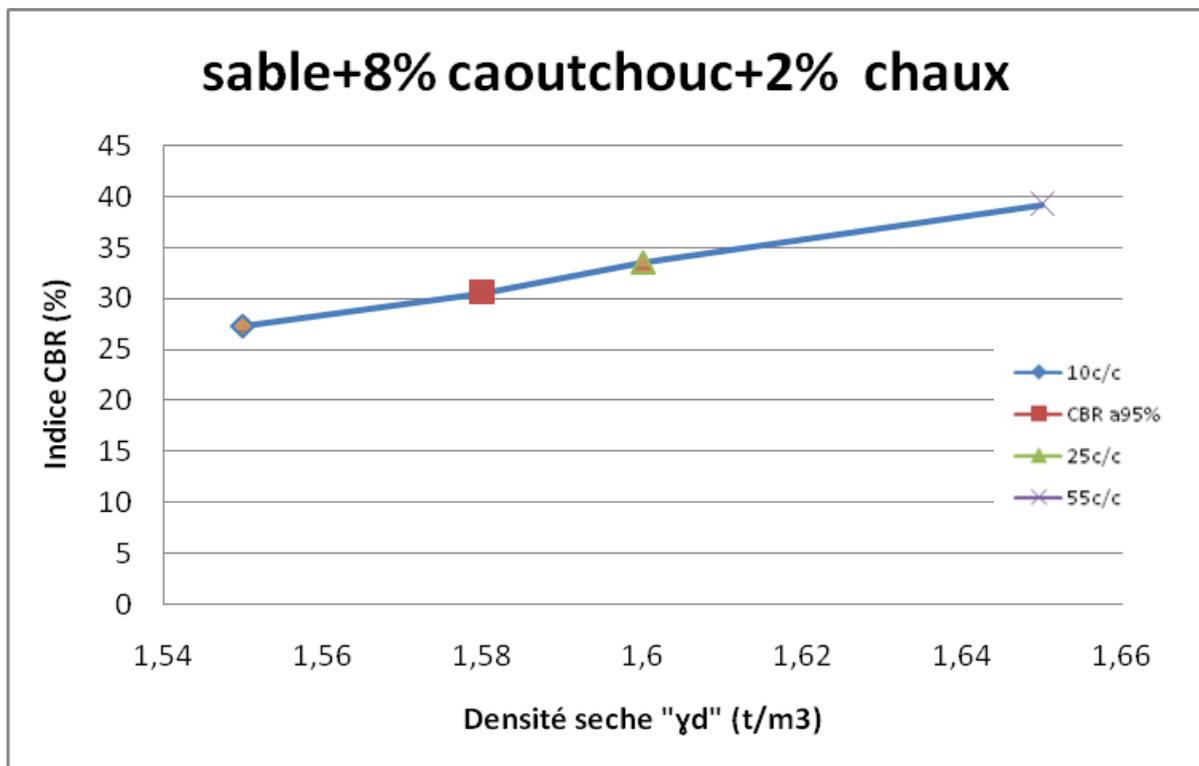
**Figure III.21:** Evolution de pression en fonction d'enfoncement pour sable +20%caoutchouc +5% chaux

**Tableau III.4:** Résultats obtenu pour le CBR immersion à 95% de l'OPM

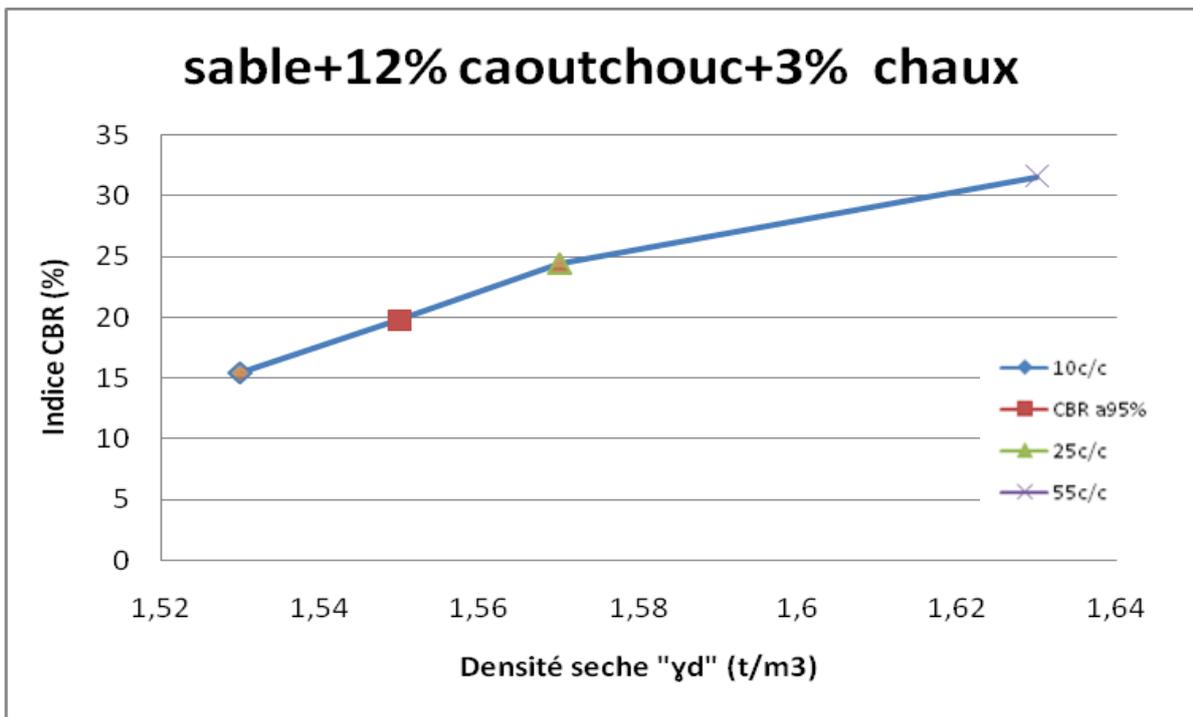
Sable seul			
	10 coups/ couche	25 coups/ couche	55 coups/ couche
W (%)	11.4	11.4	11.4
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.64	1.70	1.76
Indice CBR max(%)	17.45	23.26	30.34
CBR à 95% de l'OPM (%)	18.47		
Sable +8%caoutchouc +2%chaux			
W (%)	12.9	12.9	12.9
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.55	1.60	1.65
Indice CBR max (%)	27.55	33.54	39.15
CBR à 95% de l'OPM (%)	30.50		
Sable +12%caoutchouc +3%chaux			
W (%)	13.5	13.5	13.5
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.53	1.57	1.63
Indice CBR max (%)	15.45	24.47	31.54
CBR à 95% de l'OPM (%)	19.80		
Sable +16%caoutchouc +4%chaux			
W (%)	14.9	14.9	14.9
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.52	1.55	1.59
Indice CBR max(%)	11.22	14.80	19.47
CBR à 95% de l'OPM (%)	12.36		
Sable+20%caoutchouc +5%chaux			
W (%)	15.2	15.2	15.2
$\gamma_d$ ( $t/m^3$ )	1.50	1.53	1.57
Indice CBR max (%)	6.54	10.20	16.57
CBR à 95% de l'OPM (%)	9.18		



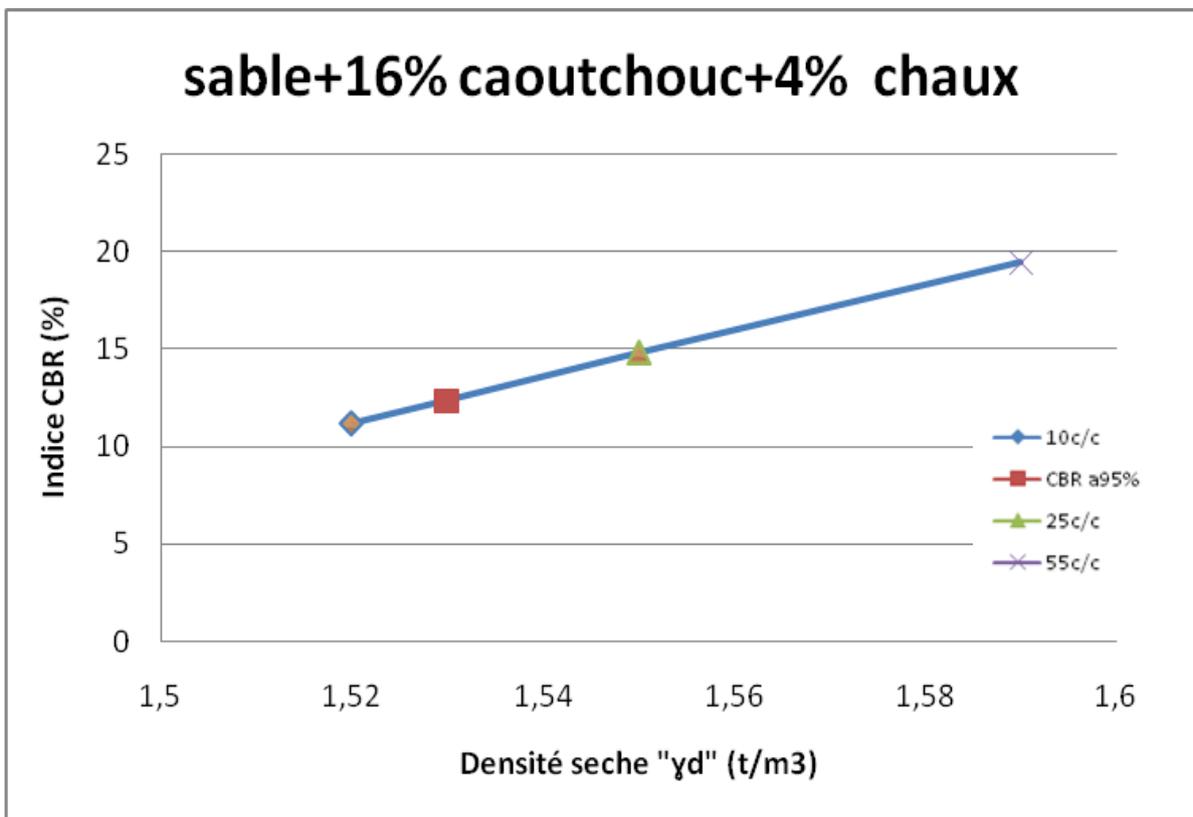
**Figure III.22** : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de sable seul



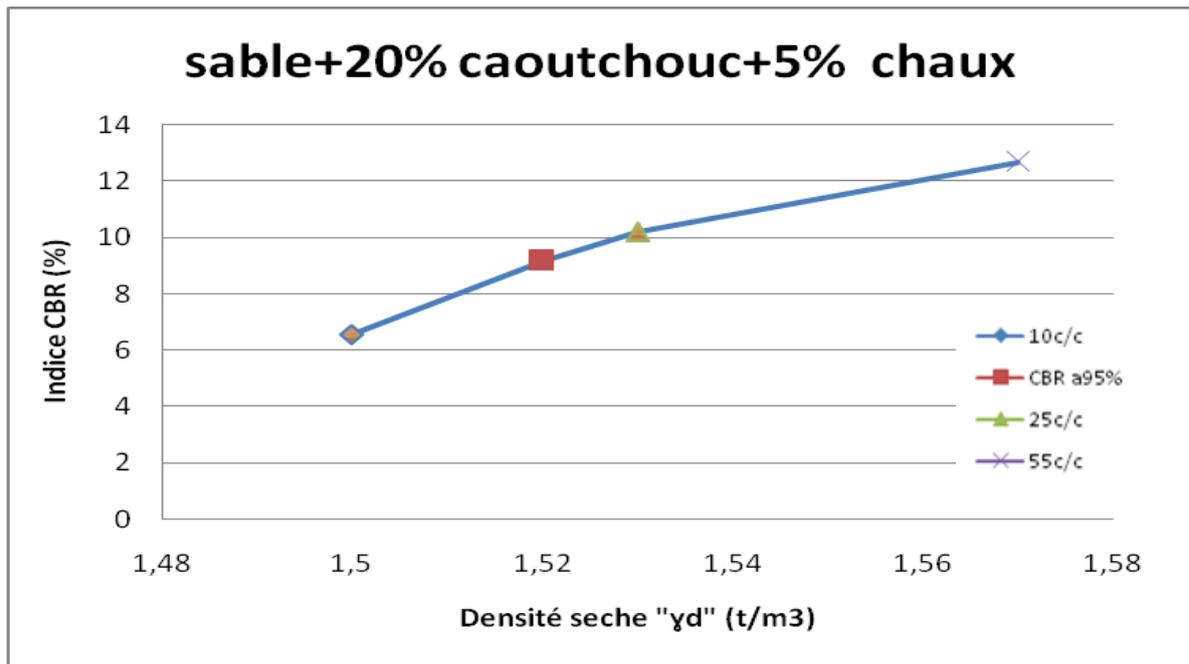
**Figure III.23** : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+8%caoutchouc +2% chaux.



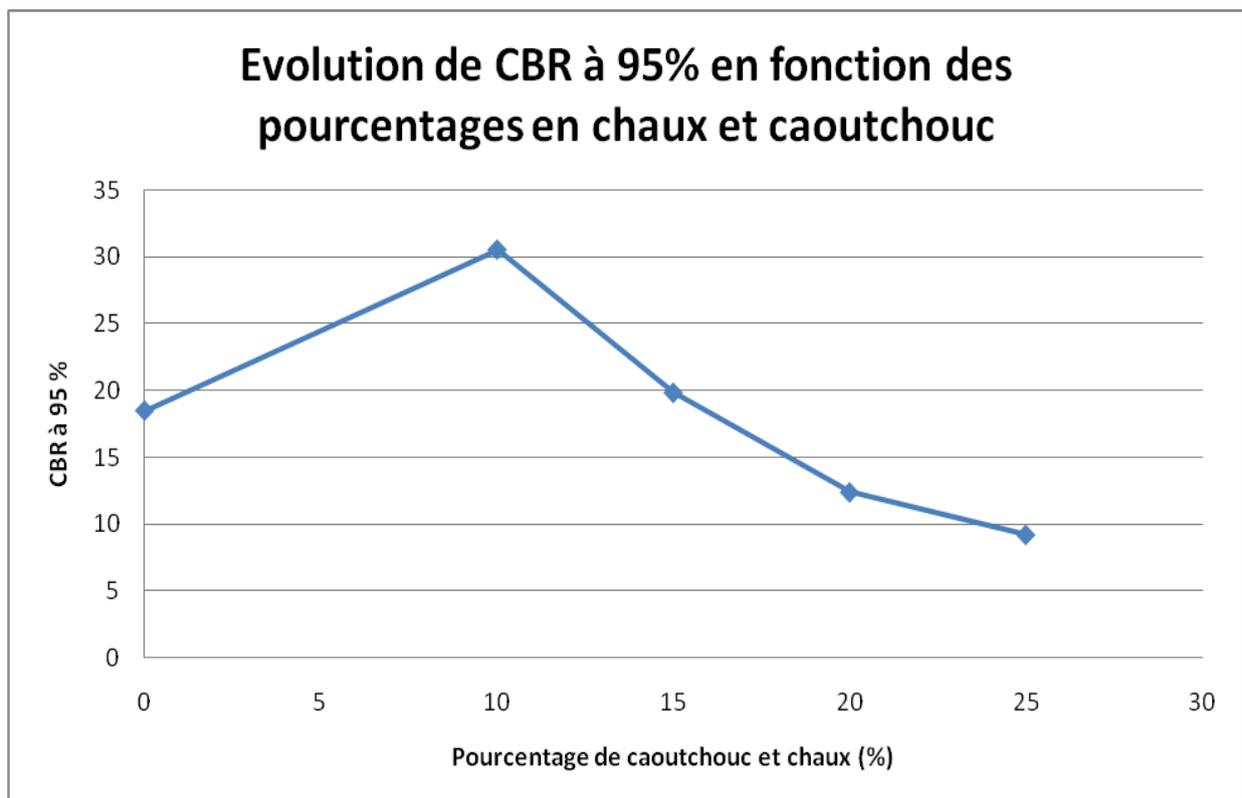
**Figure III.24:** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+12 %caoutchouc +3% chaux.



**Figure III.25 :** l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+16%caoutchouc +4% chaux.



**Figure III.26** : l'évolution d'indice CBR max en fonction de la densité sèche de mélange sable+20%caoutchouc +5% chaux.



**Figure III.27** Evolution de CBR à 95% en fonction des pourcentages en chaux et caoutchouc

- le mélange de 8% caoutchouc + 2 % chaux montre une augmentation de l'indice CBR et par la suite une augmentation de CBR à 95% par rapport au sable.
- L'indice CBR immédiat et à l'immersion varie proportionnellement à l'augmentation ou abaisse selon le pourcentage (caoutchouc+chaux).
- Le mélange sable (8%caoutchouc+2% chaux) donne de valeur maximale de CBR à 95%, allant de 18.47 % de sable seul jusqu'à 30.5 % et puis réduire avec l'augmentation des pourcentages de poudrette de caoutchouc et la chaux.
- Les résultats obtenus en essai CBR confirme que le pourcentage (8% caoutchouc+ 2% chaux) est un teneur optimum de fine pour cette étude
- Augmenter de pourcentage de la poudrette de caoutchouc conduit à l'augmentation de la proportion de vides, ce qui a conduit à une abaisse de l'indice de CBR après le pourcentage d'ajout de 8% caoutchouc + 2% chaux.

#### **III.4 RESISTANCE AU CISAILLEMENT :**

Les essais les plus utilisés au laboratoire, sont l'essai de cisaillement direct (NF P94-071) et l'essai triaxial.

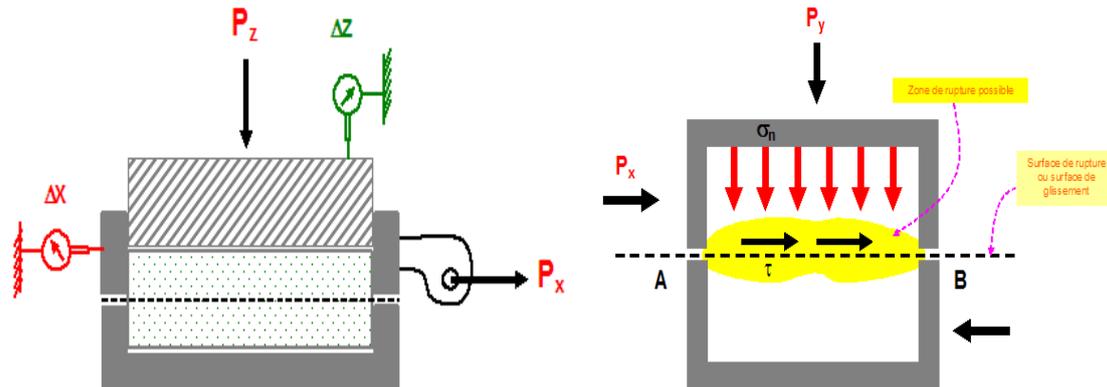
##### **III.4.1 Essai de cisaillement direct :**

L'essai est destiné à évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol, c'est-à-dire la cohésion  $C$ , l'angle de frottement  $\Phi'$  et la résistance au cisaillement  $\tau_{\max}$  au moment de rupture.

### III.4.2 Principe de l'essai:

L'échantillon de sol à étudier est placé entre deux demi-boîtes qui peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre. De plus, un piston permet d'exercer une contrainte normale au plan de cisaillement [37].

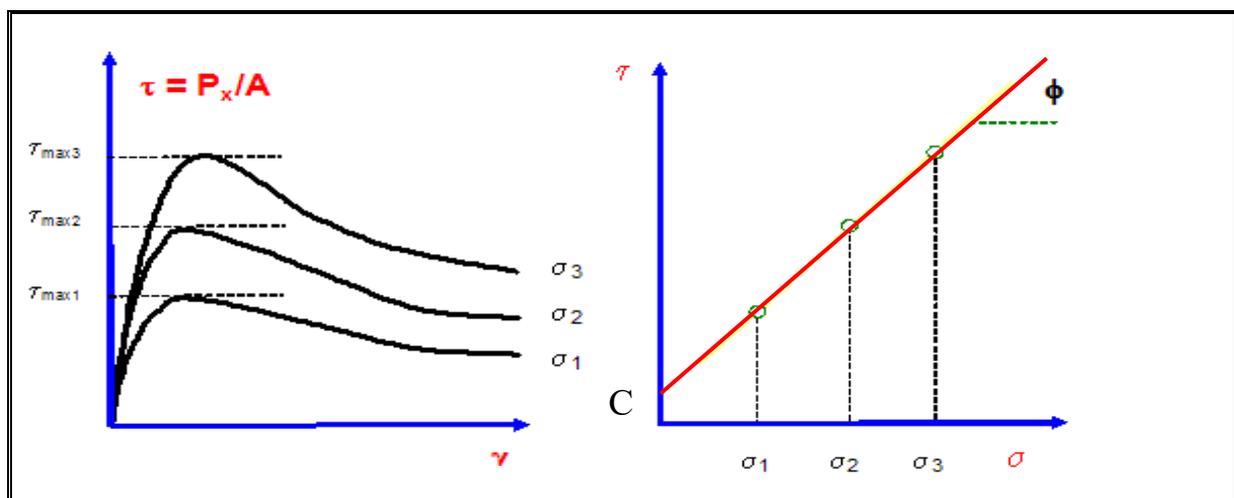
Les demi-boîtes inférieures sont entraînées horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement  $F$  est à mesurer à l'aide d'un anneau fixé à la demi-boîte extérieure.



**Figure III.28 :** Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Sur la courbe Contrainte-Déformation (déplacement horizontal), la résistance au cisaillement est définie comme étant:

- Le maximum de la contrainte de cisaillement  $\tau_{\max}$ .
- La contrainte de cisaillement  $\tau_1$  correspondant à une déformation fixée  $\epsilon_1$
- La résistance au cisaillement est la contrainte de cisaillement à très grande déformation.



**Figure III.29:** Les caractéristiques mécaniques de résistance au cisaillement.

### III.4.3 Les différents types d'essais :

Il existe trois types qui peuvent être effectués à l'appareil de cisaillement à la boîte:

**a) Essai consolidé – drainé (C.D) :**

L'échantillon est consolidé sous un effort  $N$  constant, cet essai permet de mesurer les paramètres  $\phi_d$  et  $C_d$ . la vitesse de cisaillement est environ un micron par minute, et doit être choisie en fonction de la perméabilité du sol testé. La vitesse de cisaillement est de l'ordre de micron par minute

**b) Essai consolidé – non drainé (C.U) :**

L'essai C.U ne convient que pour les sols de faibles perméabilités. La phase de consolidation est identique à celle de l'essai CD.

**c) Essai non consolidé – non drainé (UU) :**

Cet essai convient les sols peu perméables Il est important de réaliser l'essai avec une vitesse de cisaillement élevée, de l'ordre de 1mm/mn.

Le tableau II.7 reporte les vitesses des trois types d'essais.

**Tableau III.5 :** Vitesses des essais de cisaillement.

Type d'essai	Vitesse
Essai U.U	0,25-0,5 (mm/mn)
Essai C.U	2-20 ( $\mu\text{m}/\text{mn}$ )
Essai C.D	0,5-2( $\mu\text{m}/\text{mn}$ )

### III.4.4 Choix des paramètres de résistance au cisaillement :

La détermination des paramètres mécaniques s'effectue conformément aux indications données par le tableau III.18 Smaida. (2008).

**Tableau III.6 :** Choix des paramètres caractéristiques de cisaillement de sols cité par Smaida (2008)

Type de sol	Type de calcul	Type de Comportement	Caractéristiques	Type D'essai	paramètres	formule	appareillage
Cohérent saturé	Court Terme	Non Drainé	Non Drainées	U.U C.U	$C_u$ $\lambda_{cu}$	$\tau = C_u$ $\Delta C_u = \lambda_{cu} \cdot \Delta \sigma'$	Triaxial (boite de cisaillement)
Cohérent Non saturé	Court terme	Non Drainé	Non Drainées	U.U	$C_{uu}, v_{uu}$	$\tau = C_u + \sigma' \cdot \tan v_{uu}$	triaxial (boite de cisaillement)
Cohérent	Long Terme	Drainé	Drainées	C.D C.U avec mesure de u	$C', v'$	$\tau = C' + \sigma' \tan v'$	Triaxial où boite de cisaillement (C.D), triaxial pour C.U
pulvérulent	Long Terme Ou Court terme	Drainé	Drainées	C.D	$C', v'$	$\tau = C' + \sigma' \tan v'$	Triaxial ou boite de cisaillement

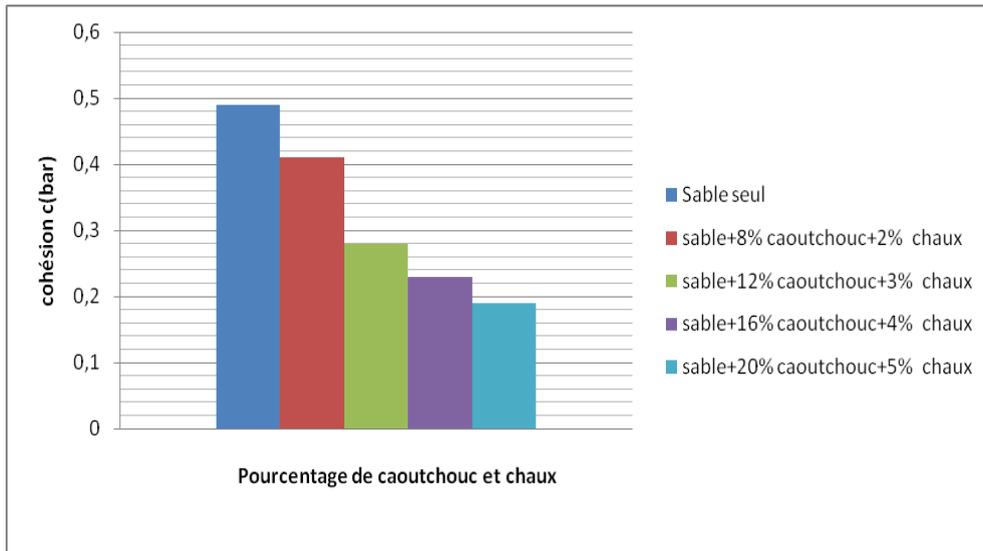
**III.5 Effet de caoutchouc+chaux sur la résistance mécanique :**

Les mélanges traités sable+caoutchouc+chaux(%) ont été tous préparé à la teneur en eau optimum comme dise les procédures d'essai de cisaillement à la boite.

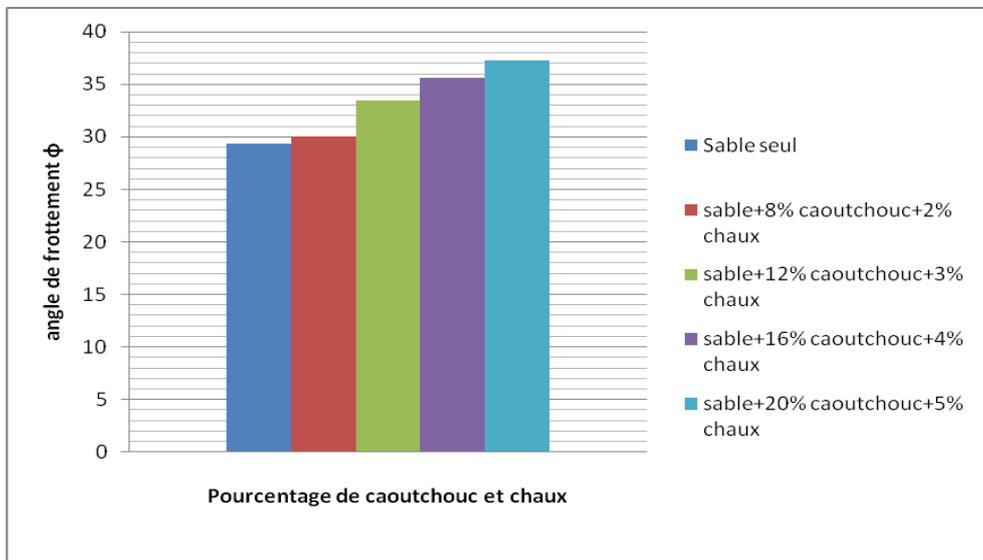
Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau III.7.

**Tableau III.7:** Caractéristiques mécaniques des mélanges Sable de dune+caoutchouc(%) +chaux (%)

	$\varphi^{\circ}_{pic}$	$C_{pic}$ (bar)	$\tau_{1pic}$ (bar)	$\tau_{2pic}$ (bar)	$\tau_{3pic}$ (bar)
<b>S (Sable seul)</b>	29.36	0.49	1.32	1.67	2.03
<b>S+8%C+2%Ch</b>	30.02	0.41	1.21	1.63	2.05
<b>S+12%C+3% Ch</b>	33.40	0.28	1.11	1.75	2.02
<b>S+16%C+4% Ch</b>	35.56	0.23	1.14	1.85	2.59
<b>S+20%C+5% Ch</b>	37.29	0.19	0.70	1.62	2.19



**Figure III.30 :** Variation de cohésion en fonction des pourcentages de caoutchouc+chaux.

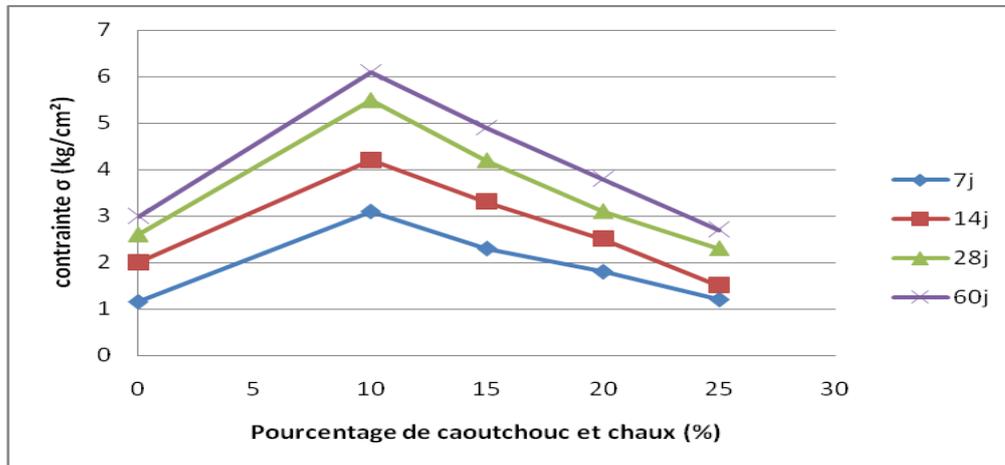


**Figure III.31:** Variation de l'angle de frottement en fonction des pourcentages de caoutchouc +chaux

- Tous les mélanges (sable + caoutchouc(%) +chaux(%)) montre une réduction de résistance au cisaillement traduit par la décroissance de cohésion (voir figure III.30) ; ce qui confirme les résultats précédents.
- Inversement à la variation de cohésion ; on constate une augmentation de l'angle de frottement proportionnellement à l'augmentation de pourcentage (caoutchouc +chaux) , qui donne l'importance d'ajout de caoutchouc +chaux pour l'amélioration des propriétés mécaniques des sols

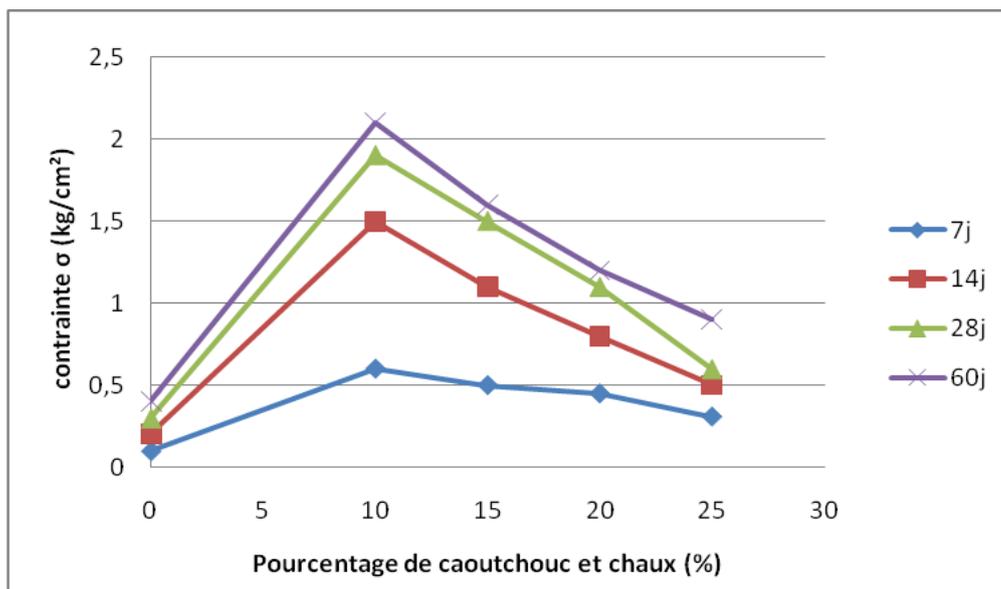
### III.6 RESISTANCE A LA COMPRESSION

Les résultats aux essais d'écrasement des éprouvettes aux 7 jours ; 14 jours ; 28 jours et 60 jours de cure sont résumés au figure suivant :



**Figure III.32** : Variation de la résistance à la compression en fonction d'ajout caoutchouc +chaux

### III.7 RESISTANCE DE TRACTION :



**Figure III.33** : Variation de la résistance à la traction en fonction d'ajout caoutchouc+chaux.

- On constate une augmentation de résistance à la compression et la résistance à la traction pour les deux durées de cure 7 ; 14 ; 28 et 60 jours pour le pourcentage de 8%caoutchouc et 2 % chaux. La figure ci-dessus figure III.32 montre l'augmentation de la résistance de compression pour le mélange 8% caoutchouc et 2 % chaux ainsi pour les différents durées de cure mais pour les autres échantillons on remarque une réduction graduée par rapport au sol seul.
- De même une augmentation de la résistance à la traction (voir figure III.33) l'amélioration est clairement remarquable.
- La valeur de 8% caoutchouc et 2 % chaux est représentée un teneur optimum pour la résistance de compression et la traction.
- **Conclusion :**

D'après les résultats obtenus on note que :

- Tous les mélanges ont donnés des densités sèches plus petites que celle obtenue pour le sable seul. L'augmentation de la poudrette de caoutchouc conduit à une pénurie de la densité sèche.
- On constate une augmentation de la teneur en eau optimum proportionnellement à l'augmentation de pourcentage caoutchouc +chaux. La chaux absorbe l'eau qui augmenter la teneur en eau.
- Le mélange de 8% poudrette de caoutchouc + 2% chaux est montre une augmentation pour les valeurs de CBR à 95% de l'OPM que ce soit pour immédiat ou immersion ; ce qui indique l'augmentation de la capacité portante des assises des chaussées.
- Tous les mélange ont montré une amélioration de la résistance à la compression et la résistance à la traction aux différents âges de cure 07 ; 14 ; 28 et 60 jours.
- Le mélange de 8% caoutchouc + 2% chaux est montré une amélioration de la résistance à la compression et la résistance à la traction aux différents âges de cure 07 ; 14 ; 28 et 60 jours.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale :

Comme on a mentionné auparavant, le but de cette recherche est thèse est l'étude des possibilités d'utilisation le sable de dune en assises des chaussées puis faire combinés ce matériaux avec le la poudrette de caoutchouc des pneus usées et la chaux de SAIDA, ainsi de déterminer la meilleure combinaison, qui donne des meilleures propriétés mécaniques.

D'après les résultats obtenus ; on remarque que :

- Le sable de dune ZAAFRANE utilisé dans cette étude est un sable à fort pourcentage en silice qui de l'ordre 93.23% prouvé par l'analyse chimique et l'analyse minéralogique.
- L'indice de plasticité  $I_p$  de ces matériaux est nul ce qui indique ce matériau est recommandé pour les trafics plus élevés.
- La densité sèche des différents mélanges ont montré des valeurs minimales par rapport au sable de dune seul qui est 1.57 t/m<sup>3</sup> pour le mélange (sable + 20 % caoutchouc+5% chaux) par rapport au sable seul qui est de l'ordre de 1.76 t/m<sup>3</sup>.
- L'ajout de quantités croissantes d'ajout caoutchouc+chaux a mis en évidence une diminution de la densité sèche minimale.
- Proportionnellement à la densité sèche ; on remarque une augmentation de la teneur en eau optimale.
- La densité sèche et la teneur en eau optimale le CBR à 95% ont montré une croissance par rapport au sable seul avec le mélange 8% caoutchouc et 2% chaux.
- Pour la résistance au cisaillement tous les mélanges ont montrés des résistances de cisaillement plus élevés que ceux obtenus pour le sable de dune seul avec le mélange 8% caoutchouc et 2% chaux, traduit par l'augmentation de l'angle de frottement.
- Inversement à l'augmentation de l'angle de frottement ; on remarque une diminution de la cohésion .
- Le pourcentage 8% caoutchouc+2% chaux est un teneur optimum de matière fine pour avoir des meilleurs résultats.

Les avantages d'utiliser des matériaux locaux sont bien des avantages économiques (coût et transport) qui sont des facteurs très importants à tenir en considération pour entamer un projet.

### Recommandation:

- Il serait souhaitable d'effectuer des études supplémentaires et approfondies sur les méthodes de stabilisations combinées (Sable + ciment ; chaux seul et laitier).
- Il serait intéressant de mener une étude sur le comportement mécanique (résistance au cisaillement) des sols stabilisés par d'autres ajouts à l'aide de l'essai triaxiale.

# Références

# Bibliographiques

# Bibliographie :

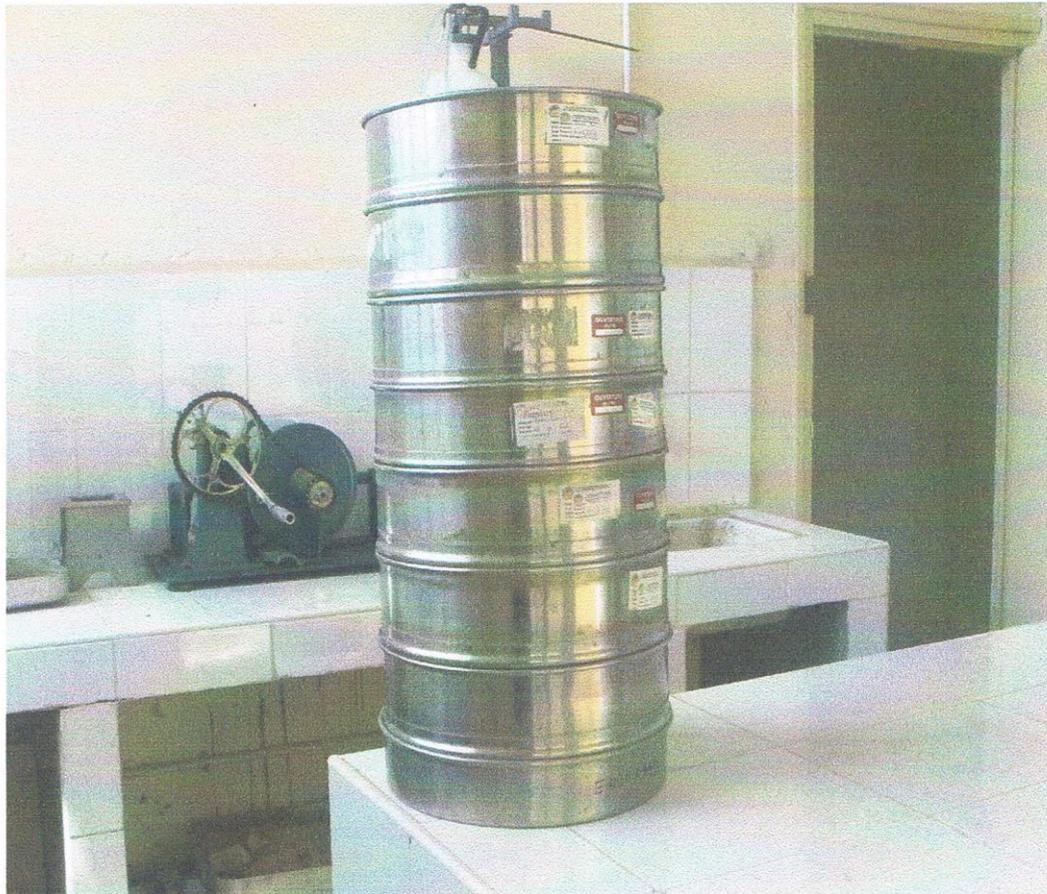
- 1) AFNOR (1999), NF P94-093. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal. Essai Proctor modifié.
- 2) AFNOR (2003), NF EN 13286-41. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- 3) AFNOR 2003, NF EN 13286-42. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la traction indirect des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- 4) AFNOR 2003, NF EN 13286-43. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43: méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- 5) AFNOR 2005, NF EN 14227-1. Mélanges traités aux liants hydrauliques - Partie 1: Mélanges granulaires traités au ciment.
- 6) AFNOR 2005, NF EN 13286-53. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 53 : méthode de confection par compression axiale des éprouvettes de matériaux traités aux liants hydrauliques.
- 7) SETRA, (2000) Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques –des remblais et des couches de formes. : Guide technique. – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) Application à la réalisation; 246 p.
- 8) Collection technique Cimbéton (2009). Terrassements et assises de chaussées. Traitement des sols aux liants hydrauliques.
- 9) Michel Venuat ; (1980) : Le traitement des sols à la chaux et au ciment,. 459 p.
- 10) Konan K.L. (2006): Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium. Thèse de doctorat de l'université de limoges. 144 p.
- 11) Perret P. (1977): Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux: étude globale du phénomène et applications. Thèse de doctorat INSA de Rennes
- 12) C.E.B.T.P ; (1984): Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, ministère française de la coopération.

- 13) JEUFFROY, G « Conception et construction des chaussées ; tome I »,Eyrolles 1967.
- 14)Roberts Holts et Williams Kovacs Introduction à la géotechnique, édition de l'école polytechnique de Montréal.
- 15) Maimouna Sidibé ; (1995) Etude de l'utilisation des granulats de type silexite en géotechnique routière, école polytechnique de Thiès .
- 16)Mor Gueye Gaye ; (1995) caractérisations et performances d'un granulat : type nouveau en corps de chaussée : les silexites (produits secondaires dans la chaine de production de la CSPT-Taïba) Institut des sciences de la terre.
- 17) Direction des Travaux Publics ; (1995) : Rapport sur le projet Géoul-Baralè, PAST.
- 18)Khoulth NDIAYE ; (1993): Etude de l'utilisation du sable butume en couche de base, Ecole Polytechnique de Thiés.
- 19)Massamba DIENE ; (1984) : Latérites et stabilisation en construction routière .Application à deux graveleux latéritiques du Sénégal, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Juin1984.
- 20)Plan minéral : Direction de la Géologie Volume 1.
- 21)Youssouf SAKHO ; (1994)Cours de Route II, Ecole Polytechnique de Thiés.
- 22)Mas samba DIENE ; (1996)Coure de Route II, Ecole Polytechnique de Triée ,1996.
- 23)SETRA-LCPC. GTR. Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Editions du SETRA-LCPC, Fascicules I & II, 98 p. et 102 p. (2000).
- 24)SETRA-LCPC. GTS. Guide du traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques. Editions du SETRA-LCPC, 237 p. (2000).
- 25) SETRA, (2000) Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques –des remblais et des couches de formes. : Guide technique. – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) Application à la réalisation; 246 p.
- 26) SFEASIBILITY STUDY Karin Axels son Sven-Erik Johansson Ronny Anderson (English Translation July (2002). « Stabilization of Organic Soils by Cement and Puzzolanic Reactions
- 27) S.Kolias et al (2005) [www.elsevier.com/locate/cemconcomp](http://www.elsevier.com/locate/cemconcomp) cement concrete and composite Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement.

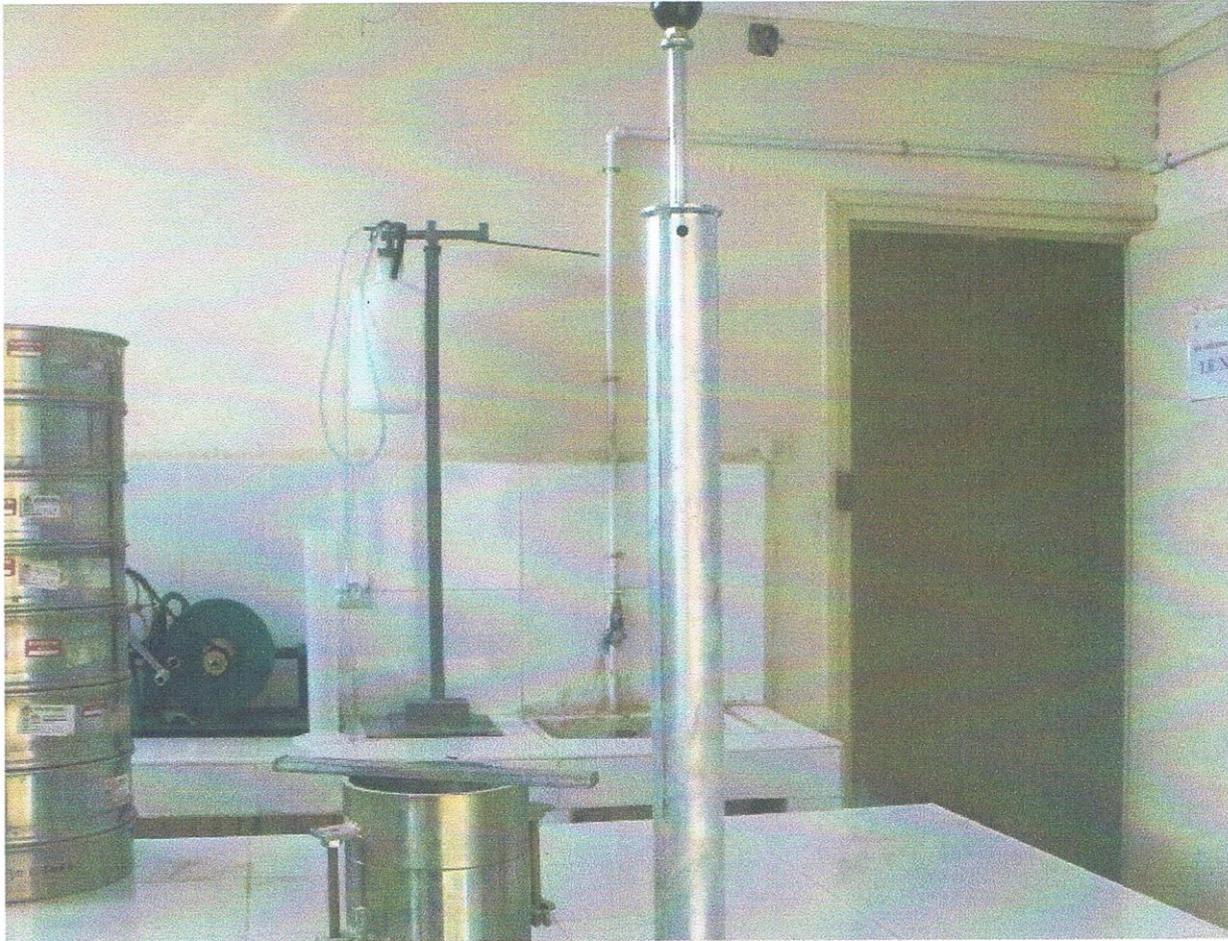
- 28) Grzegorz Kacprzak ; (2006) « Etude de comportement mécanique des mélanges sable-argile ».
- 29) Influence of fines on tab properties of arid climate sand deposits Nabil F –Ismail
- 30) Grzegorz Kacprzak ; (2006) « Etude de comportement mécanique des mélanges sable-argile ».
- 31) Aménagements décoratifs en matériaux naturels stabilisés aux liants hydrauliques- Caractéristiques techniques et règles de bonne pratique (2008).
- 32) SMAIDA et Al; (2008) « Stabilisation des argiles gonflantes : Effet de l'association chaux+ciment sur les propriétés physico-mécaniques ».
- 33) TRAN N.T. Valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière. Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France (2009).
- 34) synthèse d'étude Laboratoire routier ( 2010) « sable stabilisés en couche de surface »
- 35) Aménagements décoratifs en matériaux naturels stabilisés aux liants hydrauliques- Caractéristiques techniques et règles de bonne pratique.
- 36) Lime-treated soil construction manual lime stabilization et lime modification Published by National lime association January; 2010.
- 37) SFEASIBILITY STUDY Karin Axels son Sven-Erik Johansson Ronny Anderson (English Translation July (2002). « Stabilization of Organic Soils by Cement and Puzzolanic Reactions »
- 38) SMAIDA et Al; (2008) « Stabilisation des argiles gonflantes : Effet de l'association chaux+ciment sur les propriétés physico-mécaniques ».
- 39) ABRIAK. N « Etude d'une grave routière à base de sable de dragage ». 2ième Symposium International sur les Sédiments Contaminés.
- 40) [www.cours-genie-civil.com](http://www.cours-genie-civil.com)
- 41) [www.LCTP.fr](http://www.LCTP.fr)
- 42) [www.CEBTP.fr](http://www.CEBTP.fr)

# Annexes

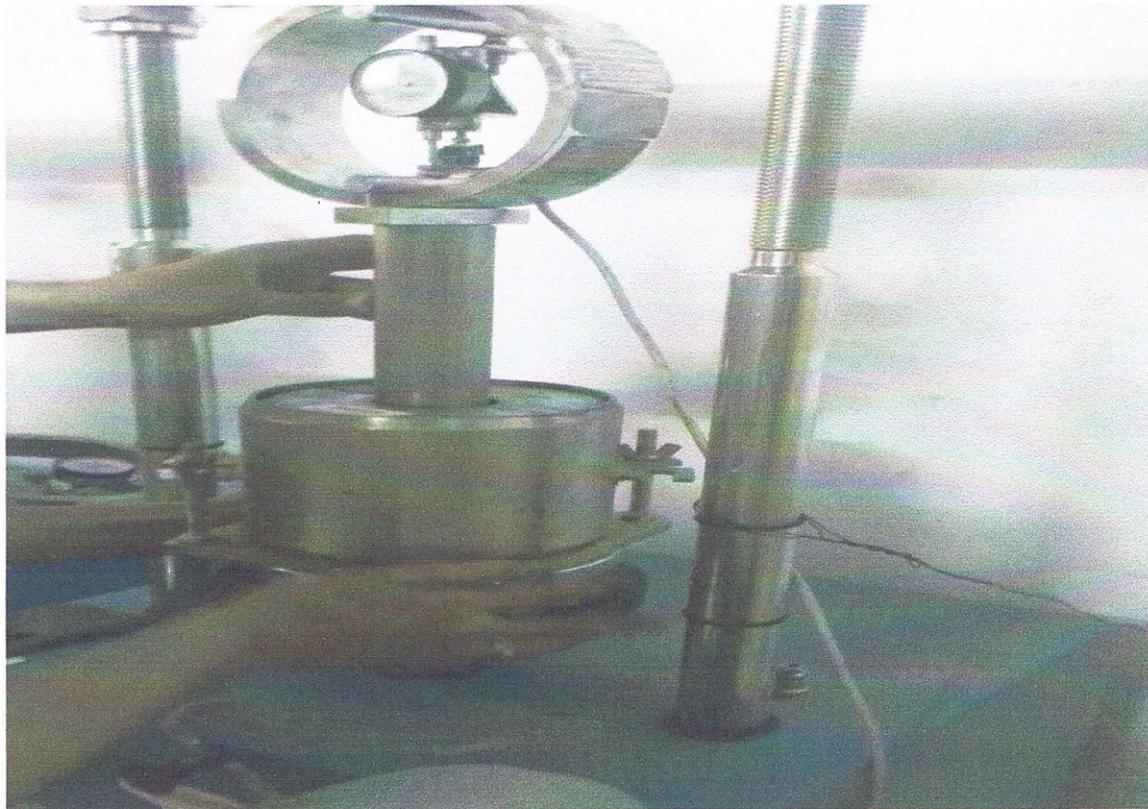
**ANNEXE01 : Essais de l'analyse granulométriques**



**ANNEXE 02 :Essais de Proctor modifié**



**ANNEXE03 :Essai CBR immédiat**



**ANNEXE 04: Essai CBR immersion**



**ANNEXE 05 :RESISTANCE AU CISAILLEMENT**

