

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ETDE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMARI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Laboratoire de Recherche en Géo-matériaux, Environnement et Aménagement  
(LGEA)



MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE  
Spécialité : Génie civil  
Option : Géotechnique et environnement

# Thème

*Etude du comportement d'un mélange de  
(marne + verre) pour une valorisation  
dans la construction routière*

*Présenté par :*  
*M<sup>elle</sup> KEDDAM ADIDI*

Devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> KHATTAOUI Mohammed	Professeur à l'UMMTO	Président.
M <sup>r</sup> DEHMOUS Hocine	Maitre de conférences B à l'UMMTO	Examineur.
M <sup>r</sup> BOUDLAL Omar	Maitre de conférences B à l'UMMTO	Promoteur.

Anne : 2014/2015

## ***REMERCIEMENTS***

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à DIEU le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail dans les meilleures conditions.

La première personne que je tiens à remercier est mon promoteur M<sup>r</sup> BOUDLAL Omar, Maitre de conférences B, pour l'intérêt constant qu'il a porté à ce travail pour son assistance continue pendant la réalisation des essais menu au l'laboratoire. Pour sa documentation utile pour ce travail de recherche. Pour son aide afin de résoudre les récentes au cours de la réalisation des essais et pour avoir pris le temps de répondre à toutes mes questions et avoir corrigé mon travail.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mr KHATTAOUI Mohammed, Professeur à l'UMMTO, qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens également à remercier Mr DEHMOUS Hocine Maitre de conférences B à l'UMMTO, pour avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens aussi à remercier M<sup>r</sup> BOUKHERROUB Med Ameziane, ingénieur du laboratoire de mécanique des sols du département de Génie Civil, pour son aide et son assistance pendant la réalisation des essais, et pour tout le soutien moral qu'il m'a donné au cours de la réalisation de ce travail. Pour sa présence et sa disponibilité pendant la réalisation des essais.

Je tiens à remercier chaleureusement tous les enseignants de la faculté du génie civil, qui nous ont enrichis de connaissances et de savoir.

Merci à tous et à toutes.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

*Mes très chers parents, en toute gratitude et reconnaissance Pour tous leurs sacrifices et leur soutien moral et financier ;*

*Mon adorable frères Chaban ;*

*Mes chères sœurs qui m'ont soutenu et apporté du courage tout au long de mes études a tout mes amis(es) et toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Adidi*

## Sommaire

Liste des principales notations et indices .....	i
liste des figures .....	ii
liste des tableaux .....	iii
conclusion générale .....	iv
référence bibliographique.....	v
introduction générale .....	1
<b>Chapitre I :Généralites sur les chaussées :</b>	
I-1-Introduction .....	4
I-2-Définition .....	4
I-3-Historique de la technique routière .....	4
I-4-L 'évolution des chaussées .....	5
I-5-Le rôle d'une chaussée .....	5
I-6- Les éléments géométriques d'une chaussée .....	5
I-7-Constitution d'une structure de chaussée .....	6
I-7-1-La plate forme support .....	6
I-7-2-Les couches d'assise.....	7
I-7-3-La couche de surface .....	7
I-8-Les Types de chaussées .....	7
I-8-1-Les chaussées souples .....	7
I-8-2-Les chaussées semi-rigides.....	8
I-8-3-Les chaussées rigides .....	8
I-9-Comment fonctionnent les chaussées? .....	8

I-9-1-les chaussées souples.....	8
I-9-2-Les chaussées semi rigides .....	8
I-10-Pourquoi les chaussées se dégradent ? .....	8
I-10-1-Le trafic .....	9
I-10-2-Les conditions climatiques .....	9
I-10-3-Les mal façons.....	10
I-11-Types de dégradations des chaussées .....	10
I-11-1-Les déformations .....	10
I-11-2-Les fissures.....	11
I-11-3-les arrachements .....	11
I-11-4-Les remontées.....	12
I-12-Quelques solutions.....	13
I-13-Conclusion .....	14

## **Chapitre II : le recyclage et matériaux recyclés**

II-1-Introduction .....	16
II-2-Généralités sur le recyclage.....	16
II-2-1-Définition du recyclage.....	16
II-2-2-Les avantages du recyclage.....	16
II-2-3-Différents types du recyclage.....	16
II-2-4-Différents cycles du recyclage .....	16
II-2-5-Les cycles de vie des déchets.....	17
II-2-6-Quel matériau respecte l'environnement ? .....	17
II-3-Généralités sur le verre.....	17
II-3-1-L' historique du verre.....	18

---

II-3-2-Définition du verre .....	18
II-3-3-Matières premières du verre.....	18
II-3-4-Comment fabrique-t-on le verre ?.....	18
II-3-5-L'obtention du verre de différentes couleurs.....	18
II-3-6-Comment se recycle le verre ?.....	19
II-3-7-Les avantages du recyclage du verre .....	20
II-3-7-1-D'un point de vue écologique .....	21
II-3-7-2-D'un point de vue économique .....	21
II-3-8-Le verre dans la structure des chaussées.....	22
II-3-8-1-L'analyse chimique du verre .....	22
II-3-8-2-Les utilisations du verre dans la construction.....	22
II-4-généralités sur les marnes.....	22
II-4-1-Introduction sur le sol .....	24
II-4-2-Les roches sédimentaires .....	24
II-4-3-La formation des roches sédimentaires.....	25
II-4-3-1-La mobilisation.....	25
II-4-3-2-Le transport et le dépôt .....	25
II-4-3-3-La diagenèse .....	25
II-4-4-Classification des roches sédimentaires.....	26
II-4-4-1-Les évaporites .....	26
II-4-4-2-Les terrigènes.....	26
II-4-4-3-Les roches carbonatées .....	26
II-4-5-L'origine et définition des marnes .....	27
II-4-6-Quelques types de marne.....	28
II-4-7-la composition chimique des marnes .....	29

II-4-8-le comportement des marnes.....	29
II-4-8-1-Le phénomène de retrait .....	29
II-4-8-2-Le phénomène du gel dégel.....	30
II-5-conclusion .....	31
<b>Chapitre III : identification des matériaux</b>	
III-1-Introduction.....	33
III-2-Les matériaux à identifiés .....	33
III-2-1-La marne .....	33
III-2-1-1-Etude géologique.....	33
III-2-1-2-Analyse chimique de la marne .....	33
III-2-1-3-Analyse granulométrique de la marne.....	34
III-2-2-Le verre.....	37
III-2-2-1-Définition du verre .....	37
III-2-2-2-l'analyse chimique du verre .....	37
III-2-2-3-L'analyse granulométrique du verre .....	38
III-3-Les essais d'identification.....	39
III-3-1-La teneur en eau.....	39
III-3-2-Les limites d'atterberg .....	40
III-3-2-1-Généralités sur les limites d'atterberg.....	40
III-3-2-2-Les différents états du sol .....	40
III-3-2-3-Détermination des limites d'atterberg .....	41
III-3-3-La limite de liquidité.....	42
III-3-3-1-Le matériel utilisé.....	42
III-3-3-2-Présentation des résultats .....	43
III-3-4-La limite de plasticité .....	43

III-3-4-1-L'exécution de l'essai.....	43
III-3-4-2-Présentation des résultats .....	44
III-3-5-L'indice de plasticité .....	44
III-3-6-L'indice de consistance .....	45
III-3-7-Interprétation des résultats.....	46
III-4-Conclusion .....	47
<b>Chapitre IV : essai de compactage (Proctor modifié)</b>	
IV-1-Introduction .....	49
IV-2-Généralités sur le compactage .....	50
IV-2-1-Définition du compactage .....	50
IV-2-2- Le compactage selon la structure du sol.....	50
IV-2-3-Le principe de compactage.....	51
IV-2-4-Les conséquences du compactage .....	52
IV-2-5-Les paramètres influençant sur le compactage.....	54
IV-2-5-1-L'influence de la teneur en eau .....	54
IV-2-5-2-L'influence de la granulométrie .....	54
IV-2-5-3-L'influence de l'énergie de compactage .....	55
IV-2-6-Les effets du compactage sur les propriétés des sols .....	55
IV-2-7-les essais du compactage .....	57
IV-2-7-1-L'essai à la table vibrante.....	57
IV-2-7-2-l'essais Proctor (normale et modifié).....	57
IV-2-7-3-comparaison entre les essais Proctor.....	57
IV-2-8-L'essai Proctor modifié .....	59
IV-2-8-1-But de l'essai .....	59
IV-2-8-2-Le mode opératoire .....	59

IV-2-8-3-Exécution de l'essai .....	59
IV-2-8-4-Expression des résultats .....	60
IV-2-8-5-Présentation et interprétation des résultats.....	60
IV-3-Conclusion .....	65
<b>Chapitre V : essai de portance CBR (<math>CBR_{imm}</math> ; IPI)</b>	
V-1-Introduction.....	67
V-2-But de l'essai de portance CBR .....	67
V-3-Principe de l'essai de portance CBR.....	68
V-4-Le mode opératoire de l'essai de portance CBR.....	68
V-4-1-L'appareillage de l'essai de portance CBR .....	68
V-4-1-1-Le matériel de confection .....	68
V-4-1-2-Le matériel de poinçonnement .....	69
V-4-2-Le déroulement de l'essai .....	69
V-4-2-1-Confection des éprouvettes .....	69
V-4-2-2-Exécution du poinçonnement .....	70
V-4-2-3-Détermination de l'indice portant immédiat IPI.....	70
V-4-2-4-Présentation et interprétation des résultats .....	71
V-4-2-5-Détermination de l'indice CBR immersion.....	75
V-4-2-5-1-L'immersion et le but d'imbibition.....	75
V-4-2-5-2-Présentation et interprétation des résultats .....	76
V-5-Conclusion .....	82
<b>Chapitre VI : résistance au cisaillement des matériaux étudiés</b>	
VI-1-Introduction .....	84
VI-2-Définition et but de l'essai.....	84
VI-3-Différents types de l'essai.....	85

---

VI-4-Principe de l'essai .....	85
VI-5-Appareillage de l'essai.....	86
VI-6-Les avantages de l'essai.....	88
VI-7-Les inconvénients de l'essai .....	88
VI-8-Le déroulement de l'essai .....	89
VI-9-Expression des résultats .....	90
VI-10-Présentation des résultats.....	91
VI-10-1-Les courbes contraintes déformations .....	91
VI-10-2-Les courbes de variation de volume .....	92
VI-10-3-Les courbes intrinsèques .....	93
VI-10-4-Les caractéristiques mécaniques .....	94
VI-10-5-les courbes contraintes déformations selon la charge .....	95
VI-11-Interprétation des résultats.....	96
VI-12-Conclusion .....	96

## Liste des principales notations et indices

$\Delta h$  : la variation de hauteur mesurée (mm) ;

$\Delta h$  : déplacement horizontale (mm) ;

$\Delta v$  : déplacement vertical (mm) ;

W : Teneur en eau naturelle (%) ;

$W_L$  : la limite de liquidité (%) ;

$W_p$  : la limite de plasticité (%) ;

$W_r$  : la limite de retrait (%) ;

$W_{opt}$  : la teneur en eau de l'optimum proctor (%)

V : volume du moule CBR( $\text{cm}^3$ ) ;

$M_h$  : Masse humide (g) ;

$M_s$  : Masse des grains solides (g) ;

Cu : Le coefficient d'uniformité ;

Cc : Le coefficient de courbure ;

IPI : l'indice Portant immédiat(%) ;

H : hauteur initiale de l'éprouvette (mm) ;

G : Gonflement linière relatif (%) ;

$CBR_{imm}$  : l'indice CBR après immersion(%) ;

$\varphi$  : angle de frottement interne( $^\circ$ ) ;

C : cohésion(Kpa) ;

$\tau$  : La contrainte tangentielle(Kpa) ;

$\sigma$  : la contrainte normale appliquée(Kpa) ;

$\gamma_d$  : masse volumique seche de l'échantillon ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) ;

$L_a$  :force de cisaillement (dan) ;

$K$  :coefficient de la machine de cisaillement (sans dimension) ;

$S_C$  :la section courigée de la boite de cisaillement ( $\text{mm}^2$ ) ;

$L$  :longeur de la boite de cisaillement (mm) ;

$I_p$  :indice de plasticité (%) ;

$I_C$  :indice de consistance (sans dimension) ;

$G$  : la valeur de gonflement linéaire relatif (%) ;

$H$  :la hauteur initiale de l'éprouvette avant mise en eau(cm) ;

$IPI$  :l'indice portant immédiat mesuré à la teneur en eau de confection ;

$\gamma_{d_{opt}}$  : masse volumique seche de l'optimum proctor ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

## Liste des figures :

Figure I-1-l'historique de la technique routière .....	4
Figure I-2-les éléments géométriques d'une route .....	6
Figure I-3-constitution d'une structure de chaussée .....	7
Figure I-3-la dégradation des chaussées .....	13
Figure II-1-les différentes phases de fabrication du verre .....	19
Figure II-2-le verre de différentes couleurs .....	20
Figure II-3-les étapes de collection du verre .....	21
Figure II-2-les désordres dus au retrait – gonflement des sols .....	30
Figure II-3-les désordres dus au phénomène de gel - dégl.....	31
Figure III-1-matériel d'analyse granulométrique .....	34
Figure III-2-le schéma de la manipulation du tamisage.....	35
Figure III-3-la courbe granulométrique du marne .....	36
Figure III-4-les débris du verre .....	37
Figure III-5- la courbe granulométrique du verre .....	38
Figure III-6-les différents états d'un sol.....	41
Figure III-7-les limites d'atterberg .....	41
Figure III-8-l'appareil de casagrande.....	42
Figure III-9-la courbe de casagrande .....	43
Figure III-10-la détermination de la limite de plasticité $W_p$ .....	43
Figure III-10-les seuils d'argilosité d'un sol selon (GTR 1992) .....	45
Figure IV-1-les objectifs de compactage .....	49
Figure IV-2-image schématique du compactage.....	51
Figure IV-3-influence de l' eau sur le compactage .....	54
Figure V-4- influence de la granulométrie sur l'optimum.....	55

Figure IV-4-influence de l'énergie sur l'optimum proctor .....	55
Figure IV-6-comparaison entre les essais proctor .....	58
Figure IV-7-choix du type de moule proctor .....	58
Figure IV-8-les courbes proctor modifie .....	62
Figure IV-9-les valeurs des densités seches optimales .....	63
Figure IV-10-les valeurs des teneurs en eau optimales .....	64
Figure V-1-le matériel de confection.....	69
Figure V-2-le matériel de poinçonnement .....	69
Figure V-3-le confection des éprouvettes.....	69
Figure V-4-l'exécution et le résultat de poinçonnement .....	70
Figure V-5-les courbes de l'essai CBR pour les différents mélanges.....	74
Figure V-6-les indices portant immediat (IPI) pour les différents mélanges .....	74
Figure V-7-l'exécution de poinçonnement et de l'emersion .....	76
Figure V-8-les courbes CBR <sub>imm</sub> pour les différents mélanges .....	79
Figure V-9-les valeurs des indices CBR <sub>imm</sub> pour les différents mélanges.....	80
Figure V-10-les valeurs de gonflement linéaire pour les différents mélanges .....	81
Figure V-11-les valeurs des teneurs en eau pour les différents pourcentages .....	81
Figure VI-1-courbes des contraintes –déformations (lcpc,1987).....	84
Figure VI-2-courbes intrinsèques pour le sol(cohérent,pulvérulent) .....	85
Figure VI-3-illustration du principe de cisaillement .....	86
Figure VI-4-la boîte de cisaillemen .....	87
Figure VI-5-l'appareillage complet de l'essai de cisaillement .....	88
Figure VI-6-le matériau après cisaillement .....	90
Figure VI-7- les courbes contraintes déformations selon la charge appliquée .....	91
Figure VI-8- courbes de la déformation verticale en fonction de la déformation horizontale .....	92

Figure VI-9- les courbes intrinseques .....	93
Figure VI-10 les valeurs de la cohésion pour les défférents mélanges .....	94
Figure VI-10 les valeurs de l'angle de frottement interne pour les défférents mélanges .....	94
Figure VI-13-comparaison des courbes contraintes déformation .....	95

## Liste des tableaux :

Tableau II-1-l'obtention du verre de différentes couleurs.....	19
Tableau II-2-l'analyse chimique du verre utilisé dans la construction de chaussées .....	22
Tableau II-3-les différentes utilisations du verre dans le domaine de la construction.....	23
Tableau II-4-la classification des roches tertiaires.....	26
Tableau II-5-le nom de la roche selon le pourcentage de CaCO <sub>3</sub> .....	27
Tableau III-1-résultat de l'analyse chimique de la marne.....	33
Tableau III-2-la granulométrie de la marne .....	35
Tableau III-3- l'analyse chimique du verre utilisé dans la construction .....	37
Tableau III-4-la granulométrie du verre .....	38
Tableau III-5-résultats de l'essai de détermination de la teneur en eau .....	39
Tableau III-6-résultat de l'essai de détermination de limite de liquidité W <sub>L</sub> .....	42
Tableau III-7-détermination de limite de plasticité W <sub>P</sub> .....	44
Tableau III-8-degré de plasticité des sols selon Atterberg .....	44
Tableau III-9-plage de consistance des sols .....	46
Tableau III-10-les résultats des essais d'identification.....	46
Tableau IV-1-les conditions des essais proctor (normale ;modifié).....	57
Tableau IV-2-résultats de l'essai proctor (marne + 0 % du verre) .....	61
Tableau IV-3-résultats de l'essai proctor (marne + 10 % du verre) .....	61
Tableau IV-4-résultats de l'essai proctor (marne + 20 % du verre) .....	61
Tableau IV-5-résultats de l'essai proctor (marne + 30 % du verre) .....	61
Tableau IV-6-résultats de l'essai proctor (marne + 40 % du verre) .....	61
Tableau IV-7-les valeurs des optimums.....	63
Tableau V-1-les résultats de l'essai CBR (marne +0% du verre ) .....	71
Tableau V-2-les résultats de l'essai CBR (marne +10% du verre ) .....	71

Tableau V-3-les résultats de l'essai CBR (marne +20% du verre ) .....	71
Tableau V-4-les résultats de l'essai CBR (marne +30% du verre ) .....	72
Tableau V-5-les résultats de l'essai CBR (marne +40% du verre ) .....	72
Tableau V-6-les résultats de l'essai CBR immersion pour (marne +0% du verre) .....	76
Tableau V-7-les résultats de l'essai CBR immersion pour (marne+10% du verre ) .....	76
Tableau V-8-les résultats de l'essai CBR immersion pour (marne+20% du verre) .....	77
Tableau V-9-les résultats de l'essai CBR immersion pour (marne +30% du verre ) .....	77
Tableau V-10-les résultats de l'essai CBR immersion pour (marne +40% du verre ) .....	77
Tableau V-12-les résultats des essais de portance .....	80
Tableau VI-11-les valeurs de la cohésion pour les différents mélanges .....	94

## **INTRODUCTION GENERALE**

Pour limiter l'extraction abusive des matériaux naturels classiques (sable et gravier), très utilisés dans de vastes programmes de construction, l'exploitation et la valorisation des autres matériaux naturels (schiste, marne, ...) ou recyclés (plastique, débris de béton, débris de verre, ...) est aujourd'hui considérée comme solution d'avenir et montre plusieurs avantages :

- Diversifier les sources de granulats afin de compenser le manque de matériaux dont souffrent certaines régions et répondre au déficit entre production et consommation.
- Limiter l'exploitation des gisements alluvionnaires et préserver l'environnement.
- Économie d'extraction, puisqu'ils s'agissent de matériaux qui affleurent généralement la surface.
- Limiter les décharges de déchets inertes et libérer les espaces occupés, pour d'autres utilisations.
- Développer la filière du recyclage et diversifier ses applications.

Dans ce travail, nous avons fixé pour objectifs de mettre en évidence, la possibilité d'exploiter et de valoriser les granulats de marne et de verre dans la construction routière (couches de fondation et couches de base). Ceci est fait à base de mélanges à différentes proportions de marne et de verre. Ces derniers sont d'abord identifiés au laboratoire, ensuite, soumis aux principaux essais routiers, à savoir, les essais Proctor, les essais CBR et les essais de cisaillement direct à la boîte.

Le verre est un matériau très abondant dans les décharges du fait qu'il est fragile est engendre beaucoup de résidus, mais avec une durée de vie supérieure à 4000 ans. Il développe des frottements internes très importants, avec des cohésions pratiquement nulles, il est ainsi non influencé par la présence d'eau. La marne par contre, est un matériau très sensible à l'eau (matériau évolutif). Elle ne développe pratiquement pas de frottement, mais des fortes cohésions. Cependant, elle fait partie des matériaux les plus abondants en Algérie et particulièrement dans la Grande Kabylie.

La combinaison de ces deux matériaux (marne et verre), peut formuler un nouveau matériau de meilleures caractéristiques, pouvant répondre aux normes routières du moins dans le cas des chaussées de faible à moyen trafic.

Pour présenter ce travail, nous avons scindé ce mémoire en six chapitres, synthétisés par des conclusions et quelques perspectives.

Le chapitre I est consacré à la présentation des généralités sur les chaussées, Il comporte principalement, les définitions des différentes couches constituant une chaussée, les différents types de chaussées, leur dimensionnement, les dégradations des chaussées et quelques solutions.

Dans le chapitre II, sont définit essentiellement le recyclage et les différents matériaux recyclés. Sont présentés essentiellement le recyclage du verre (les travaux réalisés sur le recyclage de verre et les domaines d'utilisation) ; ainsi que la réutilisation de la marne argileuse.

Le chapitre III, entame la partie expérimentale de ce travail. Il est consacré aux différents essais d'identification sur les matériaux utilisés (marne argileuse et débris de verre), afin de déterminer leurs caractéristiques physiques. Une interprétation des résultats des essais est également donnée dans ce chapitre.

Le chapitre IV comporte les essais de compactage (Proctor modifié). Cet essai permet d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage, les résultats d'essais et les différentes comparaisons sous forme de tableaux et de courbes avec les interprétations correspondantes obtenus ont permis de montrer l'évolution de la densité sèche optimale sous différentes classes granulaires.

Dans le chapitre V, sont présentés les essais de portance Californien (IPIet CBR après immersion), ces essais permettent d'évaluer la portance du sol sous la circulation des engins et sous les plus mauvaises conditions hygrométriques.

Le chapitre VI, comporte les essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Ce type d'essais permet d'étudier la résistance au cisaillement des différents mélanges et de déterminer les caractéristiques mécaniques  $c$  et  $\phi$ .

Ce mémoire se termine par une conclusion générale, permettant de synthétiser les principaux résultats obtenus et d'envisager quelques perspectives.

**CHAPITRE I**

**GENERALITES SUR LES**

**CHAUSSEES**

## I-1-introduction

De nombreuses civilisations aux visées expansionnistes, ont appuyé leur développement sur une maîtrise de la communication en général et des infrastructures routières en particulier.

À la fin du 16ème siècle, apparaît en France, la première trace de l'organisation des infrastructures routières nationales. Il a fallu attendre le 17ème siècle, pour la création de celle qu'on peut qualifier d'institution nationale, qui est l'administration des Ponts et Chaussées, qui ont pu concrétiser la construction des chaussées modernes.

## I -2-définition

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

## I-3-historique de la technique routière

- l'époque romaine : première route pavée ;
- 1775 : premiers principes de construction de chaussée empierrée (chaussée en hérisson) ;
- 1905/1925 : industrialisation et spécification de la technique enduit superficiel ;
- 1920/1925 : début des revêtements agglomérés au bitume ;
- 1920/1930 : Première utilisation de grave naturelle ;
- 1935/1945 : réalisation des premières chaussées en béton de ciment ;
- 1950/1970 : première utilisation de grave ciment, grave bitume, béton Bitumineux ;

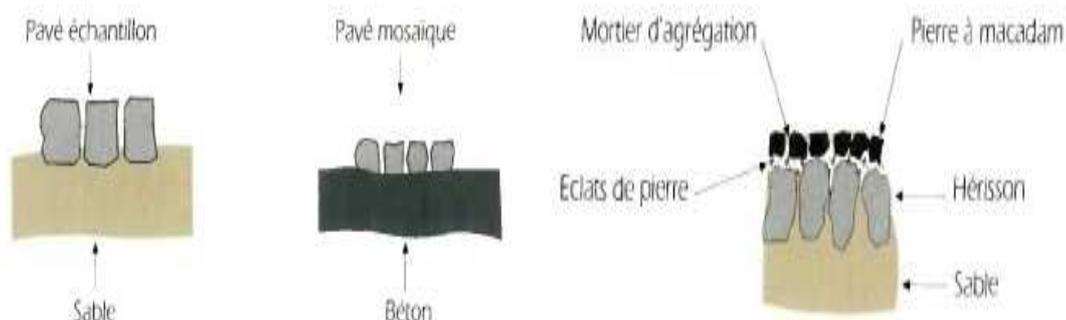


Figure I.1: historique de la technique routière (Routes pavés et chaussée en hérisson)

### **I-4-1 'évolution des chaussées**

L'évolution des chaussées est liée aux besoins de déplacement de l'homme dont nous pouvons citer : (P. Bordes et autre ,1996)

- Terrain naturel : pour les déplacements à pied et occasionnels obligatoires peu ou pas répétitifs ;
- Sentier : pour le déplacement à pied répétitifs et réguliers
- Piste et chaussée romaine : pour des passages fréquents, en convois à pied ou accompagnés de véhicules (apparition de la roue) ;
- Piste revêtue : pour des passages fréquents de véhicules à vitesse relativement élevée (apparition de véhicule à moteur) ;
- Chaussée souple revêtue : pour des passages fréquents de véhicules à moteur à vitesse élevée et à charge par essieu relativement faible ;
- Chaussée à structures traitées : pour des trafics importants de véhicules légers mais surtout de poids lourd devant circuler en toutes saisons et tous lieux et en sécurité ;

### **I-5-le rôle d'une chaussée**

La chaussée permet la circulation tout en assurant la sécurité et le confort des usagers ; dont il est nécessaire de trouver une structure capable de supporter et de transmettre au sol les sollicitations s'exerçant sur les chaussées (P. Bordes et autre ,1996).

### **I-6-les éléments géométriques**

La chaussée est placée sur un terrain d'où on peut citer les éléments géométriques d'une route (LCPC ,1994) :

L'emprise:est la surface de terrain appartenant à la collectivité dans les limites du domaine public ;

L'assiette : est la surface du terrain réellement construite pour créer la route c'est à dire dans les limites des terrassements. Comprenant la plate-forme, les fosses et les talus

La plate forme : Est la surface entre fossés ou crêtes des talus en remblai; comprend (la chaussée, les accotements)

La chaussée : est la partie de la route affectée à la circulation des véhicules

Les accotements : Zone s'étendant de la limite de chaussée à la limite de Plate-forme Ils peuvent comprendre :

- une bande dérasée constituée d'une sur largeur de chaussée supportant le Marquage de rive et d'une partie stabilisée ou revêtue ;
- une berme engazonnée jusqu'à la limite de plate-forme

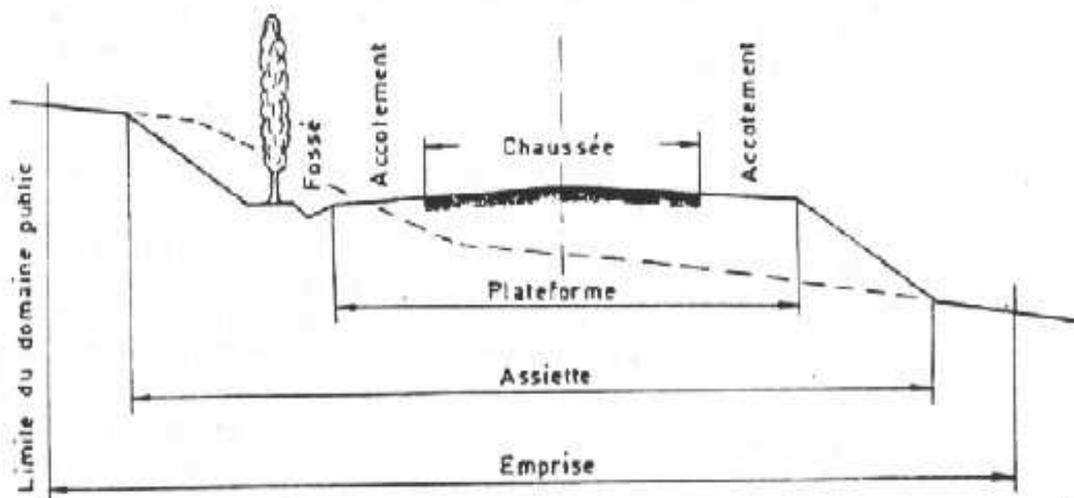


Figure I.2 : les éléments géométriques d'une chaussée

### I-7- Constitution d'une structure de chaussée

La chaussée a une structure multicouche ; constituée de trois parties qui ont chacune un rôle bien défini : (kali .F .z ; 2009)

#### I-7-1- la plate forme support

L'ensemble sol support et couche de forme représente la plate forme support de la chaussée, d'où la couche de forme a une double fonction :

- pendant les travaux, elle assure la protection du sol support,
- en service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai ;

### I-7- 2- les couches d'assise

Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise, qui apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible ;

### I-7-3- la couche de surface

Enfin, la couche de surface se compose de : la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise, elle a deux fonctions d'une part, elle assure la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau. d'autre part, elle confère aux usagers un confort de conduite d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques de surface sont bonnes.

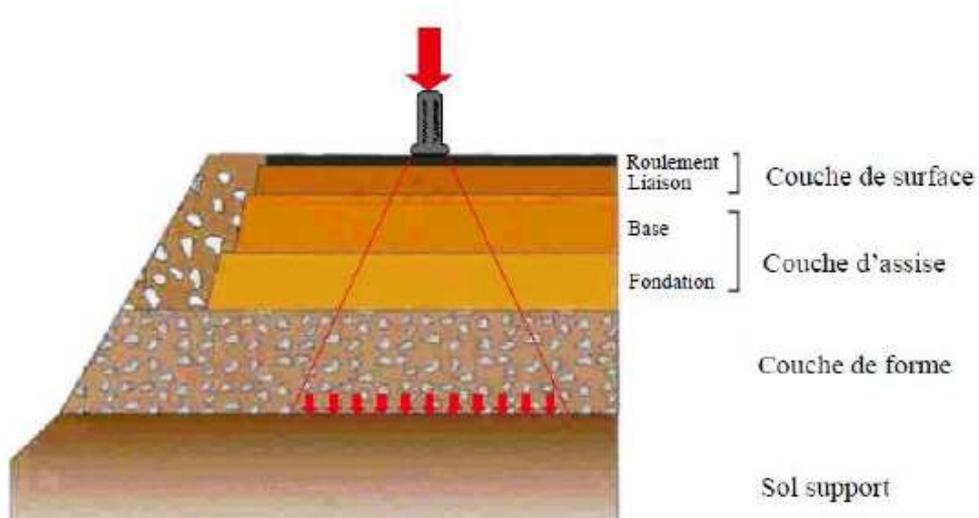


Figure I.3 : Constitution d'une structure de chaussée

### I-8-Types de chaussées

Selon la nature des matériaux utilisés et la répartition des charges sur le sol, on a trois types de chaussées :

#### I-8-1-Les chaussées souples

Elles acceptent plus facilement les déformations du support et conviennent à des routes peu fréquentées par des poids-lourds ; dont les matériaux d'assise ne sont pas traités par un liant ;

### **I-8-2-Les chaussées semi-rigides**

Ces chaussées conviennent à des trafics plus conséquents. par leur nature et leur épaisseur, elles se déforment moins que les chaussées souples ; dont les matériaux D'assise sont traités avec un liant hydraulique (ciment, laitier, cendre Volante) ou un liant hydrocarboné (émulsion de bitume) ;

### **I-8-3-Les chaussées rigides**

Ces chaussées sont réalisées en béton de ciment, ce type de chaussée à un Comportement très rigide ;

## **I-9-Comment fonctionnent les chaussées ?**

### **I-9-1-les chaussées souples à assise non traitée**

Au passage d'une charge lourde elles se déforment verticalement de l'ordre de 1 mm à 3 mm les mesures de déflexion réalisées avec l'essieu de 13T mettent En évidence ce phénomène et le sol support se déforme également ;

Après le passage de la charge, sol et chaussée retrouvent leur position initiale si La structure est adaptée. C'est le comportement d'une plaque de caoutchouc Posée sur matelas souple ; Mais si la charge est trop lourde ou trop souvent Répétée, le sol va se déformer sans reprendre sa position initiale entraînant une Dégradation rapide de la chaussée

### **I-9-2- les chaussées semi-rigides à assise traitée**

Au passage d'une charge lourde elles se déforment verticalement de l'ordre de 0 mm à 0.5 mm .la charge sur le sol est mieux répartie et les effets sont plus Limités. C'est le comportement d'une plaque de verre posée sur un matelas Souple. Si la charge est trop lourde et si la structure de chaussée est insuffisante La déformation devient trop grande elle peut entraîner la destruction de la Chaussée par cassure (fissuration) ; La chaussée semi-rigide est adaptée aux Routes très circulées par les poids lourdes.

## **I-10-Pourquoi les chaussées se dégradent ?**

Les causes de dégradations des chaussées sont plusieurs ; on peut les classer en trois

Catégories selon leur origine comme suit : (P. Bordes et autre ,1996)

**I-10-1-le trafic**

-Au passage d'un véhicule la chaussée accuse une petite fatigue ; de ce point de vue les poids lourds sont particulièrement agressifs ; le passage D'un essieu de 13 tonnes a Autant d'effet sur la structure de la chaussée que Celui d'un million De véhicules de Tourisme .la répétition des charges Entraînent une fatigue Générale de la chaussée qui Présente alors des dégradations ;

-Les frottements des pneumatiques en mouvement sur la couche de Roulement Conduit Également par usure à son vieillissement.

-Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées de Giratoire Peuvent donner lieu à des dégradations de la chaussée

**I-10-2-les conditions climatiques**

Les variations de température et dans une moindre mesure l'action de soleil accélèrent le vieillissement des bitumes, et celui des chaussées ; De même L'eau superficielle (pluie) ou interne (source) associée au problème du gel Entraîne de nombreux désordres

✓ L'eau superficielle et interne

A rares exceptions près, tous les sols sont sensibles à l'eau : c'est -à-dire que leur portance diminue lorsqu' ils sont humides ; dont On peut conclure que L'eau peut atteindre le sol (la chaussée) par :

-par-dessus (infiltration de la pluie au travers de la chaussée) ;

-par les côtés (infiltration par les accotements ou les fossés) ;

-par le dessous (nappe phréatiques, sources).

C'est pourquoi il faut bien imperméabiliser la chaussée pour que l'eau ne puisse y entrer ; traiter les accotements pour permettre l'évacuation rapide des eaux de surface (dérasement d'accotement, curage de saignées) ; Abaisser le niveau de l'eau dans sol (curage de fossés, Drais etc.).

### ✓ Le gel –dégel

Lorsqu'il gèle en profondeur, l'eau du sol se transforme en glace en provoquant une aspiration vers le haut de l'eau des couches inférieures ;

En période de gel, la quantité d'eau sous forme de glace augmente donc dans la chaussée et dans le sol support ; de plus, l'expansion de la glace fait gonfler la chaussée ;

Au dégel, cet excès d'eau fait chuter considérablement la portance du sol support et la chaussée devient particulièrement fragile .pendant la période nécessaire à l'évacuation de ce surplus d'eau, la pose de barrières de dégel est indispensable pour limiter la circulation des véhicules lourds.

### **I-10-3-les malfaçons**

Les malfaçons d'origine diverses lors de la construction ou de l'entretien (mauvais matériaux, épaisseurs insuffisantes, etc.) ; Des dégradations ponctuelles peuvent être causées suite à des accidents de circulation ou des utilisations anormales du domaine public.

### **I-11-types de dégradations des chaussées**

Au passage d'une charge roulante, une chaussée subit des efforts normaux et transversaux qui conduisent à divers types de dégradation que on peut les classer en quatre familles ;

(Bordes-P et autre ,1996)

#### **I-11-1-les déformations**

##### **1-Affaissement de rives**

C'est le Tassement de la chaussée en rive formant parfois une cuvette Accompagnée sur le bord de la chaussée d'un bourrelet de matériaux ; Du à la Fatigue de la chaussée dû à une épaisseur ou une qualité des Matériaux ou calage en rive insuffisants. Dégradation souvent aggravée par la Présence d'eau en rive qui reste piégée dans la cuvette.

##### **2-Flache**

C'est un tassement en pleine chaussée, souvent de forme arrondie ; pour les chaussées souples fatigue due à un défaut de portance localisé du Sol (poche d'argile humide) et Pour les chaussées traitées à la liante hydraulique mauvaise qualité localisée des matériaux de l'assise.

### **3- Orniérage**

Tassement en pleine chaussée sous le passage des roues des véhicules, soit fatigue de la chaussée par tassement des couches inférieures due à un défaut de portance du sol. (Orniérage grand rayon) Soit mauvaise stabilité d'un Enrobé mou dans les fortes pentes ou rampes ou dans les zones de freinage, (Orniérage petit rayon).

#### **I-10-2-les fissures**

##### **1-Fissures longitudinales**

Cassures de la couche de surface, parallèle à l'axe de la chaussée. Il existe plusieurs causes possibles ; la fatigue de la chaussée due à une structure insuffisante vis-à-vis du trafic, ou d'une portance insuffisante du sol, retrait du sol argileux à la suite d'une longue période de sécheresse, défauts de construction par exemple : élargissement, ou joints défectueux d'enrobé, ou mouvements du sol (tassement, glissement).

##### **2-Fissures transversales**

Cassures de la couche de surface, perpendiculaires à l'axe de la chaussée. Il existe plusieurs causes possibles : Retrait dû à la prise de l'assise traitée aux liants hydrauliques (ciment, laitier,...) ; sous l'effet des variations de température, la fissure remonte au travers de la couche de surface dont l'ouverture varie selon la saison ; elle s'accroît davantage en hiver, ou bien défaut de construction d'un joint de reprise de tapis d'enrobés.

##### **3-Faiénçage**

Ensemble de fissures plus ou moins rapprochées formant un maillage. à causes De la Fatigue de la couche de roulement ou de la totalité de la chaussée, qu'est due À une Structure insuffisante vis-à-vis du trafic supporté ou à une portance Insuffisante du sol.

#### **I-10-3-Les arrachements**

##### **1-Nid de poule**

Trou apparaissant à la surface de la chaussée causé par la désagrégation et départ de matériaux dus à une mauvaise qualité de la chaussée, à une pollution par remontée d'argile dans le corps de la chaussée, à une forte perméabilité de la couche de roulement.

## 2-Pelade

Etat d'un enduit présentant des manques par plaques.

- Pour les enrobés : trop faible épaisseur de la couche de roulement (1 à 2 cm) avec collage défectueux (absence ou insuffisance de la couche d'accrochage) qui, sous l'action des efforts horizontaux dus au trafic, se décolle du support.
- Pour les enduits : mauvais collage au support, arrachements provoqués par le ressuage. Surdosage de gravillons en première grille dans le cas d'enduit surper-ficiel prégravillonné.

## 3-Plumage

Etat d'un enduit dont la mosaïque est rendue non jointif par départ de granulats. Sous dosage en liant d'un enduit superficiel ; mise en œuvre dans des conditions atmosphériques défavorables : température trop basse, pluie... ; utilisation de gravillons sales ; compactage insuffisant ; répandage de liant inadapté ; remise trop rapide sous circulation. Cette dégradation se rencontre souvent dans les zones humides ou ombragées. (Surdosage en liant nécessaire).

### I-10-4-les remontées

On trouve le ressuage qu'est un Surdosage de bitume sur des emplois partiels à l'émulsion ou sur des enduits. Enfoncement des granulats dans un support bitumineux trop «mou» ou trop «gras» (enrobé trop riche en mastic). Délai insuffisant entre les réparations localisées à l'émulsion et la réalisation de l'enduit.





Figure I.4: les dégradations des chaussées

### **I-12-quelques solutions**

Pour faire diminuer les dégradations des chaussées et affins de garder nos chaussées en bon état pour des longues durées on a obtenus quelques solutions, (Bordes et autre ,1996).

#### **I-12-1 Les purges**

Les purges ont pour but de substituer tout (purges profondes) ou partie (purges superficielles) des matériaux du corps de chaussée par des matériaux de meilleure qualité ;

#### **I-12-2-Le bouchage des trous**

Rendre à la chaussée son état de surface initial dès que l'on constate qu'un trou s'est formé, il faut le reboucher avec les matériaux disponibles afin d'éviter que la responsabilité du service ne soit engagée en cas d'accident.

### **I-12-3-Le reprofilage**

Redonner à la chaussée un profil en travers correct pour que l'eau puisse s'évacuer rapidement vers les exutoires. Le reprofilage doit également permettre d'obtenir un profil en long régulier permettant d'assurer une sécurité et un confort suffisant pour l'utilisateur et compatible avec le niveau de service choisi.

### **I-12-4-L 'imperméabilisation de surface**

- Éviter que l'eau ne pénètre à l'intérieur du corps de chaussée ; réaliser la couche de surface de certaines réparations : purge, repo-filage, etc.

- Éviter le départ par arrachement des matériaux de surface sous l'effet du trafic. Cette intervention est réalisée avec de l'émulsion de bitume adaptée à l'aide d'un matériel dit «point à temps», elle est appelée plus généralement «emploi partiel à l'émulsion». Cette technique n'est en aucun cas une technique de reprofilage ou de bouchage.

Elle ne doit pas conduire à un élargissement «sauvage» de la partie revêtue de la chaussée.

### **I-12-5-Traitement des ressuges**

Pour supprimer les effets néfastes de la présence de l'excès de bitume à la surface de la chaussée. Cet excès peut s'avérer être extrêmement dangereux pour la circulation par temps de pluie (glissance). De plus, par journée très chaude le revêtement risque de s'arracher par collage aux pneumatiques (pelade).

est utilisé comme matériau de construction des chaussées mélangé avec de la marne qui est un matériau abondant dans la nature a cause de ces mauvaises caractéristiques donc leur utilisation comme matériau de construction est limitée malgré sa présence en grande quantité dans la nature et en particulier dans la région de grande kabylie ;

### **I-13-Conclusion**

La réalisation des ouvrages routiers nécessite des quantités en agrégats de plus en plus croissante en rapport avec le développement des pays, au point où les carrières restent parfois incapables de satisfaire les besoins nationaux. Cependant, la nécessité d'exploitation d'autres sources de matériaux devient indispensable pour assurer la continuité de l'approvisionnement des projets. Dans le chapitre suivant seront présentés les matériaux traités dans cette étude, notamment les matériaux recyclés.

**CHAPITRE II**  
**RECYCLAGE ET MATERIAUX**  
**RECYCLES**

## **II-1-introduction**

Pour limiter l'extraction abusive des matériaux naturels classiques, très utilisés dans de vastes programmes de construction, l'exploitation de nouveaux matériaux naturels, ainsi que le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme solution d'avenir. Elle permet simultanément de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

## **II 2- généralités sur le recyclage**

### **II-2-1-définition du recyclage**

C'est réduire l'extraction des matières premières, non renouvelables, provenant de l'autre bout du monde. Le recyclage permet de lutter contre le réchauffement climatique⇒Recycler c'est économiser de l'énergie.

### **II-2-2-les avantages du recyclage**

C'est l'économie de matière première par exemple une tonne de papier-carton permet d'obtenir à Quelques kilogrammes près la même quantité de pâte à papier alors que trois tonnes de bois seraient nécessaires.

Autre avantage, l'économie réalisée sur les moyens de traitement, les opérations de coupe, de broyage, de cuisson, de défibrage, de lavage et de raffinage, indispensables dans le cas du bois, ne sont pas nécessaires dans le cas du recyclage.

### **II-2-3-les différents types de recyclage**

Il existe trois familles de techniques de recyclage (chimique, mécanique et organique.) :

- Le recyclage « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

### **II-2-4-Les différents cycles de recyclages**

On a deux types du cycles de recyclage :

- Recyclage avec destruction :On peut utiliser l'énergie dégagée lors de la destruction du matériau
- et recyclage avec valorisation :C'est l'aptitude d'un matériau à être réintroduit dans un cycle de fabricati

## **II-2-5-Cycle de vie des déchets**

### **II-2-5-1- Le centre de tri**

les emballages que vous avez triés arrivent en vrac, ils doivent être préalablement séparés par familles de matériaux (acier, aluminium, papier-carton, brique alimentaire, plastique opaque ou transparent) ; Cette tâche est réalisée par des personnels spécialisés (le plus souvent aidés par des machines automatiques) qui effectuent un deuxième tri et contrôlent les erreurs.

### **II-2-5- 2-L'incinération**

L'incinération a pour principe de réduire de façon importante le volume des déchets en les brûlant. Elle permet la récupération d'énergie (électricité et chaleur) et de nouveaux matériaux (mâchefer) utilisés dans les travaux publics.

### **II-2-5-3- Le compostage**

Le compostage permet de transformer par fermentation active les déchets organiques des habitants en engrais. Après six mois de traitement environ (comprenant une phase de maturation finale), le compost est prêt à être valorisé.

Le compost est un engrais naturel utilisé en agriculture et en jardinage.

### **II-2-5- 4-Le Centre de Stockage de Déchets Ultimes (CSDU)**

Les ordures ménagères ne pouvant être ni recyclées, ni récupérées, ni valorisées (on parle de " déchets ultimes") sont stockées dans un Centre de Stockage de Déchets Ultimes .

Les CSDU sont soumis à des normes environnementales renforcées pour éviter toute pollution du milieu naturel par infiltration ;

## **II-2-6-Quel matériau respecte l'environnement ?**

Les matériaux inertes respectent l'environnement ; parmi ces matériaux on peut citer le verre ; il ne contamine pas l'environnement dans lequel il se transforme lentement en silicates. Et même dans les contextes les plus inattendus, le verre est « absorbé » par l'écosystème.

Le verre peut être refondu à l'infini pour fabriquer de nouvelles bouteilles, sans aucune perte de qualité ou de transparence. Ce système s'appelle le recyclage en « boucle fermée » ou de « bouteille à bouteille » dont La plupart des bouteilles en verre qui arrivent en « fin de vie » en Europe continuent de fournir le « matériau de base » d'une nouvelle génération de bouteilles, dont notre étude on a utilisé le verre comme matériau de construction des chaussés ;

## **II 3- généralités sur le verre**

### **II-3-1-l'Historique du verre**

L'homme a commencé à fabriquer du verre il y a environ 5000 ans. Le verre fut Probablement utilisé pour la première fois dans l'Égypte ancienne, où les articles en verre étaient considérés comme des objets de luxe, que l'on ne trouve que dans les tombes de prêtres et de membres de la famille royale.

### **II-3-2-définition du verre**

Le verre est une matière fabriquée à partir d'un mélange de sable, de soude et de Chaux chauffé à une température élevée pour le faire fondre, le rendre liquide. Contrairement à la Plupart des autres substances que nous produisons, il ne se cristallise pas en refroidissant.

Il devient plutôt un «liquide ultra- refroidi» se comportant un peu comme le caramel et résistant à tout changement de la disposition de ses molécules. Cela signifie qu'on peut manipuler le verre quand il est chaud pour lui donner toute forme voulue et qu'il conservera cette forme en refroidissant. Les objets en verre durs et solides qui nous sont familiers sont tous passés d'un état liquide chaud à un état rigide froid sans subir de changement structurel.

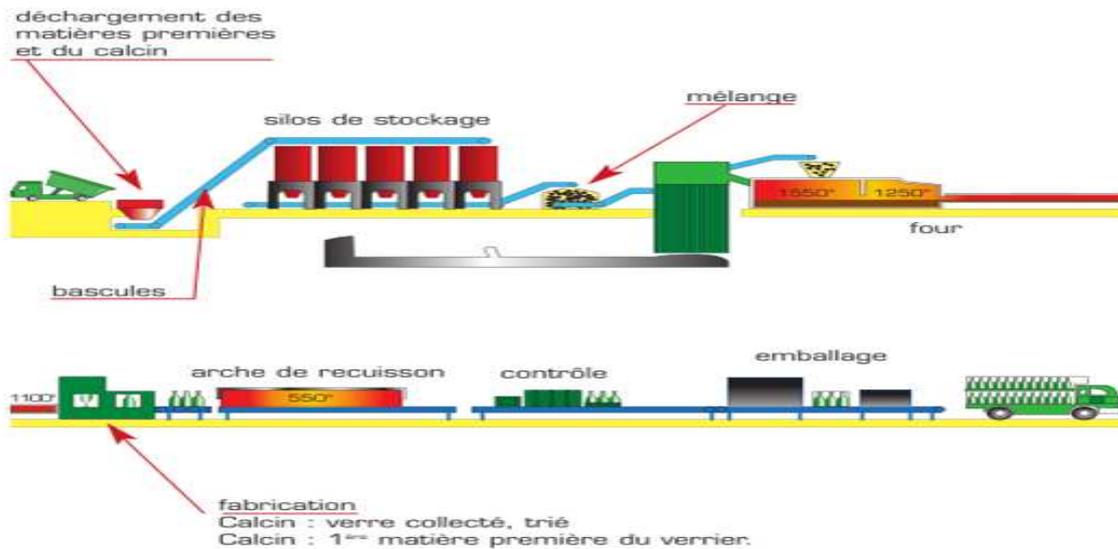
### **II-3-3-La matière première du verre**

Le verre se compose de trois matières premières (le sable, le carbonate de sodium et le calcaire) qui sont fondues ensemble à très haute température, puis moulées en bouteilles en verre dont chaque élément (matière première) a ses qualités :La silice assure la vitrification ;la soude abaisse la température de fusion à 1550°C et la chaux sert de stabilisant et évite que le verre ne cristallise en refroidissant.

### **II-3-4-Comment fabrique-t-on le verre ?**

La silice, la soude, la chaux ou le calcaire (ainsi que les affinants et les colorants) et du groisil (verre recyclé) sont introduits dans un four à bassin, et portés à une température de 1 550 °C. La pâte en fusion en sort par des canaux chauffés afin de préserver la chaleur de cette pâte.

A la sortie, on coupe une goutte dont la température et la taille varient selon les emballages à fabriquer. Cette goutte est appelée la paraison. Celle-ci passe dans un moule ébaucheur puis dans un moule finisseur où elle est soufflée. Afin d'éviter des écarts de températures qui le fragiliseraient, le verre est refroidi lentement dans un long tunnel chauffé, appelé : « arche de recuisson ».



FigureII-1 :les différentes phases de fabrication du verre

**Remarque :** La fabrication du cristal ne diffère de celle du verre que par l'utilisation d'oxyde de plomb comme fondant. Ce dernier en plus d'abaisser la température de fusion, assure la limpidité, la sonorité, la densité et l'éclat de la matière

### II-3-5-l'obtention du verre de différentes couleurs ?

Dans la fabrication du verre, si l'on ajoute un oxyde métallique, on obtient du verre de couleur ; nous pouvons citer comme exemple :

- ajouter du chrome et/ou du fer, on obtient la couleur verte ;
- ajoute de l'oxyde de cobalt, on obtient du verre bleu ;
- ajouter du carbone à une pâte à faible teneur en chrome, on obtient du verre brun.

TableauII-1 :l'obtention du verre de différentes couleurs

oxyde de fer	vert
oxyde de cobalt	bleu
oxyde de manganèse	violet
or	rose à rouge rubis
oxyde de sélénium	jaune orangé
oxyde d'argent	jaune

Dans le recyclage du verre ,si le verre collecté est mixte (incolore ,vert ,jaune brune) :le verre produit sera de couleur ;et pour fabriquer du verre incolore ,il ne faut avoir que du verre incolore comme groisil.



FiguresII-2 :les verre de différentes couleurs

### II-3-6-Comment se recycle le verre ?

Le verre collecté ; il est débarrassé de ces imputées, telles que les étiquettes et bouchons, par frottement et on obtient ce que l'on appelle le (calcin) ou (le groisil) ; il est directement introduit dans le four, il ne faut rien ajouter, et la dépense énergétique est moindre puisqu'il fond à 1000°C au bien 1500°C, l'utilisation du calcin économise ainsi l'énergie et diminue les émissions de CO<sub>2</sub> issues de l'extraction et du transport de matières premières (1 kg de calcin utilisé remplace 1,2 kg de matières minérales vierges) (l'industrie du verre, décembre 2001);

En France il y a 15 centres de traitement du verre. La distance moyenne entre une collectivité locale et un centre de tri est de 230 km. Les services de collecte du verre et de recyclage du verre assurent 10 fois plus d'emplois que la mise en décharge ou l'incinération (recyclage des déchets ménagers 2012) ; dont nous pouvons citer les étapes de la collection du verre :

- les habitants déposent le verre dans les conteneurs ; le verre est collecté par des camions qui l'amènent vers des centres de traitement ;

- Le verre est trié et débarrassé de ses impuretés dans un centre de traitement dont il devient du calcin ; ensuite le calcin est acheminer vers les usines verrières il est refondu dans les fours verrières et soufflé dans des moules pour redevenir des emballages de même qualités ; les bouteilles sont alors remplis dans les usines d'embouteillage ; ils rejoignent ensuite les magasins comme présenté dans la figure suivante :

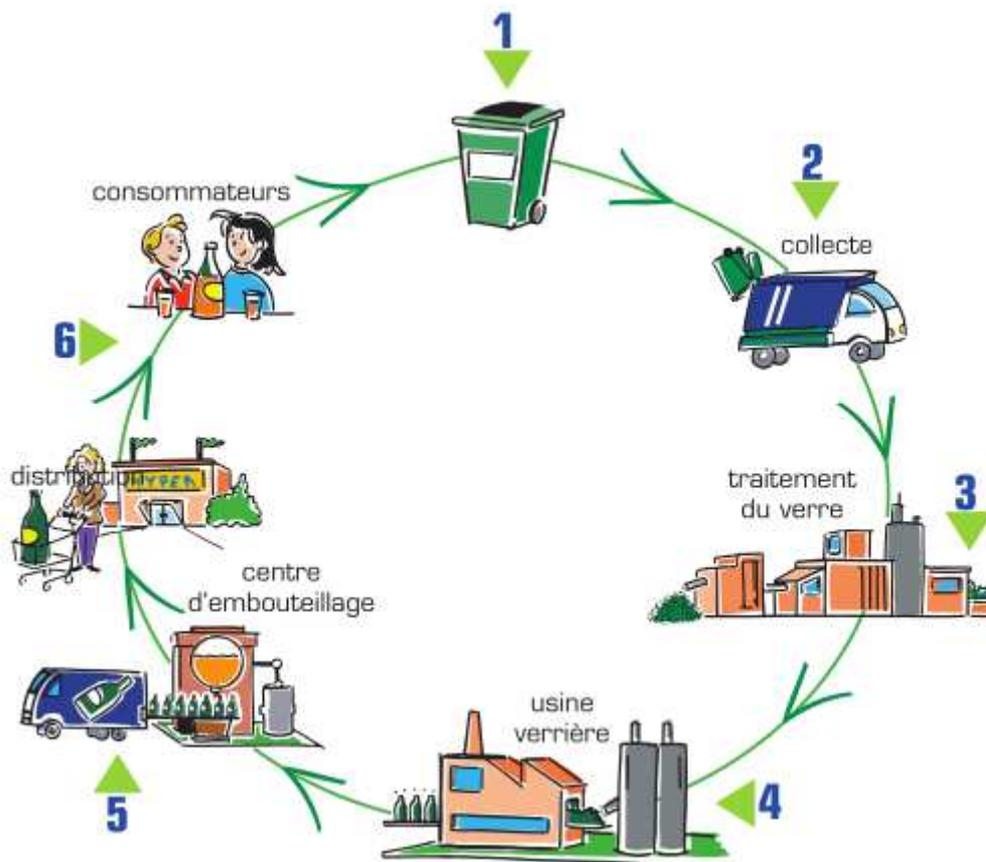


Figure II-3 : les étapes de collection du verre

### II-3-7-Les avantages de recyclage du verre

#### II-3-7-1-D 'un point de vue écologique

Le recyclage du verre réduit le CO<sub>2</sub>, économise les matières premières et l'énergie. Pour la production du verre, les matières premières vierges peuvent être remplacées par du verre recyclé (ou calcin). Ainsi, on parvient à une réduction notable de CO<sub>2</sub> pour différentes raisons. Il faut moins d'énergie pour faire fondre du verre recyclé que pour faire fondre des matières premières et les transformer en verre ; l'énergie et les émissions de CO<sub>2</sub> issues de l'extraction et du transport de matières premières sont économisées (1 kg de calcin utilisé remplace 1,2 kg de matières premières vierges), recycler le verre réduit aussi la pollution associée de l'air de 20 % et la pollution de l'eau de 50 %. Le coût du transport du calcin est, en moyenne, moins élevé que celui du transport des matières premières.

### II-3-7-2-D 'un point de vue économique

Le recyclage, la réutilisation et la réduction des déchets présentent des opportunités de développement pour les collectivités locales ; Fabriquer du verre à partir de verre recyclé est également moins cher, Enfin, dans le cas où le verre n'est pas recyclé mais mis en décharge, il n'est pas dangereux pour l'environnement puisqu'il est inerte et ne peut contaminer les sols.

### II-3-8-le verre dans la structure des chaussées

#### II-3-8-1-l'analyse chimique du verre

Tableau II-2 : l'analyse chimique du verre utilisé dans les chaussées

COMPOSITION	DÉBRIS DE VERRE, masse %			%
	blanche	verte	brun	
<i>CaO</i>	6,43	10,26	10	64,9
<i>Al<sub>2</sub>O</i>	2,41	2,81	3,2	5
<i>SiO<sub>2</sub></i>	70,39	72,05	70,01	21,1
<i>K<sub>2</sub>O</i>	0,23	0,52	0,82	0,6
<i>Na<sub>2</sub>O</i>	16,66	14,31	15,35	0,3
<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	0,32	0	0	2,7
<i>MnO</i>	0,04	0,04	0,04	0,01
<i>MgO</i>	2,59	0,9	1,146	1,6
<i>TiO<sub>2</sub></i>	0,08	0,11	0,11	0,2
<i>Cr</i>	0,02	0	0	0,03
<i>SO<sub>3</sub></i>	0,19	0,07	0,06	3,3

#### II-3-8-2-Les divers utilisations du verre

Plusieurs études et projets ont été menés visant l'utilisation des débris de verre dans la construction des chaussées ; en 1995, l'université technique du Texas a réalisé une étude sur l'utilisation des résidus du verre comme matériau de construction dans la structure des chaussées. le projet fut réalisé dans la ville de devine et il consista en l'utilisation d'un pourcentage de résidus de verre brisé mélangé avec les granulats pour la construction d'une route de 1,2 kilomètre. Il en résulte que l'usage des du verre comme matériaux de construction ne causa aucun problème particulier, tant pour le producteur que pour l'entrepreneur (Engelke R.L ; 1997);ce mélange nécessite moins d'eau afin d'obtenir une densité acceptable. A partir de ce projet on peut conclure que la ville de devin a bénéficié de 4000 pieds de route de bonne qualité et constituée d'une fondation en débris de verre .ce projet démontra également que les débris de verre s'est avéré une excellente solution de rechange dans la construction et que l'on pourrait poursuivre l'utilisation des débris de verre dans le future comme matériau de construction.

Tableau II-3 : les différentes utilisations du verre dans la construction

<b>utilisations</b>	<b>commentaires</b>
Enrobés bitumineux (GlassPhalt)	Comme granulats dans l'enrobé dans une proportion maximale de 15 %. La partie très fine peut être utilisée comme filler.
Dans le béton de ciment	<p>Lorsque concassé très fin, voire en poudre, il développe des propriétés cimentaires. À cet égard, il pourrait être utilisé pour substituer une partie du ciment. Les études restent à être complétées.</p> <p>Il peut aussi être utilisé comme granulats dans le béton mais dans une proportion très faible, car il y a diminution de résistance et des problèmes potentiels de réaction alcali-grulats.</p>
Enrobage de tuyaux	Il peut être utilisé comme matériau d'enrobage (granulats) des conduites en raison de ses propriétés drainantes.
Comme granulats de chaussée	<p>Peut être utilisé à 100 % dans l'infrastructure.</p> <p>Les propriétés physiques et mécaniques du verre concassé permettent d'envisager son utilisation dans la sous-fondation d'une chaussée.</p> <p>Peut être mélangé dans une proportion de 15 à 20 % aux granulats des couches de pierre concassée de la structure de la chaussée.</p>

## II-4- généralités sur les marnes

### II-4-1-introduction sur le sol

Au point de vue géotechnique, les matériaux constituant la croûte terrestre se divisent en deux grandes catégories (roches et sols) :

**Les sols** : sont des agrégats minéraux qui peuvent se désagréger en éléments de dimensions plus ou moins grandes sans nécessiter un effort considérable, ils résultent de l'altération chimique, physique ou mécanique des roches ; un sol est constitué par un agrégat naturel de grains minéraux pouvant être séparés par des actions mécaniques légères (trituration ou agitation sous l'eau...) ; le sol est un matériau meuble, poreux, non homogène situé à proximité de la surface de la terre on distinguera les sols des roches qui peuvent être définies comme des agglomérats de grains minéraux liés par des forces de cohésion fortes et permanentes. L'étude de la provenance des sols appartient à la géodynamique externe, un domaine de la géologie qui traite des processus de modification du relief des continents et des fonds océaniques ; du point de vue de la géologie, la formation des sols n'est qu'une des étapes menant à la formation des roches sédimentaires. (Robtaille et Tremblay, 1997).

**Les roches** : sont des matériaux durs qui ne peuvent être fragmentés qu'aux prix de gros efforts mécaniques ; en générale les roches sont constituées d'un assemblage d'éléments différents, de composition chimique bien spécifique ; deux grandes familles de minéraux sont généralement distingués : (Gérard et Bertrand, 2003)

**1-les minéraux silicates** : leur classification est étendue, les silicates constituent l'essentiel des roches magmatiques et métamorphiques ; parmi eux nous pouvons citer :

Nésosilicates, sorosilicates, cyclosilicates ...etc. ;

**2-les minéraux non silicatés** : sont parfois appelés minéraux accessoires bien qu'il soit en faible proportion dans la lithosphère, ils peuvent former à eux seuls certaines roches sédimentaires ; parmi eux nous pouvons citer : chlorures, sulfates, carbonates de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) qui est l'un des minéraux essentiels des roches sédimentaires.

### II-4-2-les roches sédimentaires

Par définition, les roches sédimentaires sont des roches exogènes c'est-à-dire formées à la surface de la terre ou elles se sont sédimentées. Leur caractéristique principale est de se

présenter généralement sous forme de dépôts en couches successives parallèles entre elles (stratification).qu'elles soient d'origine détritique (constituent des débris),ou chimique ,les roches sédimentaires sont issus des roches préexistantes.

Mobilisation : afin que les futurs sédiments puissent être transportés, il leur faut préalablement être individualisé, l'ensemble des mécanismes qui libèrent les particules de roche et les éléments dissous est résumé sous le terme d'altération. (Gérard et Bertrand, 2003)

### **II-4-3-la formation des roches sédimentaires**

#### **II-4-3-1- la mobilisation**

La mobilisation comprend deux processus ; le processus mécanique de désagrégation physique de la roche et le processus chimique d'altération de la roche dont les mécanismes de désagrégation physique ne modifient pas la structure des minéraux ; ils fragmentent les roches en une quantité de débris plus petits souvent en raison de leur discontinuité ,les roches sont sensibles aux chocs qui vont contribuer à les désagréger ; mais les mécanismes d'altération chimique et parfois détruisent la structure minérale des roches elle est souvent associée à l'altération physique et constitue l'un des processus essentiels de la formation des sols ,au sens pédologique le mécanisme d'altération chimique le plus important est l'hydrolyse c'est-à-dire l'attaque des minéraux par des eaux pures ou chargées de  $CO_2$  l'eau étant le vecteur essentiel de cette action par conséquent l'altération des roches est particulièrement important dans les régions humides (Gérard et Bertrand, 2003).

#### **II-4-3-2-transport et dépôts**

Les débris minéraux de la désagrégation physique de la roche et les produits d'altération chimique peuvent évoluer sur le site même pour former des horizons distincts .le plus souvent les débris solides et les produits d'altération en solution sont emportés par les agents de transport (le vent, le ruissellement, les courants marins et glaciers) et se déposent dans des bassins de sédimentation .dont les principaux types de dépôts sont :Les dépôts alluvionnaires, les dépôts lacustres, les dépôts marins, les dépôts glacières et les dépôts éoliens.

#### **II-4-3-3-diagenèse**

Il s'agit de phase ultime du phénomène sédimentaire, elle recouvre tous les processus permettant la transformation d'un sédiment en une roche solide (transformation minérale, la compaction et enfin la cimentation). (Gérard et Bertrand, 2003).

#### II-4-4-classification des roches sédimentaires

Parmi les nombreux groupes de roches sédimentaires nous avons trois types les plus courants en géotechnique :

**II-4-4-1-les évaporites :** elles sont les résultats de l'évaporation de l'eau de mer dans des conditions exceptionnelles ; les plus couramment rencontrées sont (chlorure de sodium, l'halite, sulfate du calcium et le gypse) ;

**II-4-4-2-les roches terrigènes :** elles sont formées des matériaux issus de terre émergées ; pour ces roches il est possible de retenir une classification liée à la granulométrie comme présentée dans le tableau sui:

Tableau II-4 : la classification des roches terrigènes

État	Taille des éléments		
	Rudites 2 mm	Arénites 40 µm	Pélites
Roche meubles	Blocs (D > 20 cm) Galets (2 < D < 20 cm) Graviers (0,2 < D < 2 cm)	Sables	Boues Vases
Roches consolidées	Poudingues (éléments roulés) Brèches (éléments anguleux)	Grès Arkoses (> 30% de feldspath) Grauwakes (débris rocheux)	Argilites

**II-4-4-3-les roches carbonatées :** sous le terme de calcaires sont regroupées les roches dont le minéral prédominant est la calcite, du calcaire à l'argile, et selon le pourcentage de carbonate de calcium d'un sol qu'est un bon indice de résistance mécanique et de sa sensibilité à l'eau nous pouvons citer les roches suivantes :

Tableau II-5: Nom de la roche selon le pourcentage de CaCO<sub>3</sub>

Teneur en CaCO <sub>3</sub> (%)	Désignation géotechnique
0 - 10	Argile Argile marneuse Marne
10 - 30	
30 - 70	
70 - 90	Calcaire marneux Calcaire
90 - 100	

#### II-4-5-L'origine et définition des marnes

On appelle sédiment le résultat du dépôt de matériaux ayant subi au préalable un certain transport sous forme de particules en suspension ou de substances dissoutes dans l'eau.

Le calcaire est une roche sédimentaire surtout constituée de calcite. L'acide réagit avec le calcaire en provoquant une effervescence ; ainsi les marnes sont moins résistantes à l'érosion que le calcaire ; elles sont formées d'un mélange de calcaire et d'argile (Entre 35 et 65 % d'argile) ;

Dont nous avons des différents types d'argiles qui se différencient par la distance entre feuillets qui sont (la kaolinite la montmorillonite et l'illite) : (Callaud, 2004).

-la kaolinite : est stable au contact de l'eau, dont la distance entre feuillets est faible donc ne laisse quasiment pas pénétrer l'eau donc sont des argiles non gonflante.

-la montmorillonite : n'est pas stable en contact de l'eau, dont l'eau se pénètre donc sont des argiles gonflantes, les sols à forte teneur en montmorillonite sont susceptible de gonflement et de retrait important. Et l'illite qui a un comportement intermédiaire.

Les marnes sont des roches relativement tendres, qui subissent une géodynamique très active à leur surface et leur fragilité les rend très vulnérables aux aléas de la nature et des Hommes. Elles présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non durable, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures (Sadiki et al, 2006).

Les marnes sont à la fois argileuses et calcaires selon leur composition en carbonate de calcium ; elles présentent une résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; sont des marnes argileuses si elles contiennent 5 à 35% de carbonate de calcium et des calcaires marneux avec des taux de 35% à 65% et de 65 à 95% de carbonate de calcium (Ghazvinian ,2005) ;

En géotechnique, les marnes sont des roches relativement tendres qui présentent une

Résistance élevée à l'état sec mais leur comportement est différent en contact avec l'eau ; elles deviennent gonflantes et non résistantes, ce qui limite leur utilisation comme matériaux de remblais dans les travaux de génie civil et infrastructures, (Mellal et Lamri, 2010).

Les marnes font partie des matériaux dit évolutifs, c'est -à-dire qui Peuvent Changer de nature ou de structure à la suite de leur extraction. Si cette Évolution Se fait dans un délai de quelque mois ou de quelque Année, Notamment, au niveau du remblai Constitué d'un tel matériau elles sont réputées, Pour avoir Souvent un comportement particulièrement gênant et dangereux parce Qu'elles peuvent être a la fois très dures à l'extraction et très altérables, les blocs extraits perdant spontanément toute résistance au bout de quelque temps d'exposition aux intempéries (Delahaye et le Roux ,1975).

La teneur en carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) : la détermination de la teneur en carbonate s'effectue au calcimètre Dietrich-Fuling ; l'essai consiste à mesurer à l'aide d'une burette à gaz le volume de  $\text{CO}_2$  dégagé par la réaction du HCL sur le carbonate de calcium contenu dans l'échantillon ;

L'acide chlorhydrique dilué décompose le carbonate de calcium selon la Réaction suivante :



#### **II-4-6-Quelques types de marnes**

##### **II-4-7-1-Les marnes bleues**

Elles sont reconnaissables à leur couleurs bleu nuit. Ces marnes sont extrêmement fines et essentiellement composées d'argile, elles ne contiennent aucun élément détritique.

##### **II-4-7-2-Les marnes nummulitiques ou grises souris**

Elles contiennent une fraction d'élément détritique fins, en particulier des sables dont leur présence rend ces marnes reconnaissables puisqu'elles croquent sous la dent.

##### **II-4-7-3-Les marnes gréseuses**

Ces marnes ont une composante gréseuse importante, et même des niveaux de grés plus indurs inter-stratifiés dans les marnes.

##### **II-4-7-4-Les marnes grises**

On les retrouve avec d'épaisseurs plus importantes et elles ne contiennent que de l'argile (Bouchez, 2008).

#### **II-4-7-La composition chimique des marnes**

D'après des études faites sur une marne la minéralogie des marnes varie avec la profondeur, elles comportent des pourcentages différents de montmorillonite, illite chlorite et kaolinite. Si l'illite et le chlorite sont des argiles faiblement gonflantes, la smectite est en revanche très sensible au phénomène de gonflement ainsi la montmorillonite. (Derriche et Cheikh, 2004)

#### **II-4-8-Comportement d'une marne en présence d'eau**

L'eau joue un rôle considérable dans le comportement des sols ; par exemple l'argile sèche est cassante, friable et l'argile humidifiée devient plastique et déformable (L'Hermite, 1969) ; donc on aura des tassements et une diminution de résistance et d'autres désordres comme le retrait et le gonflement des sols ; l'eau est le premier facteur de la désagrégation des sols ; la désagrégation par l'eau résulte de différents mécanismes qui affectent le sol ;

en présence d'eau, les roches montrent des comportements qui peuvent être sensiblement différents et qui peuvent être aussi additionnés aux caractéristiques minéralogiques et texturales des roches ,les minéraux accessoires comme la pyrite qui par oxydation ,contribue à la dégradation des minéraux argileux et par voie de conséquence à l'évolution des textures générant une dégradation des caractéristiques mécaniques ;

Les marnes, aux proportions de smectites variables, présente une faible résistance au cisaillement et une forte aptitude aux processus de retrait gonflement (Derriche et Cheikh ,2004)

##### **II-4-8-1-Le phénomène de retrait-gonflement**

La sécheresse se traduit par une baisse du niveau des nappes.la tranche la plus superficielle de sol, sur 1 à 2 m de profondeur, est alors soumise à l'évaporation .il en résulte un retrait des argiles, qui se manifeste verticalement par un tassement et horizontalement par l'ouverture de fissures, les mouvements du sol qui sont à l'origine des désordres des constructions sont dus essentiellement aux diminutions de teneur en eau. (Nowamooz, 2007)

Le gonflement des sols est un phénomène très complexe .en général, le retrait /gonflement des sols se caractérise par des mouvements de terrains différentiels de petite amplitude, provoqués par des variations de volume de certains sols lorsque leur teneur en eau se modifie.cet aléa ne concerne que certains sols argileux particulièrement en présence de minéraux gonflants. Ce phénomène est à l'origine des dégâts importants au cours de périodes

de sécheresse prolongée en climat tempéré, les argiles sont souvent proches de leur état de saturation, si bien que leur potentiel de gonflement est relativement limité elles sont donc éloignées de leur limite de retrait, ce qui explique que les mouvements les plus importants sont observés en période sèche.



Figure II-4: Désordres dues aux retrait-gonflement

#### II-4-8-2-L'action du gel dégel

la formation du gel dans le sol peut avoir des conséquences importantes .le volume des sols peut augmenter de 10%.les lentilles et plaquettes de glaces peut provoquer un soulèvement du sol et endommager ainsi les structures superficielles légères, activation des tassements différentiels, enfin elle peut augmenter la teneur en eau du sol .les actions antigel peuvent se résumer dans :l'utilisation des membranes imperméables, assainissement et drainage de l'eau ,l'ajout d'additifs chimiques ...etc. (Berga, 2003)



Figure II-5: Désordres dues aux phénomènes gel dégel

**II-5-Conclusion**

Des généralités ont été exposées dans ce chapitre sur le recyclage et les matériaux recyclés, particulièrement, le recyclage du verre, ainsi que la présentation des marnes argileuses.

La marne renforcée avec des débris de verre peut présenter des propriétés intéressantes pour un matériau de chaussée. Néanmoins, son comportement mécanique sous l'effet du trafic doit satisfaire les conditions exigées par les normes pour valider son utilisation dans ce domaine. Avant d'entamer l'étude de leur comportement mécanique, un ensemble de caractéristiques physiques, chimiques,... devra être déterminé. L'identification des matériaux utilisés, fera l'objet du prochain chapitre.

# **CHAPITRE III**

## **IDENTIFICATION DES MATERIAUX**

### III-1-Introduction

Identifier un sol, c'est déterminer un ensemble de propriétés (physiques, chimiques, minéralogiques, ...) qui permettent de le caractériser ; elles sont déterminées par des essais simples et rapides, appelés «essais d'identification». Ces propriétés sont la teneur en eau ; les limites d'Atterberg ; analyse granulométrique et composition chimique.

Dans ce chapitre est identifiée principalement la marne utilisée, l'identification du verre, nécessite un matériel plus sophistiqué non disponible dans nos laboratoires.

### III-2-Les matériaux à identifiés

#### III-2-1- La Marne

le matériau utilisé dans cette étude est une marne qui a été prélevée au niveau de la wilaya de TIZI OUZOU d'un site à proximité de lycée de boukhalfa à une profondeur comprise entre 2.6m à 3 m par rapport à la cote du terrain naturel ; la marne est prélevée à l'aide d'une pelle mécanique (échantillon remanié) sous forme de blocs.

##### III-2-1-1- Etude géologique

D'après les études du géologue français Daniel Raymond cité par Mehidi (1997) montrent que la marne se trouve en abondance dans tout le Nord -Est de TIZI OUZOU ;

##### III-2-1-2-Analyse chimique de la marne:

D'après l'analyse chimique de notre échantillon dans le laboratoire d'Alger nous avons obtenu les résultats mentionnés dans le tableau suivant ;

Tableau III-1 : Résultats de l'analyse chimique de la marne

Profondeur(m)	Carbonate $\text{CaCO}_3$ (%)	Matière organique (%)
2.6 - 3 m	22.7	0.26

Selon la norme française (NF 18-011 de Décembre 2009), nous pouvons dire que nous avons un environnement d'agressivité chimique modérée ; et d'après le pourcentage de la teneur en carbonate ( $\text{CaCO}_3 = 22.7\%$ ) nous constatons qu'on a une marne argileuse.

### III-2-1-3-Analyse granulométrique de la marne

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des éléments d'un matériau. Elle comprend deux opérations :

- Le tamisage: Pour la distribution dimensionnelle en Poids des Particules de dimension supérieure ou égale à 80  $\mu\text{m}$ . (NF P94-056)
- La sédimentométrie: Lorsque la dimension des particules est inférieure à 80  $\mu\text{m}$ , le tamisage n'est plus possible, il est donc remplacé par l'essai de sédimentométrie. (NF P94-057)

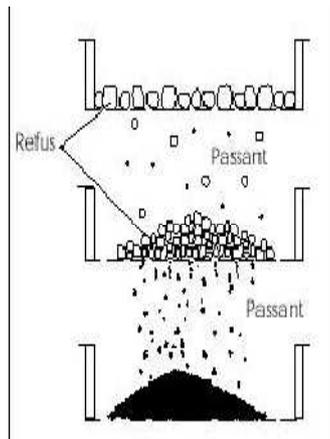
Dans notre étude l'analyse granulométrique du sol étudié (marne), est faite par la méthode de tamisage au lieu de la méthode sédimentométrie car la marne est extraite sous forme de blocs, dont on a utilisé la fraction (0-20 mm).

#### Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, sous une forme graphique (granulom



Figure III-1 : Matériels d'analyse Granulométrique



FigureIII-2 : Schéma de la manipulation du tamisage

Tableau III-2:Analyse granulométrique de la marne

TAMIS (mm)	RC(g)	RC(%)	TA (%)
20	0	0	100
10	900	22,5	77,5
6,3	1800	45	55
4	2500	62,5	37,5
2	3000	75	25
0,5	3400	85	15
0,08	3800	95	5
FOND	4000	100	0

Avec :

RC: sont les refus cumulés en (%)

TA : sont les passants cumulés en (%) ;

On représente la courbe granulométrique de la marne; dont la forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants :

- ✓ La dimension D du plus gros granulat ;
- ✓ la plus ou moins grande proportion d'éléments fins ;
- ✓ La continuité ou la discontinuité de la granularité.

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

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

Avec :

$D_{10}$  : Diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés .

$D_{30}$  : Diamètre correspondant à 30% des tamisats cumulés .

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

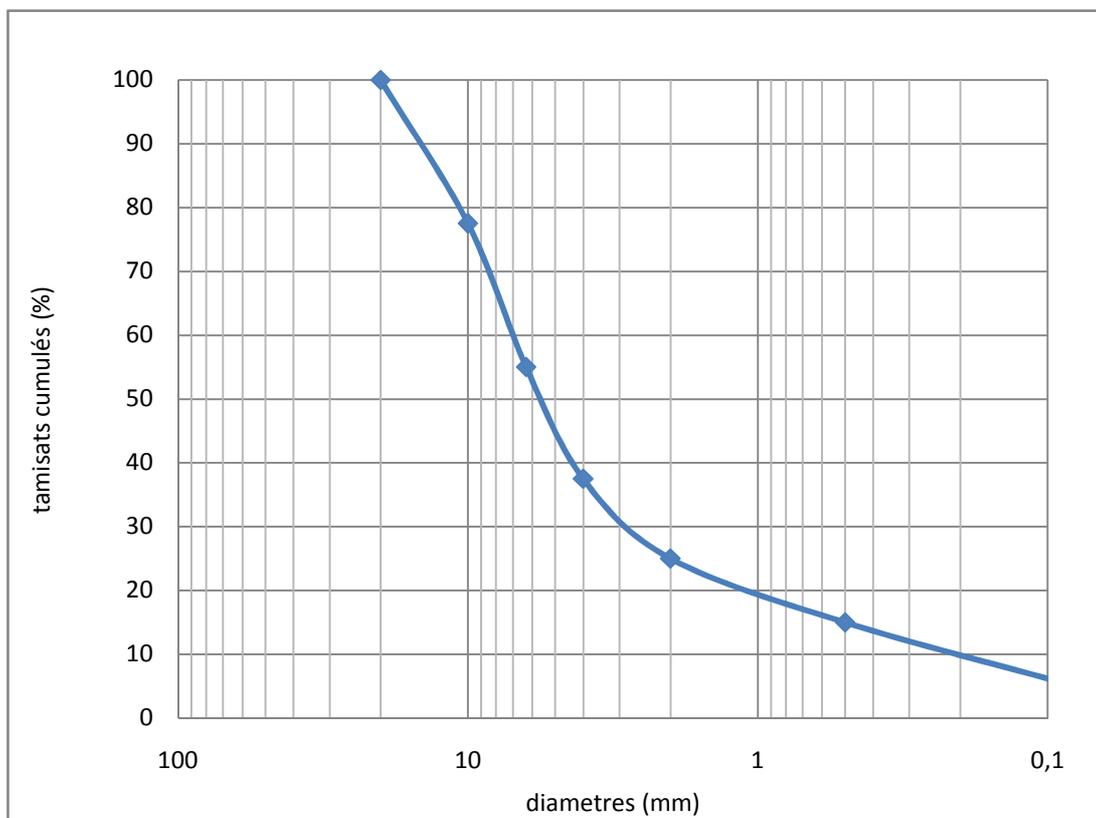


Figure III-3 : la courbe granulométrique de la marne

Dans ce cas :

$C_u = 7 / 0.2 = 35 > 2$  → granulométrie étalée.

$C_c = (2.9)^2 / (7 * 0.2) = 6$  → mal gradué.

Selon la classification LPC/USCS des sols en laboratoire, le matériau étudié se présente sous la forme dimensionnelle d'une grave propre mal graduée (Gm).

### III-2-2- Le verre

#### III-2-2-1-Définition du verre

Le verre se compose de trois matières premières le sable, le carbonate de Sodium et le calcaire, il est un matériau inerte il ne contamine pas l'environnement dans lequel il se transforme lentement en silicates.

#### III-2-2-2-L'analyse chimique du verre

L'identification du verre ne peut être effectuée au niveau de notre laboratoire, vu le manque de moyens appropriés. Toutefois, d'après la recherche bibliographique, le verre se compose généralement des composants suivants :

Tableau III-3 : l'analyse chimique des débris du verre

Composition	Masse (%)
CaO	10.26
Al <sub>2</sub> O	2.5
SiO <sub>2</sub>	71.28
K <sub>2</sub> O	0.52
Na <sub>2</sub> O	14.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MnO	0.04
MgO	0.9
TiO <sub>2</sub>	0.11
Cr	0
SO <sub>3</sub>	0.07



Figure III-4 : les débris verre concassé.

### III-2-2-3- L'analyse granulométrique du verre

Dans cette étude on a utilisé comme matériau pour la construction des chaussées des débris du verre concassés selon une granulométrie de classe (0 - 20 mm).

Les résultats obtenus sont portés dans le tableau suivant ; après nous allons déduire la courbe granulométrique du verre :

Tableau III-4 : Granulométrie du verre concassé

tamis	RC(g)	RC(%)	TC(%)
20	0	0	100
10	50	12,5	87,5
8	150	37,5	62,5
4	230	57,5	42,5
2	290	72,5	27,5
0,5	360	90	10
fond	400	100	0

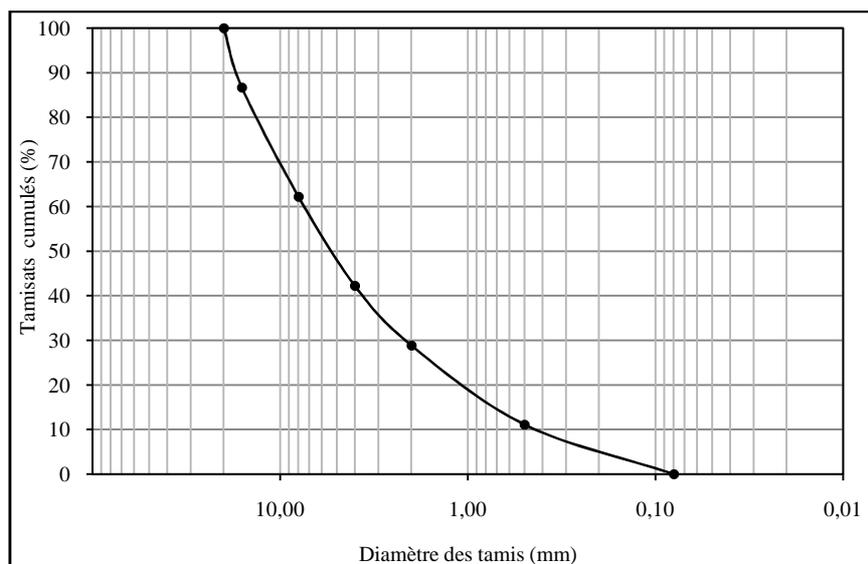


Figure III.5: courbe granulométrique du verre utilisé.

Les débris de verre utilisés ont un diamètre maximal ne dépassant pas les 20mm. C'est des dimensions obtenues au concassage manuel au laboratoire.

$$D_{60} = 6.5 \text{ mm} ; D_{30} = 2.2 \text{ mm} \text{ et } D_{10} = 0.47 \text{ mm}$$

$$C_u = 6.5 / 0.47 = 13.829 > 2 \quad \longrightarrow \text{granulométrie étalée.}$$

$$C_c = (2.2)^2 / (0.47 \times 6.5) = 1.582 \quad \longrightarrow 1 < C_c < 3 : \text{bien gradué}$$

Selon la classification LPC/USCS des sols en laboratoire, nous pouvons dire que la classe granulaire du verre utilisée présente la dimension d'un grave propre bien gradué.

### III-3-Les essais d'identifications

#### III-3-1- Teneur en eau (w)

la teneur en eau est déterminée selon la norme française (NF P94-050) ;(méthode par étuvage).

La détermination de cette teneur consiste à peser un échantillon humide puis on le passe à l'étuve à 60°C à 75°C pendant 24H ; et on le pèse encore une fois à sec.

La Teneur en eau est calculée comme suit :

$$W = M_w / M_d$$

$M_w$  :la masse de l'eau.

$M_d$  :la masse du matériau sec .

$M_h$  :la masse du matériau humide.

Les résultats de l'essai sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III-5 :résultats de détermination de la teneur en eau

N° de la tare	1	2	3
Masse totale humide(g)	119.2	114.1	121.4
Masse totale sec(g)	117	111	119
Masse de la tare(g)	21.1	24.6	23.9
Masse de l'eau(g)	2.2	3.1	2.4
Masse d'échantillon sec (g)	95.9	86.4	95.1
Teneur en eau (%)	2.29	3.59	2.52

Bien que le prélèvement de la marne a eu lieu pendant la saison de pluies, sauf que la marne a une teneur en eau très faible de 3.59%, cela est peut être dus :

Au prélèvement de la marne sous forme des blocs donc avec un volume du vide très réduit dont la pénétration de l'eau est très difficile (imperméabilité);ou bien a la composition minéralogique de la marne qui contient des argiles peut gonflantes.

### III-3-2- Les limites d'Atterberg

#### III-3-2-1-Généralités

Ces limites sont Déterminées selon la norme française (NF P94-051) , cette norme destinée à la détermination de deux limites d'atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) ; les deux limites d'atterberg s'appliquent aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400µm.

Les limites d'atterberg (limite de liquidité et limite de plasticité) : teneurs en eau pondérales correspondant à des états particuliers d'un sol.

**-Limite de liquidité :** teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états de sol (plastique et solide).

**-limite de plasticité :** teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états de sol (plastique et solide).

#### III-3-2-2-Les différents états du sol

**-L'état liquide:** le sol a une consistance très faible. Il a l'aspect d'un fluide, il tend à se niveler suivant une surface horizontale. Les particules glissent les unes sur les autres.

**-L'état plastique:** le sol a une consistance plus importante. Il ne tend plus à se niveler suivant une surface horizontale, il soumit à des faibles contraintes il se déforme largement sans se rompre et il garde sa déformation après suppression des contraintes, les particules ont mis en commun leurs couches adsorbées ; lorsqu'il y a déformation les particules restent attachées les unes aux autres sans s'éloigner ;

-

**L'état solide (avec retrait):** le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformations élastiques)

**-L'état solide (sans retrait):** les particules arrivent au contact en quelques points en chassant l'eau adsorbée ; le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue.

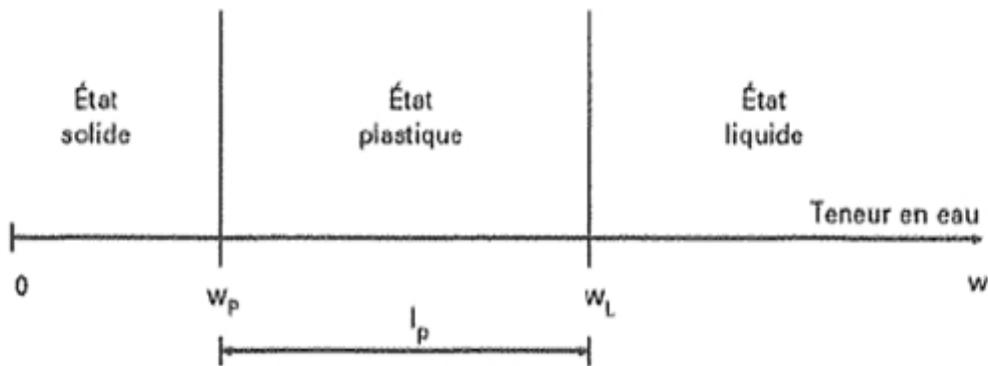


Figure III-6 : Les différents états d'un sol

### III-3-2-3-La détermination des limites

L'essai s'effectue en deux phases :

-recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés, c'est la limite de liquidité ;

-recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure, c'est la limite de plasticité ;

**La limite de liquidité**, notée  $w_L$  qui sépare l'état liquide de l'état plastique,

**La limite de plasticité**, notée  $w_p$  qui sépare l'état plastique de l'état solide,

**La limite de retrait**, notée  $w_r$  qui sépare l'état solide avec retrait de l'état solide sans retrait.

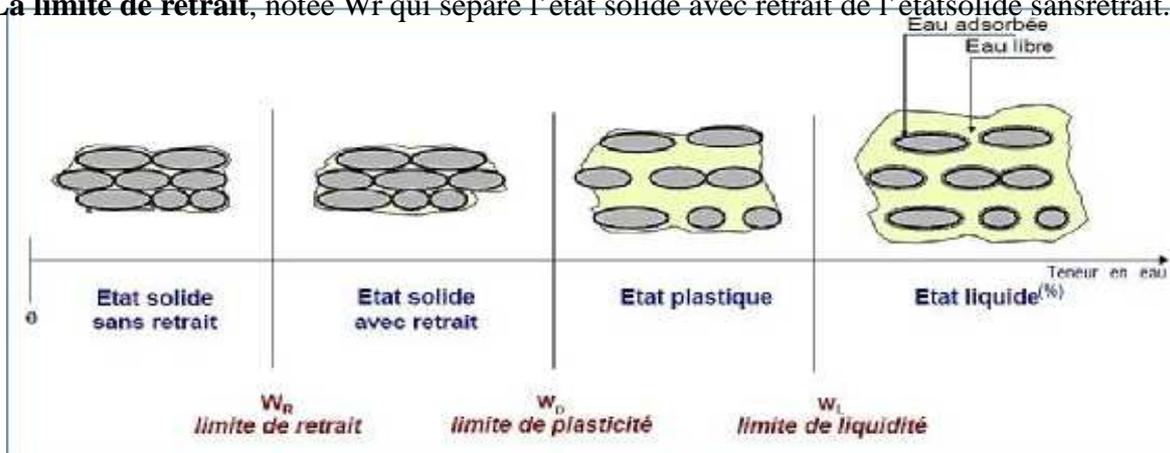


Figure III-7 : Les limites d'Atterberg.

### III-3-3-La Limite de liquidité

La limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1 cm de longueur en 25 chocs.

#### III-3-3-1-Matériel utilisé

Nous utilisons un appareil de casagrande qui est composé de:

- UN socle, en bois bakélite de masse entre 1250 et 1300 kg/m<sup>3</sup> ;
- UN support métallique portant une coupelle et une came pour soulever la coupelle de 10 mm au-dessus du socle et d'un outil à rainurer et une coupelle en laiton chromé qui a la forme une portion de sphère.



Figure III-8 : l'appareil de casa grande

#### III-3-3-2-présentation des résultats

Tableau III-6 : résultats d'essai de détermination de limite de liquidité

N° de l'essai	1	2	3	4
Nombre de coups	18	23	26	29
Teneur en eau %	44.72	42.98	41.73	40.35

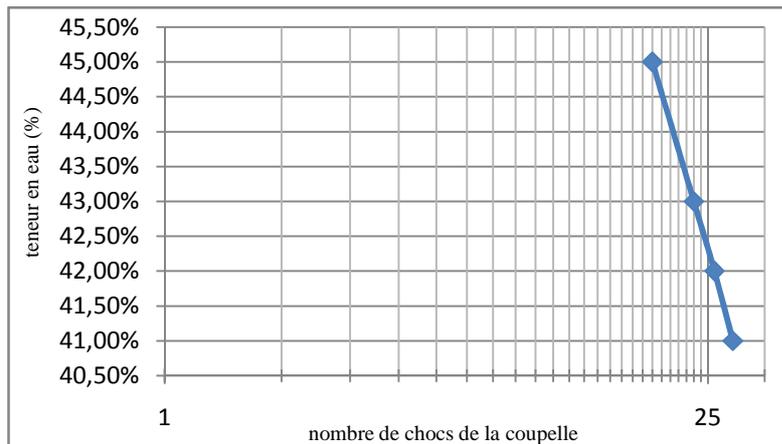


Figure III-9 : la courbe de casagrande(Détermination de la limite de liquidité).

- D'après la courbe de Casagrand ; nous pouvons tirer la valeur de la limite de liquidité qui est égale à 42.22% ;

### III-3-4-La Limite de plasticité

Nous pouvons définir la limite de plasticité comme étant la teneur en eau d'un cylindre qui se brise lorsque son diamètre atteint 3 mm,

#### III-3-4-1- l'exécution de l'essai

pour déterminer la limite de plasticité, on roule le matériau en forme de cylindre qu'on amincit progressivement ; la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de longueur au moment où son diamètre atteint 3mm comme présenté dans la figure suivante ;

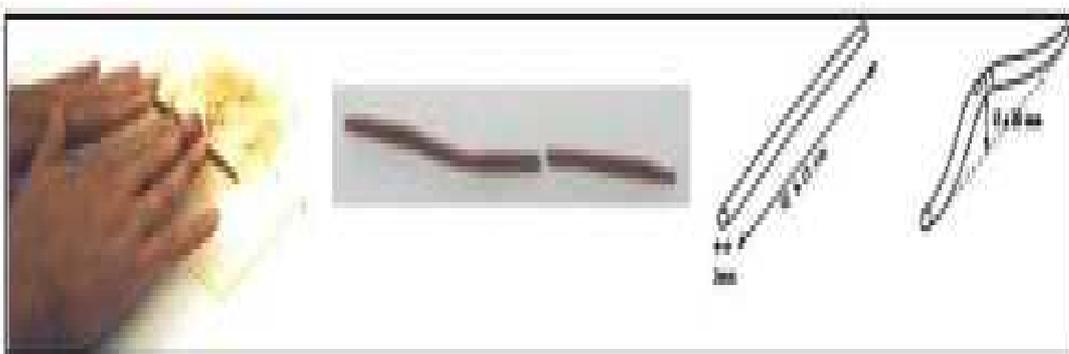


Figure III-10: Détermination de la limite de plasticité, (Magnan 1997).

### III-3-4-2-présentation des résultats

Tableau III-7 :détermination de la limite de plasticité

N° d'essai	1	2	3
Masse de sol humide(g)	24.3	22.3	27.1
Masse de sol sec (g)	23.6	21.9	26.6
Masse de l'eau (g)	0.7	0.4	0.5
Teneur en eau (%)	29.7	28.3	28.8

✓ nous pouvons déduire la valeur de limite de plasticité qui est égale à 28.93% ;

### III-3-5- indice de plasticité

L'indice de plasticité caractérise la largeur de la zone où le sol étudié a un comportement plastique.il permet de définir le degré de plasticité d'un sol référant aux plages suivantes :

Tableau III-8 :  
des sols d'après

IP (%)	Appréciation
0	Plasticité nulle
<7	Peu plastique
7 - 17	Moyennement plastique
>17	Hautement plastique

degré de plasticité  
ATTERBERG

Un sol, dont l'indice portant immédiat (IPI) est grand, est très sensible aux conditions

atmosphériques, car plus (IPI) est grand plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants. (IPI) précise donc aussi les risques de déformation des matériaux.

L'indice de plasticité mesure l'étendue du domaine de plasticité, il a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique routière, il est le paramètre le plus utilisé pour caractériser l'argilosité des sols, il s'exprime par la relation suivante :

$$I_p = W_L - W_p$$

$W_L$ : la limite de liquidité

$W_p$  : la limite de plasticité

✓ donc  $I_p$  est égale à 39.13%

L'indice de plasticité est un nombre sans dimension et d'après le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de formes de 1992 ; on retient pour l'indice de plasticité  $I_p$  les seuils d'argilosité suivants :

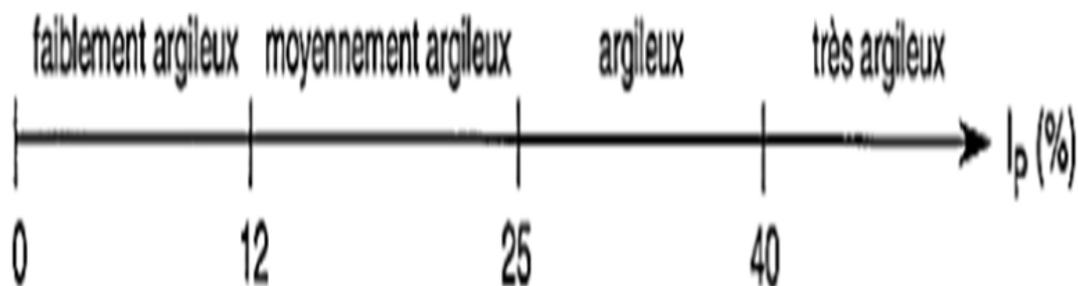


Figure III-11 : Les seuils d'argilosité d'un sol selon le GTR (1992).

### III-3-6-Indice de consistance :

D'après les valeurs des limites d'atterberg ( la limite de liquidité, la limite de plasticité) ainsi le degré de plasticité ; nous pouvons déterminer l'indice de consistance  $I_c$  qui permet d'apprécier la consistance des sols plastiques en se référant aux plages des valeurs présentées ci-dessous .il est déterminé par la formule suivante :

$$I_c = \frac{Wl - W}{I_p}$$

W : est la teneur en eau du sol dans son état naturel et ne comportant pas d'éléments supérieurs 400  $\mu\text{m}$  ;

✓ donc  $I_c$

est égale à

Les limites des paramètres destinés à et à caractériser moyen de son consistance montre le tableau :

<b>Ic</b>	<b>Appréciation</b>
0 - 0.25	Pâteux
0.25 - 0.50	Mou
0.5 - 0.75	Ferme
0.75 - 1	Mi dur
>1	Dur

d'atterberg sont géotechniques identifier un sol son état au indice de comme le

Tableau III-9 : plage de consistance des sols plastique d'après atterberg

### III-3-7-Interprétation des résultats

Tableau III-10 : les résultats des essais d'identifications

W(%)	W <sub>l</sub> (%)	W <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub> (%)	I <sub>c</sub>	I <sub>l</sub>
3.59	42.1	28.93	39.13	0.99	0.016

-D'après l'indice de plasticité (%  $7 < I_p = 13.17 < 17\%$ ) nous pouvons constater que la marne

étudiée est moyennement plastique, et selon le seuil d'argilosité d'un sol selon le GTR (1992) nous confirmons que cette marne contient d'argile et indique de ce fait qu'elle est moyennement argileuse.

-D'après l'indice de consistance ( $0.75\% < I_C = 0.99\% < 1\%$ ) nous pouvons constater que notre marne est une roche mi dure.

### **III-4-Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats d'essais d'identification réalisés au laboratoire, ce qui a permis d'avoir une idée sur la nature physique, chimique et minéralogique des matériaux. Cette opération permettra de comprendre et de justifier par la suite leur comportement mécanique sous les différentes sollicitations auxquelles ils seront soumis

Dans le chapitre qui suit, nous allons entamer la première série d'essais mécanique qui consiste en des essais de compactage au Proctor modifié.

# **CHAPITRE IV**

## **ESSAI DE COMPACTAGE**

### **PROCTOR**

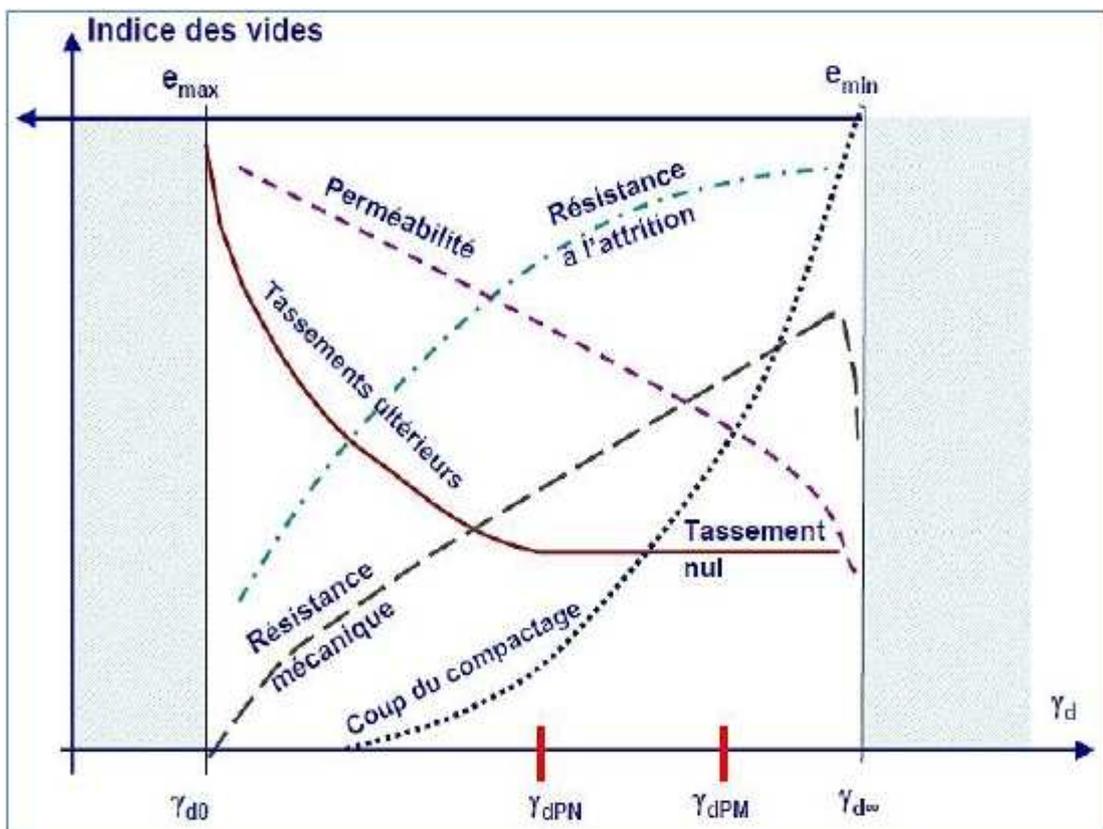
### IV-1-Introduction

Le compactage des sols est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à augmenter le poids volumique sec du sol traité ; ce qui conduit à réduire son volume apparent. Cependant, la portance dépend de la nature du sol, de son pourcentage d'eau et du degré de compactage.

En général après le compactage, le sol acquiert les améliorations suivantes :

- ✓ Une augmentation de la densité sèche ;
- ✓ Une augmentation de la capacité portante ;
- ✓ Une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- ✓ Une diminution de la perméabilité ;
- ✓ Une diminution de la compressibilité ;

Donc on peut résumer l'objectifs du compactage dans la figure suivante :



FigureIV-1 : Objectifs du compactage.

## **IV-2-Généralités sur le compactage**

### **IV-2-1- Définition du compactage**

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité en place d'un sol ;

Cette action augmente la compacité du sol, donc resserre la texture du matériau et réduit les possibilités de déformation du terrain et améliore sa capacité portante .le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques qui conduisent à accroître la densité d'un sol ,en faisant la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante ;les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers ,les barrages en terre et les aérodromes .(Berga Abdelmadjid ,2003).

### **IV-2-2-Le compactage selon la structure du sol**

Le compactage influence principalement sur la densité des matériaux qui se composent généralement de trois phases ;

#### **1-Une phase solide**

Composée de grains séparés les uns des autres, laissant entre eux des interstices occupés par d'autres phases (liquide ou gaz), c'est une phase peu compressible ; l'objectif du compactage n'est donc pas de réduire le volume de cette phase.

#### **2-Une phase liquide**

Occupe tous ou une partie des interstices, cette phase est aussi peu compressible, l'objectif du compactage n'est donc pas de réduire le volume du matériau, mais généralement il y a expulsion d'une partie de liquide.

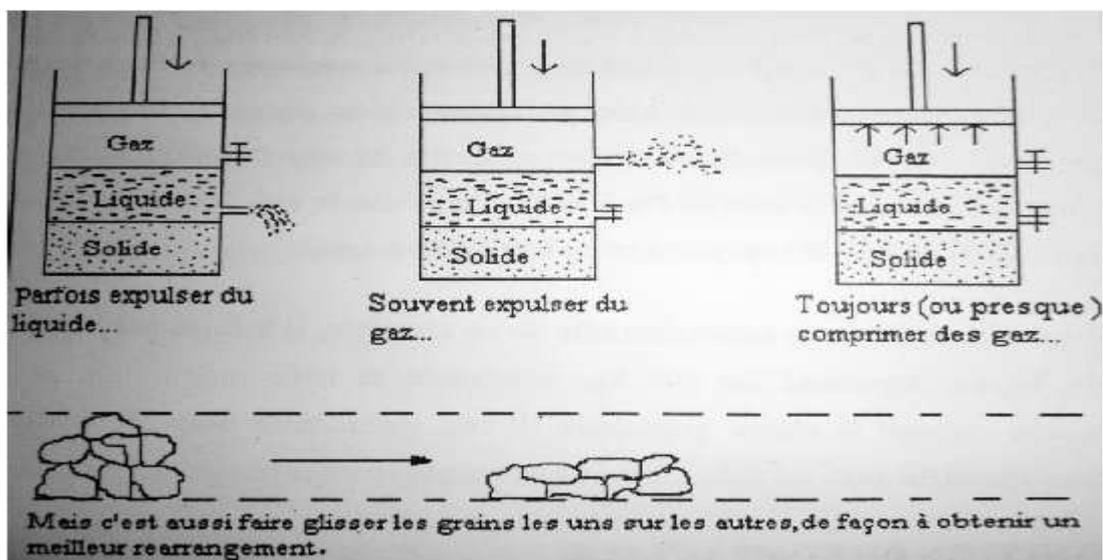
#### **3-Une phase gazeuse**

Occupe l'autre partie du volume des interstices, cette phase par contre est éminemment compressible ;

Dans la figure suivante et d'après la structure triphasique du sol nous pouvons arriver à une démonstration générale sur le compactage qu'est simplement comme suit :

Parfois expulser du liquide, souvent expulser du gaz et toujours compresser du gaz mais c'est surtout faire glisser les éléments du squelette les uns sur les autres d'une façon à aboutir un meilleur réarrangement des grains.

Ainsi, pour compacter, il faut vaincre certains obstacles tels que la cohésion, l'angle de frottement interne, l'imperméabilité qui s'oppose aux mouvements des liquides et la pression des gaz comprimés.



FigureIV-2 : Image schématique du compactage selon les différentes phase du sol.

### IV-2-3- Les principes de base du compactage

Le compactage consiste à appliquer suffisamment d'énergie au sol pour y réduire l'indice des vides en accroître la compacité.

La masse volumique sèche d'un sol compacté sera donc supérieure à celle d'un sol non compacté, c'est donc cette caractéristique qui permet de vérifier l'efficacité du compactage. La masse volumique du sol sec est influencée par trois variables :

La teneur en eau ; l'énergie de compactage et la granulométrie.

## **IV-2-4- les conséquences du compactage**

### **1-La réduction des risques de tassements**

Le tassement n'est que la traduction d'une diminution de volume des matériaux, qui est le résultat d'un compactage spontané et lent.

- Suppression des tassements : l'objectif de l'ingénieur, c'est de substituer au compactage lent qui conduit dans le temps à des désordres, donc effectuer une opération avant la construction de l'ouvrage qui mettra le matériau dans un état suffisamment serré, pour qu'un resserrement ultérieur soit impossible ou peu probable ;
- Suppression des tassements différentiels : l'idéale pour l'ingénieur sera de chercher à éliminer tous tassement, mais surtout à éviter que ce tassement s'accompagne de déformation, en effet un tassement est rarement constant ; car le remblai n'est généralement pas de hauteurs égales. ce sont donc les tassements différentiels qui sont les plus dommageables.

### **2-L'élévation des caractéristiques mécaniques**

Le resserrement des grains d'un matériau a un autre effet très important qui est la forte amélioration des caractéristiques mécaniques

### **3-Augmentation de la cohésion et d'angle de frottement interne**

le resserrement des grains augmente le nombre de points de contact entre eux et par conséquent leur frottement, d'où l'angle de frottement est accru, il augmente aussi l'efficacité des ménisques d'eau (s'ils n'entraînent pas un degré de saturation plus élevé) d'un part, et les phénomènes de surfaces paraissent d'avantage d'autre part, car la cohésion peut être fournie par les ménisques d'eau qui par tension superficielle viennent plaquer l'un contre l'autre, mais également par les phénomènes électrostatiques régnants dans l'eau plaquée à la surface des grains,

#### **4-Augmentation du module de déformation**

Lorsque le volume des interstices est importante, le sol sera plus déformable et par conséquent, le module de déformation plus faible, car il suffit d'appliquer une petite force pour produire une déformation ;

Le compactage réduit les interstices, ce qui rend le sol moins déformable et supporte des forces importantes, d'où on aura une augmentation marquante du module de déformation, ce qui se traduit aussi par une augmentation de la portance ;

#### **5-La diminution de l'attrition**

Lors de la mise en place d'une assise routière constituée de grains, ceux-ci se cassent par frottement les uns contre les autres ou par chocs, donc perdent une partie de leur substance transformée en grains plus petits, cette modification de la granularité est l'attrition, elle est généralement augmentée par la présence d'eau.

Lorsqu'un matériau routier est bien serré, les interstices n'y ont qu'un volume restreint ; d'où les mouvements relatifs entre les grains seront réduits, mais il faut éviter que l'attrition se produise par le compactage lui-même, car elle peut aussi être le résultat de deux grains qui s'appuient l'un sur l'autre et se compriment mutuellement par une petite surface de contact, écrasant le grain voisin ;

#### **6-La diminution de la perméabilité**

Il est évident que le volume des interstices joue un rôle important dans la perméabilité car plus la structure d'un matériau est lâche, plus les vides entre les grains augmentent, et vice versa, donc la perméabilité est directement proportionnelle au compactage, mais l'objectif de diminution de ce facteur (perméabilité), varie suivant la nature de l'ouvrage ;

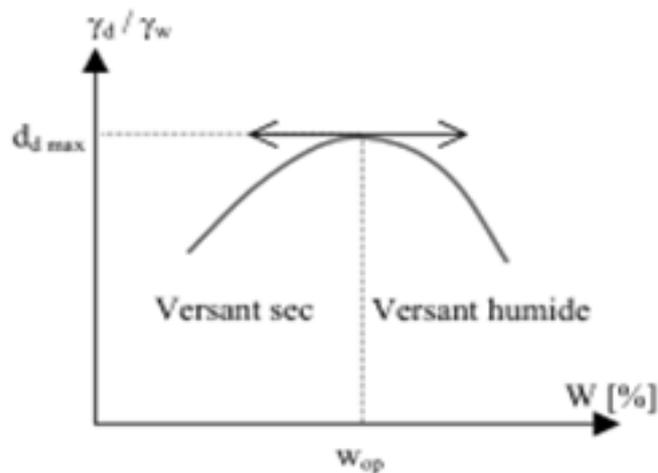
Pour les assises des chaussées, il faut noter que les exigences d'imperméabilité ne sont pas les mêmes, suivant qu'il s'agit d'une couche de surface qui doit impérativement être étanche, ou d'une couche de fondation qui dans certains cas pourrait même avoir intérêt à être peu perméable

### IV-2- 5-les Paramètres influençant sur le compactage

Proctor a montré que le compactage est fonction de trois paramètres : la masse volumique du sol sec, la teneur en eau, l'énergie de compactage et type de sol (granulométrie, minéralogie). (Berga Abdelmadjid ,2003).

#### IV-2- 5-1-influence de la teneur en eau

Lorsque la teneur en eau est élevée, l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage sans aucun profit, par contre l'orsque la teneur en eau est faible l'eau a un rôle lubrifiant important ,et la densité sèche augmente avec la teneur en eau.

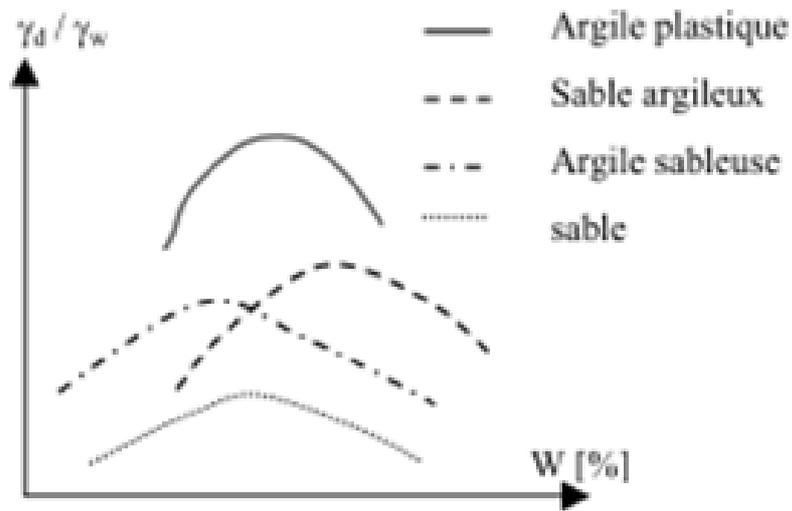


FigureIV-3 : influence de la teneur en eau

#### IV-2- 5-2-influence de la granulométrie

Les courbes de compactage varient avec la nature du sol, elles sont très aplaties pour les sables qui leur compactage est donc peu influencé par la teneur en eau.

Les matériaux de ce genre constituent les meilleurs remblais.



FigureIV-4 : influence de la granulométrie

#### IV-2- 5-3-influence de l'énergie de compactage

Lorsque l'énergie de compactage augmente, le poids volumique optimaux'accroît et la teneur en eau diminue.

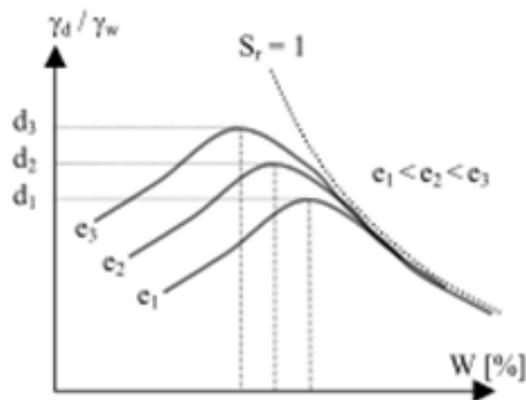


Figure IV-5 : influence de l'énergie de compactage

#### IV-2-6- Effet du compactage sur les propriétés des sols

Le compactage augmente la stabilité des sols et leur capacité portante d'une part, mais d'autre part modifie certaines de leurs propriétés :

### **1-Effet sur la structure du sol**

Le compactage réduit l'indice des vides et densifie la structure des sols pulvérulents, par contre dans les sols cohérents, il réorganise les particules d'argile qui tendent à devenir parallèles et à adopter une structure dispersée,

### **2-Effet sur la perméabilité**

Le compactage fait diminuer la proportion des vides dans le sol, d'où une diminution de la perméabilité, ce qui limite la quantité d'eau qui peut circuler,

### **3-Effet sur le gonflement et le retrait**

Le compactage réduit l'indice des vides des sols, d'où leur perméabilité, ce qui diminue à la fois la quantité d'eau qu'ils peuvent contenir et celle qu'ils sont susceptibles de recevoir ; il limite les variations de volume causés par le gonflement et le retrait.

### **4-Effet sur la compressibilité**

Plus le volume des vides dans un sol est important, plus sa compressibilité est grande et plus les tassements peuvent y être importants, la réduction des vides d'un sol par compactage le rend moins compressible, d'où les risques de tassement s'atténuent ;

### **5-Effet sur la résistance au cisaillement**

En compactant les sols pulvérulents, on resserre les particules les unes contre les autres, en augmentant ainsi leur frottement et enchevêtrement, d'où une meilleure résistance au cisaillement, ceci améliore la capacité portante des sols, sachant que cette dernière est directement proportionnelle à l'angle de frottement interne et dans les sols cohérents, les forces de cohésion constituent le facteur principal de la résistance au cisaillement.

D'une façon générale, les sols cohérents présentent une meilleure résistance au cisaillement quand ils sont compactés à une teneur en eau inférieure à la teneur en eau optimale. Or plus la distance entre les particules est faible, plus les forces de cohésions sont élevées, donc le compactage augmente la résistance au cisaillement.

### IV-2-7- Les essais de compactage

Les principaux essais de compactage souvent manipulés en laboratoire, sont les essais Proctor (normal et modifié) ; l'essai à la table vibrante.

#### IV-2-7- 1- Essai à la table vibrante

C'est un essai généralement utilisé pour les sols peu sensibles à l'eau, où l'essai donne des courbes de compactage plates, sur lesquelles la détermination de l'optimum paraît très difficile, l'inconvénient de cet essai, est qu'il ne permet pas d'établir la teneur en eau optimale.

#### IV-2-7- 2- Essais Proctor

Il existe deux types d'essais Proctor, essai Proctor normal et essai Proctor modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

#### IV-2-7-3-Comparaison entre les essais Proctor

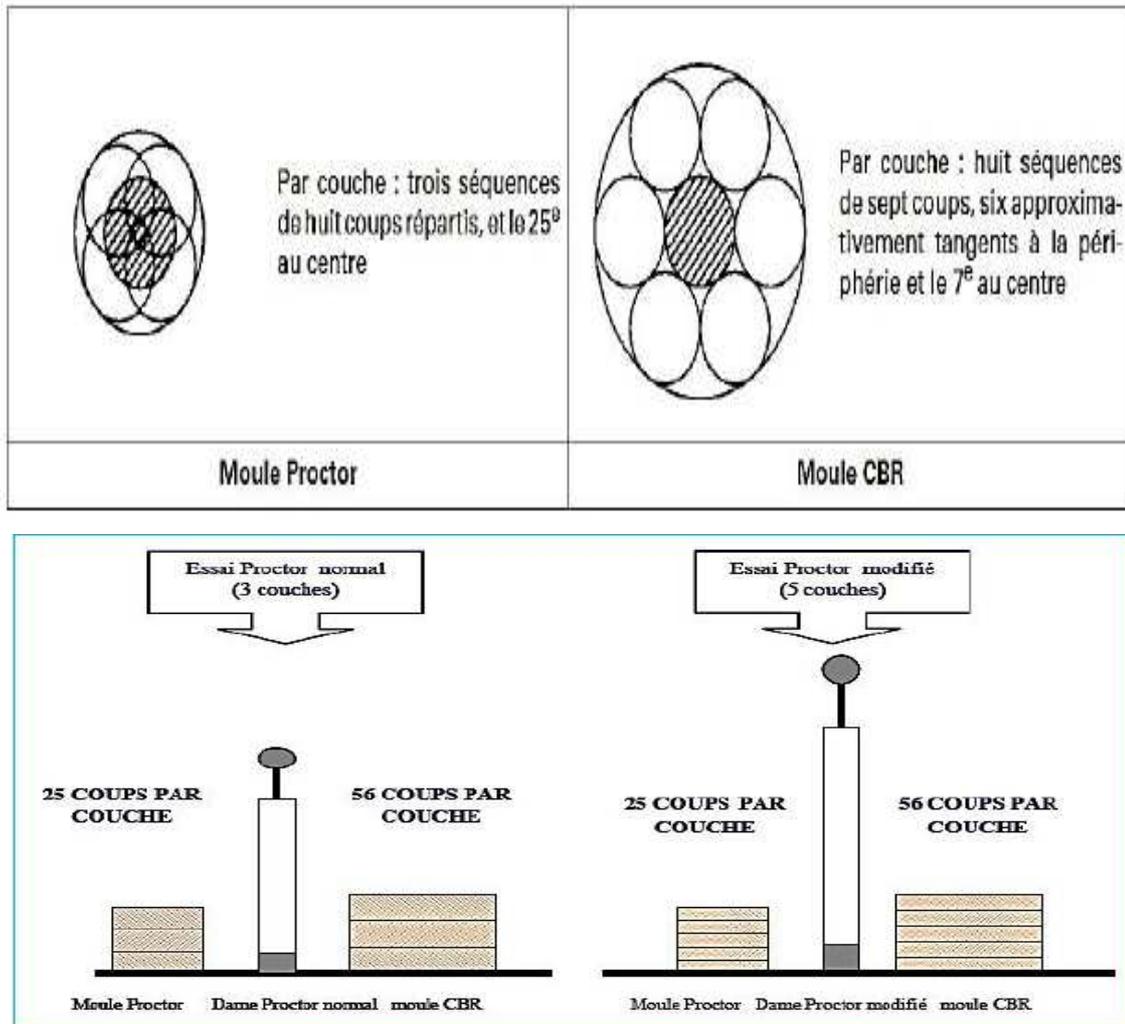
Le choix de l'intensité de compactage est fait en fonction de la surcharge que va subir l'ouvrage au cours de sa durée de vie :

**Essai Proctor normal** : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ou peu chargé,

**Essai Proctor modifié** : Forte résistance souhaitée, du type chaussée autoroutière.

Tableau IV-1 : les conditions des essais proctor (normal et modifié)

Essais	Masse du marteau (Kg)	Hauteur de chute du marteau (cm)	Nombre de couches	Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	Nombre de coups par couche	Energie de compactage (KJ/m <sup>3</sup> )
<b>Proctor Normal</b> (Norme NQ 2501-250)	2,49	30,5	3	944	25	592
				2 124	56	589
<b>Proctor Modifié</b> (Norme NQ 2501-255)	4,54	45,7	5	944	25	2 695
				2 124	56	2 683



FigureIV-6 : comparaison entre les essais Proctor (normal et modifié).

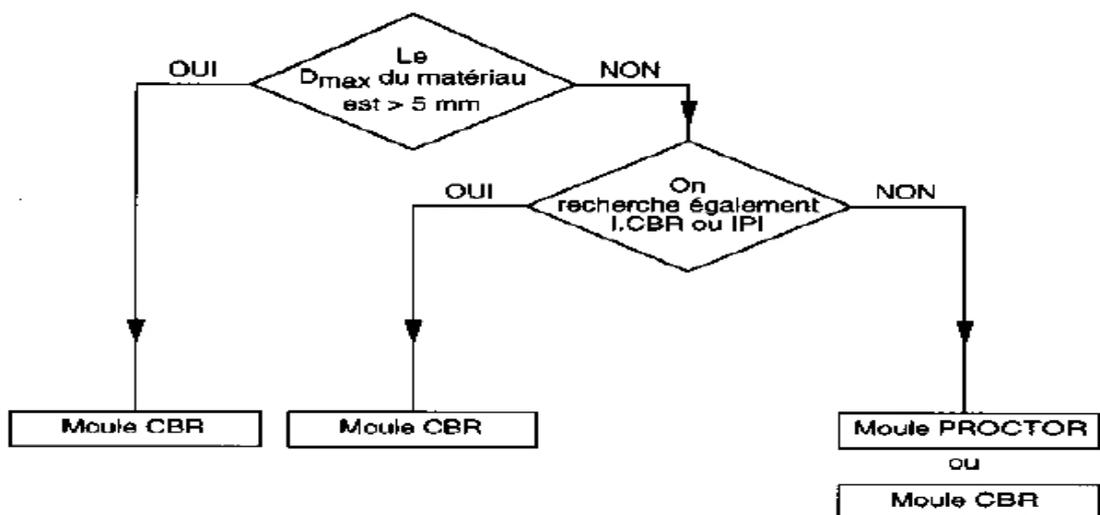


Figure IV-7: Choix du type de moule proctor.

## **IV-2-8-Essai Proctormodifie**

### **IV-2-8-1-But de l'essai Proctor**

D'après la norme française (NF P94-093) qui concerne l'essai permettant de déterminer les caractéristiques de compactages d'un matériau ;

L'essai Proctor modifié a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et à des conditions de compactage fixées, qui conduit au :

- meilleur compactage possible ;
- capacité portante maximale ;

### **IV-2-8-2-Le mode opératoire**

Il consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon du sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage.

**Préparation de l'échantillon :** dans notre étude on a réalisé l'essai Proctor modifié 4 à 5 fois de suite pour avoir une courbe Proctor modifié sur des échantillons portés à différentes teneur en eau (on augmentant de 2% la teneur en eau de départ) ; nous avons préparé des quantités de marne argileuse selon une granulométrie de classe (0 – 20 mm) ainsi des quantités des débris du verre concassé selon une granulométrie choisie de classe (0-20mm) .

### **IV-2-8-3-Exécution de l'essai**

-nous réalisons l'essai Proctor modifié l'échantillon témoin qu'est la marne toute seule après on le réalise avec les mélanges (marne +%verre) nous suivons les étapes suivantes :

- Assembler moule CBR + embase (essai Proctor modifié) ;
- Introduire la première couche et la compacter, dont le moule est placé sur un socle de béton pour que l'énergie de compactage appliquée transmette directement à

l'échantillon ;

- Recommencer l'opération pour chaque couches dont on a 5 couches à compactés dans un essai Proctor modifié, chaque une a 55 coups ;

- Après compactage de la dernière couche, enlever la rehausse et le sol compacté dans le moule doit dépasser le moule de 1 cm environs, sinon on répète l'essai.

- Araser soigneusement à partir du centre en suite peser l'échantillon juste arasé après avoir démoulé l'échantillon le montre la figure suivante ;

- Augmenter de 2% la teneur en eau  $w$  de votre échantillon de départ et recommencer l'essai 4 à 5 fois de suite; dans le but d'avoir une courbe Proctor ;

#### IV-2-8-4- Expression des résultats

On trace la courbe de densité sèche en fonction de la teneur en eau ( $\gamma_d = f(w)$ )

- La teneur en eau  $w$  (%) :  $W = ((M_h - M_s) / M_s) * 100\%$

$M_h$  : masse de l'échantillon humide compacté après l'arasement et le démoulage (g) ;

$M_s$  : masse de l'échantillon après passage à l'étuve pendant 24h à une température de 75°C exprimée (g) ;

- La masse volumique sec  $\gamma_d$  (g/cm<sup>3</sup>) :  $\gamma_d = M_s / V$

$M_s$ : masse de l'échantillon compacté après passage à l'étuve pendant 24h à une température de 75°C;

$V$  : le volume du moule CBR ( $V = 2124 \text{ cm}^3$ ) ;

#### IV-2-8-5-La représentation et interprétation des résultats

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et des courbes Proctor comme indiqué ci dessous :

## 1- Les tableaux

<b>Tableau IV-2 : Résultats de l'essai Proctor pour 0% du verre</b>					
N° de l'essai	1	2	3	4	5
% d'eau ajouté	8.5	10.5	12.5	14.5	16.5
densité sèche $\gamma_d$	1.82	1.84	1.88	1.88	1.825
teneur en eau w ( %)	10.4	10.7	11.5	12.3	13.4

<b>Tableau IV-3 : Résultats de l'essai Proctor pour 10% du verre</b>					
N° de l'essai	1	2	3	4	5
% d'eau ajouté	8.5	10.5	12.5	14.5	16.5
densité sèche $\gamma_d$	1.93	1.961	2.018	1.98	1.93
teneur en eau w ( %)	4.3	4.7	5.7	6.5	7.2

<b>Tableau IV-4 : Résultats de l'essai Proctor pour 20% du verre</b>					
N° de l'essai	1	2	3	4	5
% d'eau ajouté	8.5	10.5	12.5	14.5	16.5
densité sèche $\gamma_d$	1.945	1.98	2.044	1.988	1.95
teneur en eau w ( %)	3	3.5	4.9	6.1	7

<b>Tableau IV-5 : Résultats de l'essai Proctor pour 30% du verre</b>					
N° de l'essai	1	2	3	4	5
% d'eau ajouté	8.5	10.5	12.5	14.5	16.5
teneur en eau w ( %)	5	5.58	6.5	7.4	7.8
densité sèche $\gamma_d$	1.95	1.974	1.997	1.97	1.95

<b>Tableau IV-6 : Résultats de l'essai Proctor pour 40% du verre</b>					
N° de l'essai	1	2	3	4	5
% d'eau ajouté	8.5	10.5	12.5	14.5	16.5
densité sèche $\gamma_d$	1.942	1.966	1.989	1.961	1.94
teneur en eau w ( %)	5.36	6	7.3	8.1	8.5

2- les courbes proctor modifié

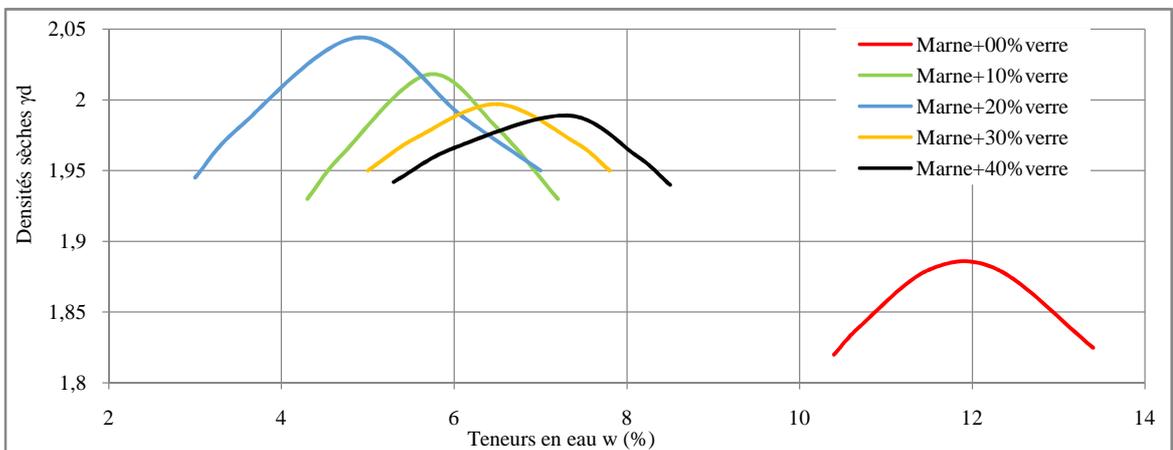
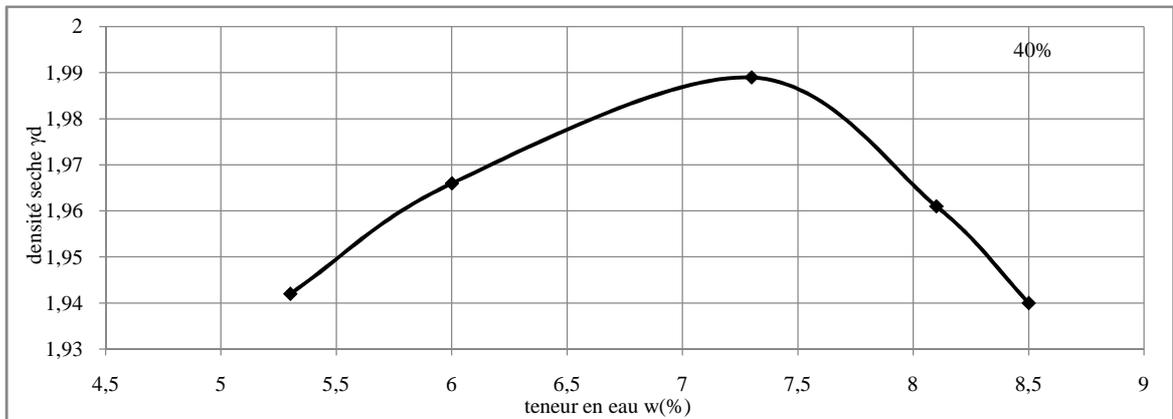
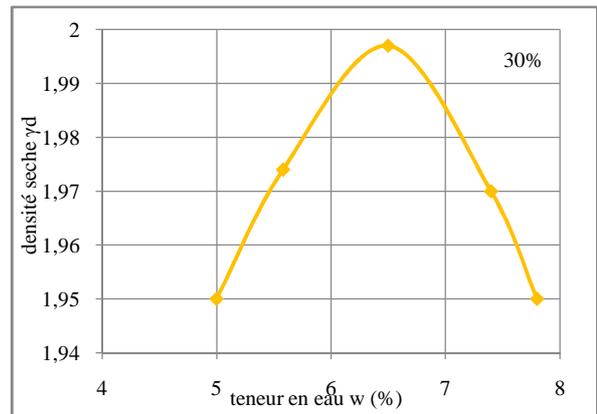
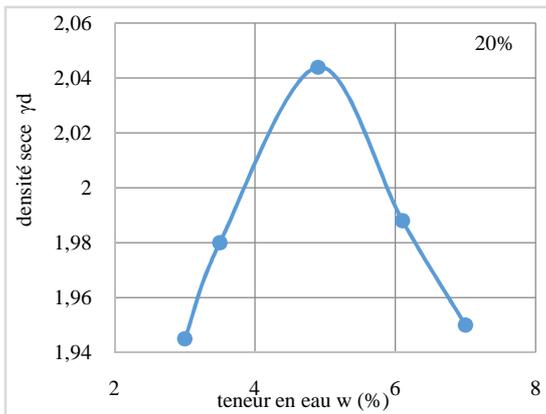
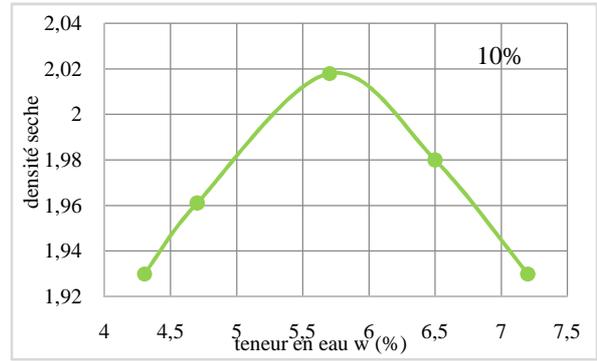
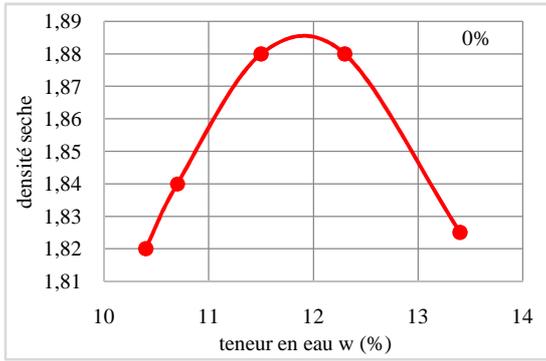


Figure IV-9 : les courbes proctore modifiées selon les différents pourcentages de verre. Les courbes Proctor des différents mélanges se distinguent clairement de la courbe correspondante à la marne seule. Ceci, montre l'influence sensible de l'ajout du verre sur le comportement au compactage des mélanges.

Les courbes présentent généralement une forme bombée, ce qui est signe de sensibilité à l'eau. Toutefois, les mélanges deviennent moins sensibles à l'eau avec l'ajout du verre. En effet, la courbe correspondante à 40 % de verre paraît moins bombée relativement aux autres courbes.

Tableau IV-7: les valeurs des optimums proctor ( $W_{opt}$  et  $\gamma_{dopt}$ )

Essai proctore modifié	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche optimale
0%	11,9	1,881
10%	5,7	2,018
20%	4,9	2,044
30%	6,5	1,997
40%	7,3	1,989

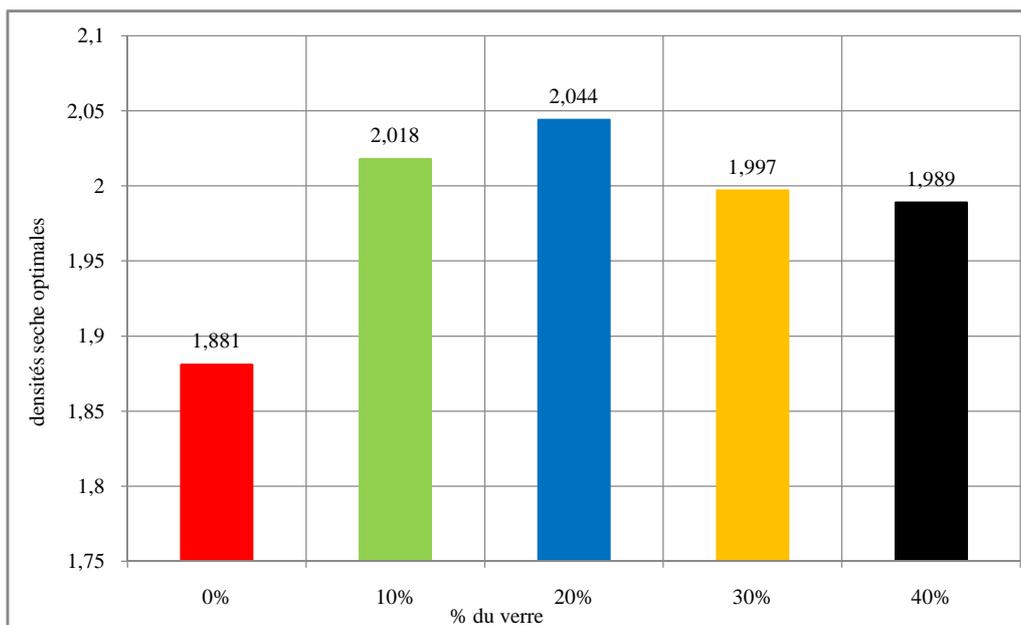


Figure IV-9 : densités sèches optimales des différents mélanges.

L'histogramme représenté ci-dessus, montre que l'ajout du verre améliore sensiblement les densités sèches maximales des mélanges. En effet, une teneur en verre de 10 à 20% fait augmenter la densité de 1,88 à 2,04. Au-delà de 20% de verre, les densités commencent à diminuer, néanmoins, elles restent supérieures à celles développées par la marne seule.

La proportion de 20% de verre peut être considérée comme teneur optimale offrant au mélange la densité sèche optimale possible. Cette proportion paraît adéquate pour combler les vides existants entre les grains de la marne et rendre le mélange plus dense.

En effet au cours du compactage, les débris de verre épousent facilement la forme des vides existants entre les grains de la marne, ils diminuent de ce fait leur proportion dans les mélanges et augmente par conséquent leurs densités.

Un excès de verre par contre, peut déstabiliser la structure des mélanges la plus dense et la rendre moins dense au compactage qui est le cas au de a de 20% du verre.

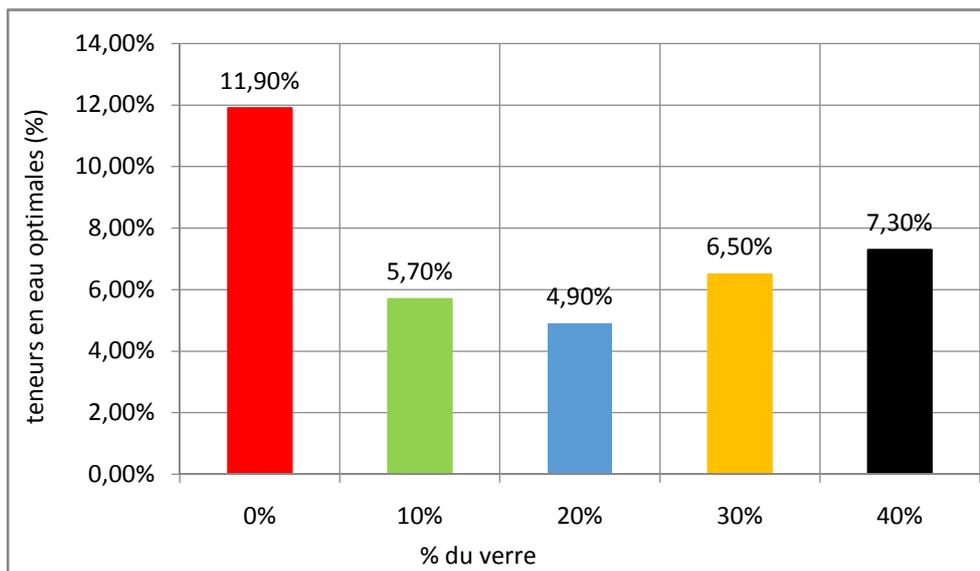


Figure IV-10 :teneurs en eau optimales(tout les pourcentage du verre )

Les teneurs en eau diminuent sensiblement dès le premier ajout de verre. En effet, la teneur en eau diminue de plus de moitié avec des ajouts de verre de 10 à 20%. Ceci présente une économie d'eau très intéressante, notamment dans le cas des régions où l'eau est considérée comme une denrée rare. Au-delà de 20% de verre, la teneur en eau

commence à augmenter, du fait que le mélange présent des espaces vides de plus importants pouvant être remplis d'eau. Ceci concorde parfaitement avec les résultats obtenus dans le cas des densités sèches.

### **V-3-conclusion**

Les essais Proctor présentés dans ce travail ont permis d'étudier en fonction de la teneur en verre, l'aptitude au compactage des différents mélanges composés de la marne argileuse avec différents pourcentages de verre. Les résultats obtenus sont très intéressants et montrent que l'ajout du verre améliore sensiblement la densité sèche des mélanges, ce qui présente une meilleure aptitude au compactage.

Cependant, ces essais restent insuffisants pour valider l'utilisation de ces mélanges dans les corps de chaussées. Ils sont complétés par des essais de portances CBR, qui feront l'objet du chapitre suivant.

# **CHAPITRE V**

## **ESSAI DE PORTANCE CBR**

## V-1-Introduction

L'essai CBR est l'un des principaux essais routiers, il fut entrepris à l'origine par le département des routes de l'état de Californie peu avant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale.

Le corps des ingénieurs de l'armée américaine adopta cette méthode pendant la guerre puis la développa et l'améliora plus tard, elle fut utilisée pratiquement par tous les pays du monde entier.

Dans ce chapitre, en plus des différentes définitions, sont présentés les résultats d'essais CBR sur les différents mélanges avant et après immersion.

## V-2-But de l'essai

Cet essai a pour but, de déterminer la portance du sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées, c'est – à-dire sa résistance à la rupture (l'aptitude des matériaux à supporter les charges) ; cette caractéristique est indispensable dans les travaux routiers, en particulier pour la confection des remblais et les couches de forme, dans les quels on ne peut admettre que de faibles déformations.

Les essais CBR permettent, la détermination de :

-l'indice portant immédiat (IPI), pour évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins pendant la durée des chantiers.

-l'indice CBR immédiat (CBR immédiat), c'est pour déterminer la portance du matériau sous les surcharges de la chaussée ;

-l'indice CBR après immersion (CBR immersion), c'est pour déterminer la portance du matériau sous les plus mauvaises conditions hygrométriques (présence d'eau).

L'indice recherché, est un nombre sans dimension, exprimé en pourcentage, définit le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans le matériau type d'autre part.

### V -3-Principe de l'essai

Au cours de cet essai, le matériau est poinçonné par un piston de 19.35cm<sup>2</sup> de section, enfoncé à une vitesse constante de 1.27mm/mn. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2.5 et 5 mm, sont alors rapportées aux valeurs (13.35 et 20 Kn) qui sont les forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

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

$$I(2,5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5mm d'enfoncement (en KN)} \times 100}{13,35}$$

$$I(5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 5mm d'enfoncement (en KN)} \times 100}{20}$$

La capacité portante du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est plus élevé.

Remarque : dans le cas de l'essai CBR immersion nous allons calculer:

1- le gonflement linéaire relatif :  $G = (\Delta h/h) * 100\%$

$\Delta h$  : gonflement mesuré (mm) ;

H : hauteur initiale de l'éprouvette, soit 116.4mm ;

2- la teneur en eau après immersion  $W_{imm} = ((M_h - M_s) / M_s) * 100\%$

$M_h$  : masse de l'échantillon humide (g) ;

$M_s$  : masse de l'échantillon sec (g) ;

### V-4-Le mode opératoire

Les essais portant immédiat et l'essai CBR après immersion, sont réalisés au laboratoire selon la norme française (NF P 94 -078).

#### V-4-1-Appareillage

##### V-4-1-1-Matériel de confection

-le moule CBR et le matériau de compactage (Proctor normal et modifié), avec l'ensemble des accessoires (rehausse, disque d'espacement, règle à araser ...), et le matériel d'usage courant : balance, bacs, étuve, ... ;



FigureV-1 :le matériel de confection

#### V -4-1-2-Matériel de poinçonnement

Il comprend une presse de compression de 50 KN minimum et de 60mm de course, équipée d'un poinçon cylindrique en acier de 19.35 cm<sup>2</sup>de section et de 20cm de longueur ;

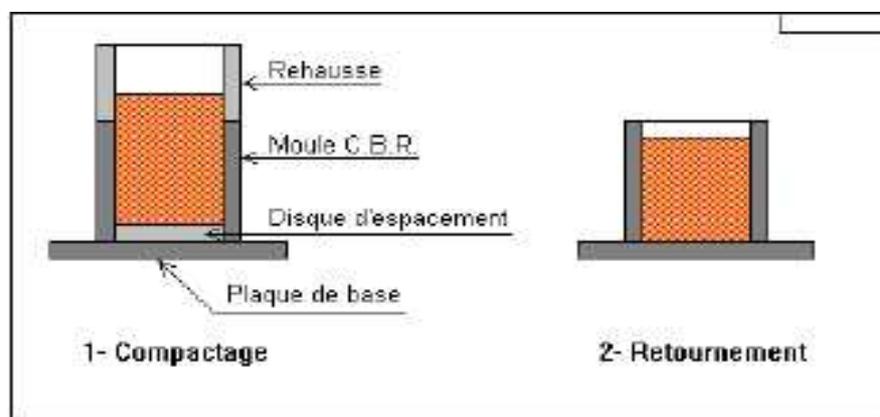


FigureV-2 :le matérièl de poinçonnement

#### V -4-2-Déroulement de l'essai

##### V-4-2-1-Confection des éprouvettes

-les éprouvettes soumissent à l'essai sont compactées selon le processus du Proctor modifié ;



FigureV-3 :le confection des éprouvettes

#### V-4-2-2-Exécution de poinçonnement

Après avoir placé l'ensemble sur la presse en position centrée par rapport au piston, on procède au poinçonnement de la manière suivante :



Figure V-4: L'exécution et le résultat du poinçonnement

#### V-4-2-3-Détermination de l'indice portant immédiat (IPI)

- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston jusqu'à ce qu'il vienne affleurer le matériau au centre ;
- régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du poinçon ;
- exécuter le poinçonnement en maintenant une vitesse de pénétration à 1.27 mm/min ;
- noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements de 0.625 ; 1.25 ; 2 ; 2.5 ; 5 ; 7.5 et 10mm et arrêter le poinçonnement à cette valeur.

#### V-4-2-4- Représentation et interprétation des résultats

##### 1-les tableaux

TableauV-1 :résultats de l'essai CBR (marne +0% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	63	1.4449
1.25	106	2.4311
2	149	3.4174
2.5	174	3.9908
5	255	5.8114
7.5	300	6.7982
10	327	7.3903

TableauV-1 :résultats de l'essai CBR (marne +10% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	212	4.8623
1.25	344	7.7631
2	451	10.1101
2.5	500	11.1894
5	645	14.3832
7.5	720	16.0307
10	795	17.6754

TableauV-2 :résultats de l'essai CBR (marne +20% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	290	7.2807
1.25	322	11.6519
2	521	13.8766
2.5	560	14.6255
5	602	20.4545
7.5	656	23.6796
10	1071	25.7805

TableauV-3:résultats de l'essai CBR(marne +30% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	180	4.1055
1.25	255	5.8114
2	370	8.3333
2.5	490	10.9691
5	810	18.0043
7.5	870	19.3201
10	937	20.7792

TableauV-4 :résultats de l'essai CBR(marne +40% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	150	3.4403
1.25	225	5.1535
2	299	6.7763
2.5	325	7.3464
5	411	9.2324
7.5	459	10.2863
10	495	11.0792

## 2-le calcul de l'IPI

$$I_{(2,5)} = \frac{\text{Effort de penetration a 2,5mm d'enfoncement(en KN)X100}{13,35}$$

$$I_{(5)} = \frac{\text{Effort de penetration a 5mm d'enfoncement(en KN)X100}{20}$$

Puis on prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

### 1-marne +0% du verre :

$$I_{(2,5)} = \frac{3.9908 \times 100}{13,35} = 29.894\%$$

$$I_{(5)} = \frac{5.8114 \times 100}{20} = 29.057\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

**L'indice portant immédiat IPI=29.894%**

**2-marne +10% du verre :**

$$I_{(2,5)} = \frac{11.1894 \times 100}{13,35} = 83.816\%$$

$$I_{(5)} = \frac{14.3832 \times 100}{20} = 71.916\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

**L'indice portant immédiat IPI=83.916%**

**3-marne +20% du verre :**

$$I_{(2,5)} = \frac{14.6255 \times 100}{13,35} = 109.55\%$$

$$I_{(5)} = \frac{20.4545 \times 100}{20} = 102.27\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

**L'indice portant immédiat IPI=109.55%**

**4-marne +30% du verre :**

$$I_{(2,5)} = \frac{10.9691 \times 100}{13,35} = 82.166\%$$

$$I_{(5)} = \frac{18.0043 \times 100}{20} = 90.022\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

**L'indice portant immédiat IPI=90.022%**

**5-marne +40% du verre :**

$$I_{(2,5)} = \frac{7.3464 \times 100}{13,35} = 55.092\%$$

$$I_{(5)} = \frac{9.2324 \times 100}{20} = 46.162\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

L'indice portant immédiat IPI=55.092%

### 3- les courbes CBR

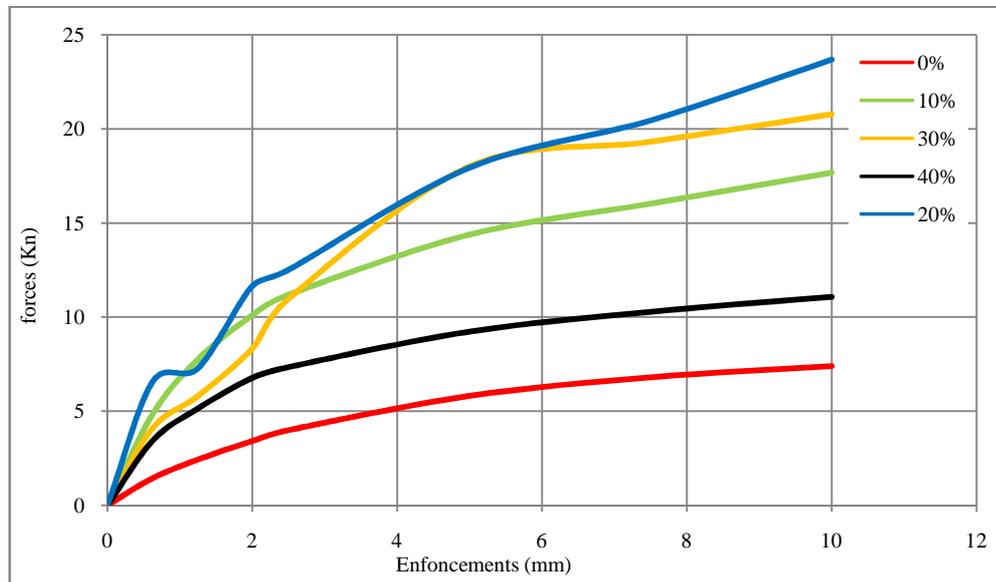


Figure V-5 : Les courbes CBR des différents mélanges

La figure ci-dessus montre l'évolution des forces en fonction des enfoncements des différents mélanges en fonction de leur teneur en verre. Les courbes sont dispersées les unes des autres. Ceci montre l'influence sensible du verre sur le comportement au poinçonnement des mélanges.

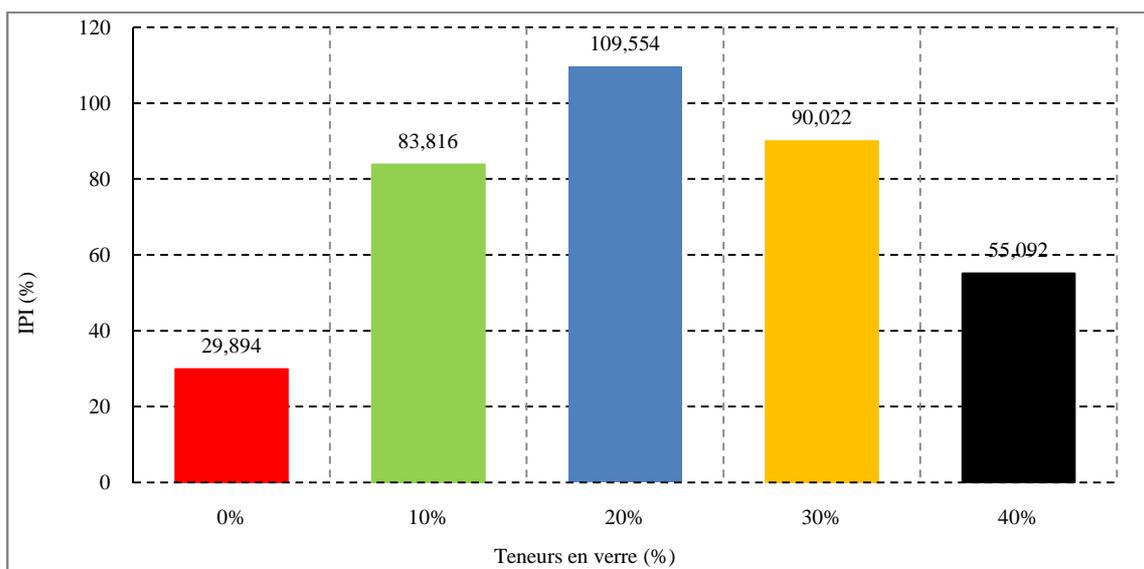


Figure V-6: l'indice portant immédiat (IPI) pour les différents mélanges

En effet, la présence des débris du verre améliore sensiblement la portance immédiate des mélanges. Elle est pratiquement triplée à 20% de verre relativement à la marne seule. Les débris de verre présente un renforcement de la structure granulaire de la marne ce qui augmente sa résistance au poinçonnement. Cette portance maximale correspond au mélange ayant développé la densité sèche maximale au cours des essais Proctor. Ainsi la portance des mélanges est liée fortement à leurs densités.

Au-delà de 20% de verre, les mélanges commencent à perdre de leurs portances, toutefois, elles restent plus importante que la portance de la marne seule et vérifient largement les exigences des normes en vigueur.

#### **V-4-2-5-détermination de l'indice CBR immersion**

##### **V-4-2-5-1-l'émersion et le but d'imbibition**

-placer un papier filtre à la surface puis disposer au-dessus le disque de gonflement et les surcharges comme indiqué précédemment ; fixer le trépied support de comparateur sur le bord supérieur du moule et positionner le comparateur au centre du trépied ;

-placer l'ensemble dans le bac d'immersion de telle sorte que l'eau recouvre de 1 à 2 cm l'éprouvette et effectuer la mise à zéro du comparateur ;

-après 4 jours (96 heures) d'immersion, mesurer la hauteur de gonflement  $\Delta h$  indiquée par le comparateur et laisser égoutter quelques minutes et déposer le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement ;

-placer l'ensemble sur la presse, et replacer les surcharges comme précédemment et procéder au poinçonnement.

But de l'imbibition : Le but de cette opération est de placer le sol (matériau) dans les plus mauvaises conditions hygrométriques qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique ;

pour un terrain particulièrement sec ne risquant, ni de subir des remontées d'eau (nappe phréatique profonde), ni de recevoir des eaux pluviales (climat très sec ou revêtement étanche), on peut se dispenser de cette imbibition et faire l'essai à la teneur en eau optimale obtenue par le Proctor modifié mais pour un terrain pouvant subir de fortes remontées d'eau, ou des inondations, ou recevoir les pluies d'un climat très humide, on procède à une imbibition complète (jusqu'à ce que la variation d'épaisseur de l'échantillon devienne

inférieure à 0.03 mm par 24 heures) ,dans les autres cas c'est - à dire les plus fréquents, on imbibe l'échantillon pendant 4 jours (96 heures), et on note le gonflement.



Figure V-7 :L'exécution du poinçonnement et de l'immersion.

#### V-4-2-5-1-Representation et interprétation des résultats

Tableau V-7 :résultats de l'essai CBR immersion(marne +0% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	20	0.458
1.25	50	1.146
2	70	1.605
2.5	80	1.834
5	180	4.128
7.5	250	5.733
10	300	6.880

Tableau V-7 :résultats de l'essai CBR immersion(marne +10% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	50	1.146
1.25	120	2.752
2	160	3.669
2.5	200	4.587
5	370	8.486
7.5	500	11.467
10	620	14.220

TableauV-8:résultats de l'essai CBR immersion (marne +20% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	30	0.688
1.25	70	1.605
2	110	2.522
2.5	150	3.440
5	240	5.504
7.5	370	8.486
10	450	10.321

TableauV-9 :résultats de l'essai CBR immersion (marne +30% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	63	1.4449
1.25	106	2.4311
2	149	3.4174
2.5	174	3.9908
5	255	5.8114
7.5	300	6.7982
10	327	7.3903

TableauV-10:résultats de l'essai CBR immersion(marne +40% du verre )

L'enfoncement en (mm)	Lectures Forces (divisions)	Forces (kn)
0.625	20	0.0458
1.25	90	0.2064
2	150	0.3440
2.5	200	4.587
5	340	7.798
7.5	460	1.0550
10	550	1.2614

## 2-le calcule de l'indice CBR immersion

$$I_{(2,5)} = \frac{\text{Effort de penetration a 2,5mm d'enfoncement(en KN)} \times 100}{13,35}$$

$$I_{(5)} = \frac{\text{Effort de penetration a 5mm d'enfoncement(en KN)} \times 100}{2}$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

### 1-marne +0% du verre

$$I_{(2,5)} = \frac{1.834 \times 100}{13,35} = 13.737\%$$

$$I_{(5)} = \frac{4.128 \times 100}{20} = 20.64\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$  :

$$\boxed{\text{L'indice CBR immersion} = 20.64 \%}$$

### 2-marne +10% du verre

$$I_{(2,5)} = \frac{4.8623 \times 100}{13,35} = 36.42 \%$$

$$I_{(5)} = \frac{8.9912 \times 100}{20} = 44.956 \%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

$$\boxed{\text{L'indice CBR immersion} = 44.956 \%}$$

### 3-marne +20% du verre

$$I_{(2,5)} = \frac{4.587 \times 100}{13,35} = 34.359\%$$

$$I_{(5)} = \frac{8.486 \times 100}{20} = 42.43\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

$$\boxed{\text{L'indice CBR immersion} = 42.43\%}$$

### 4-marne +30 % du verre

$$I_{(2,5)} = \frac{4.0137 \times 100}{13,35} = 30.065\%$$

$$I_{(5)} = \frac{6.0526 \times 100}{20} = 30.263\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

L'indice CBR immersion=30.263 %

### 5-marne +40% du verre

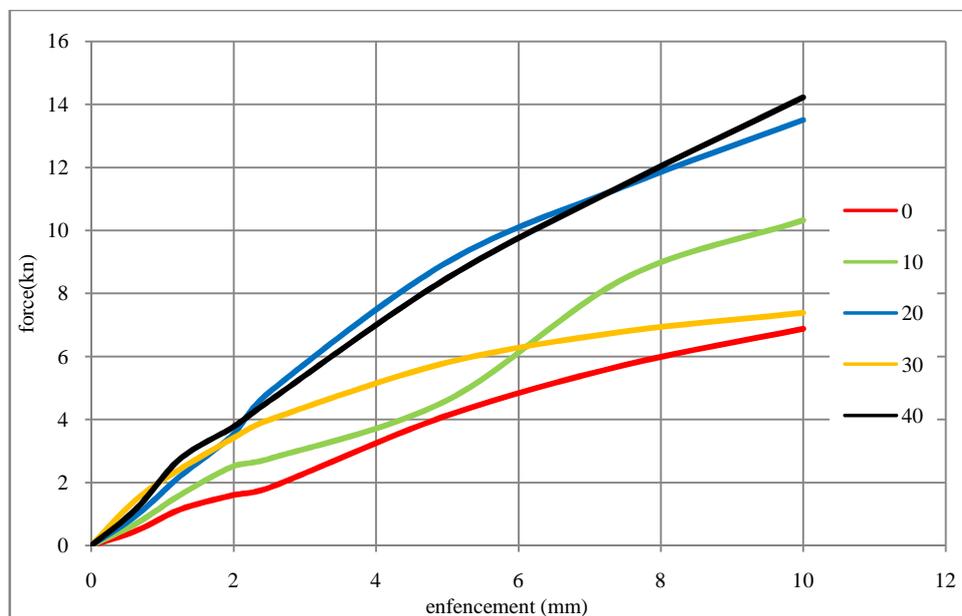
$$I_{(2,5)} = \frac{3.440 \times 100}{13,35} = 25.767\%$$

$$I_{(5)} = \frac{5.504 \times 100}{20} = 27.52\%$$

On prend la plus grande des deux valeurs  $I_{(2,5)}$  et  $I_{(5)}$

L'indice CBR immersion=27.52%

### 3-les courbes



FigureV-8: les courbes d'essais CBR immersion pour les différents mélanges

La figure montre les résultats des essais CBR après immersion, traduisant la portance des mélanges après immersion et représentant les plus mauvaises conditions hygrométriques.

Dans ce cas, les portances des mélanges diminuent sensiblement comparativement aux essais CBR immédiat.

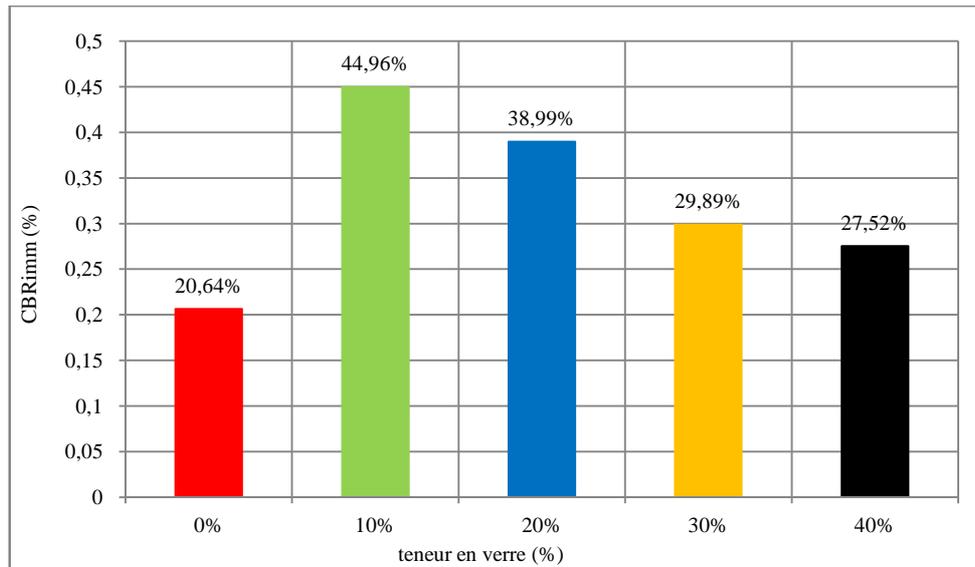


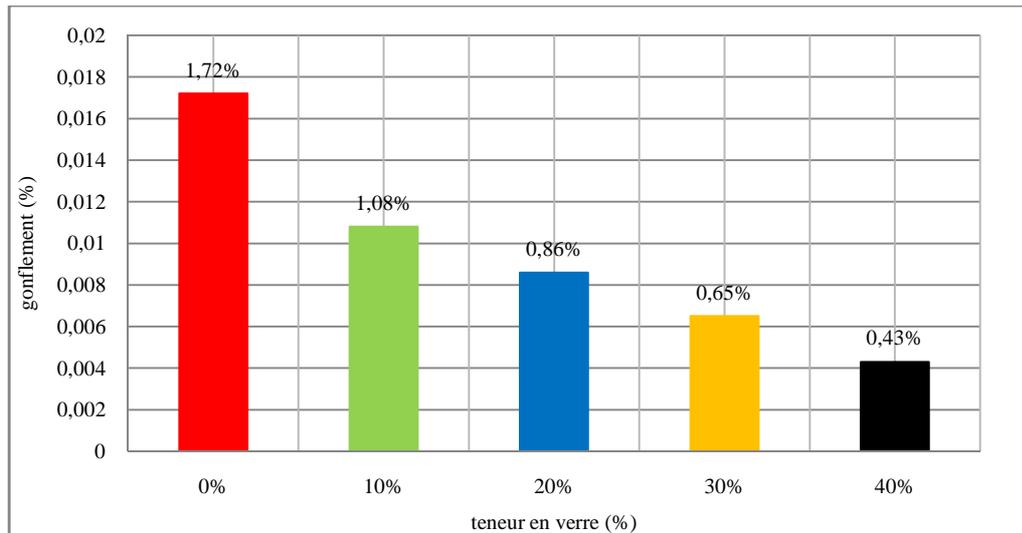
Figure V-9: les valeurs des indices  $CBR_{imm}$  pour les différents mélanges

Cependant, l'ajout du verre à des proportions de 10% à 20% présente des portances très intéressantes après immersion. En effet l'indice  $CBR_{imm}$  passe de 20.64% à 44.96% et présente la portance maximale relativement aux autres mélanges. Au-delà de cette proportion de verre, les mélanges commencent à perdre de leur portance.

Dans le tableau suivant nous avons récapitulé les résultats des essais de portance ( $CBR_{imm}$  ; IPI), ainsi les valeurs du gonflement linéaire (G) et les valeurs des teneurs en eau après immersion ( $W_{imm}$ ) pour les différents pourcentages du verre :

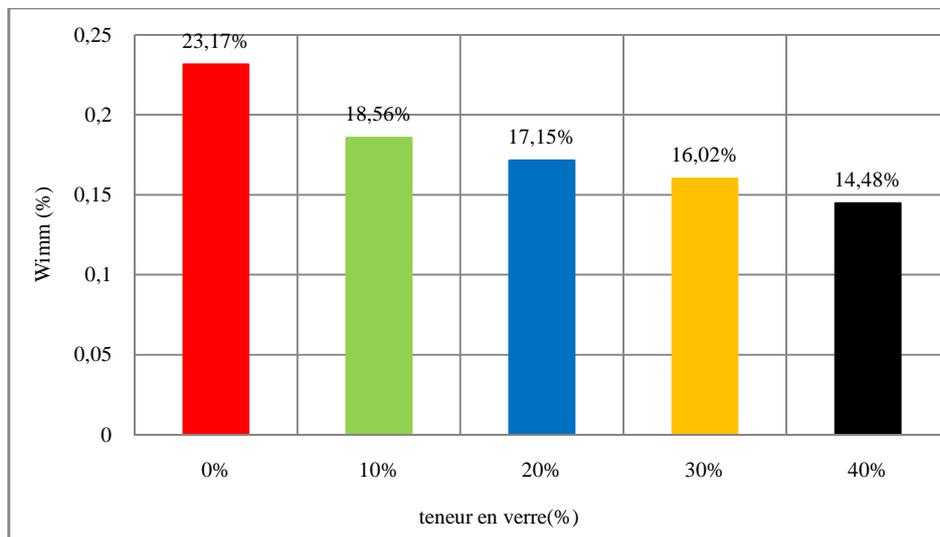
Tableau V-11: les résultats des essais de portance

essais	0%	10%	20%	30%	40%
IPI(%)	29.894	83.816	109.554	90.022	55.092
$CBR_{imm}$ (%)	20.64	44.96	38.99	29.89	27.52
G (%)	1.72	1.08	0.86	0.65	0.43
$W_{imm}$ (%)	23.17	18.56	17.15	16.02	14.48



FigureV-10: les valeurs de gonflement linéaire (G) pour les différents mélanges

Le gonflement des échantillons étudiés en présence d'eau diminue de plus en plus avec l'ajout du verre. En effet, contrairement à la marne, le verre est non sensible à l'eau, ainsi plus sa proportion est importante dans l'échantillon, plus la proportion de la marne diminue et par conséquent le gonflement diminue.



FigureV-11: les valeurs des teneurs en eau après immersion ( $W_{imm}$ ) pour les différents mélanges

Ces résultats sont confirmés par les teneurs en eau enregistrées après immersion (voir figure V-11), ces dernières diminuent de plus en plus avec l'ajout de verre. En effet, plus un matériau est gonflant, plus il emmagasine des quantités plus importantes d'eau.

#### **V-5- CONCLUSION**

À l'issue des essais de portance réalisés, nous constatons que les différents mélanges développent des portances immédiates très intéressantes, tandis que les portances développées après immersion sont relativement faibles avec des gonflements relatifs faibles avec l'ajout du verre. Cependant des proportions de 10 à 20% de verre peuvent être retenues comme acceptables pour ce type de sollicitations. En se basant sur ces résultats, les matériaux présentés peuvent proposer une utilisation routière dans le cas des chaussées de faible à moyen trafic.

L'étude de leur comportement sous un autre type de sollicitation, à savoir le cisaillement direct à la boîte fera l'objet du dernier chapitre suivant.

**Chapitre VI**  
**RESISTANCE AU CISAILLEMENT**  
**DES MATERIAUX ETUDIÉS**

## VI-1-Introduction

Dans tous les problèmes des sols (études des fondations, ouvrages de soutènement, remblais, etc....), il est nécessaire de connaître la résistance des sols. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsque il s'agit d'un sol cohérent. La résistance d'un sol peut être défini par nombreux critères : résistance à la compression simple, essai CBR...; le présent chapitre s'intéresse exclusivement à l'essai de cisaillement, dit à la boîte qui permet d'étudier la résistance au cisaillement d'un sol et d'en déduire ses caractéristiques mécaniques.

## VI-2-Définition et but de l'essai

Les sols sont constitués de particules indépendantes les unes des autres. Cependant, lorsque une force est appliquée dans le but de les déplacer les particules du sol s'y opposent. Cette résistance, engendrée par l'arrangement des particules, porte le nom de résistance au cisaillement. On la définit indirectement comme étant égale à la force qui doit être appliquée le long d'un plan de cisaillement entrainer le déplacement des particules. Cependant cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que se soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur le quel est construit l'ouvrage. En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation dans le plan de cette contrainte, on obtient le graphique suivant :

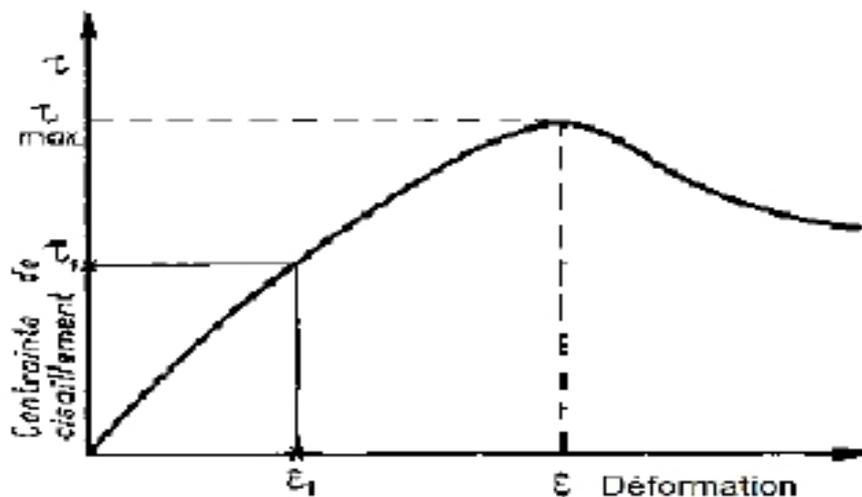


Figure VI-1 : Courbe de contraintes-déformations (LCPC, 1987).

A partir de ce graphique, la résistance au cisaillement peut être définie, comme étant le maximum de la contrainte de cisaillement ( $\tau_{max}$ ), ou bien la contrainte de

cisaillement correspondante à une déformation très grande, sauf dans des cas particuliers, on prendra comme résistance au cisaillement, le maximum de contrainte de cisaillement. L'essai de cisaillement est destiné à évaluer les caractéristiques mécaniques d'un sol (naturel, reconstitué ou artificiel), c'est-à-dire la cohésion (C) et l'angle de frottement interne ( $\phi$ ) à partir de la courbe intrinsèque.

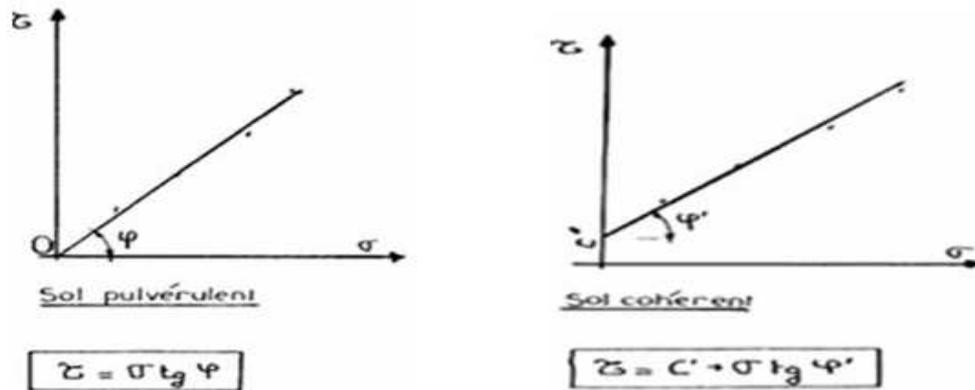


Figure VI-2 : Courbe intrinsèque pour les sols pulvérulents et les sols cohérents.

### VI-3-Différents types de l'essai

Trois types d'essai peuvent être définis suivant qu'il y a drainage ou non, consolidation ou non ; la consolidation consistant à charger l'échantillon en le drainant jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit totalement dissipée ( $u = 0$ ), (LCPC, 1987) :

**-essai non consolidé non drainé (UU)** : c'est un essai rapide, le plus couramment utilisé pour l'étude des sols ;

**-essai consolidé non drainé (CU)** : c'est un essai lent qui nécessite la consolidation de l'échantillon avant le cisaillement ;

**-essai consolidé drainé (CD)** : c'est un essai lent qui nécessite la consolidation de l'échantillon et le cisaillement à vitesse lente ;

### VI-4- Principe de l'essai

L'essai consiste à placer un échantillon de sol représentatif d'une quantité suffisante dans la boîte de cisaillement et soumettre la partie supérieure de l'échantillon à un effort vertical, résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale

respectivement de (100,200 et 300kPa), maintenue constante tout le long de l'essai .on applique ensuite à l'échantillon une charge horizontale, que l'on augmente jusqu'à la rupture.

Le plan de rupture se développe le long du plan horizontal imposé par le déplacement de la partie inférieure sur la partie supérieure de la boîte de cisaillement.

En première approximation, on peut supposer que dans le plan de séparation des deux demi boîtes la contrainte normale et la contrainte tangentielle sont constante (LCPC21, 1987).

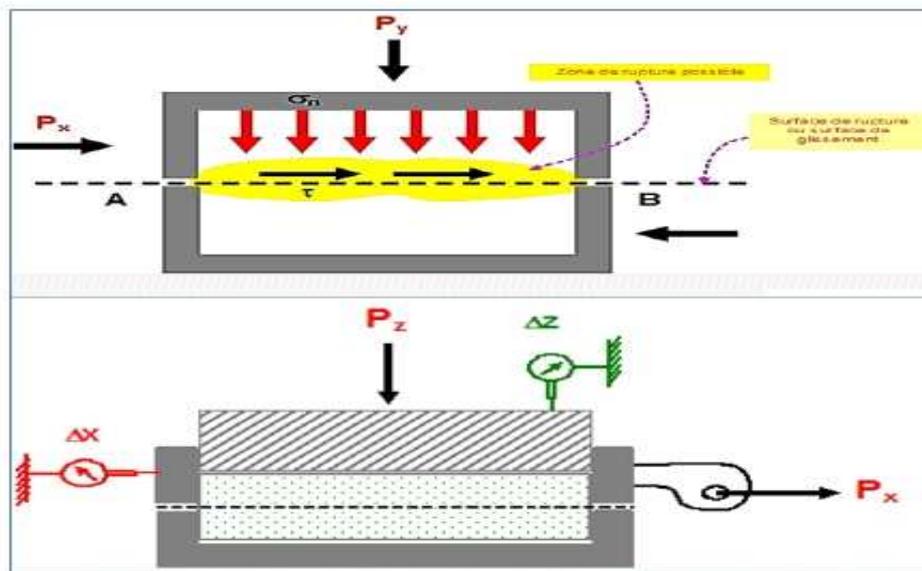


Figure VI-3: Illustration du principe de l'essai de cisaillement, (Magnan, 1991).

L'essai est réalisé en respectant les étapes suivantes:

- Régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement relatif constant entre les demi-boîtes, (1.5mm/mn) utilisée dans notre essai.
- Mettre tous les comparateurs à zéro (déplacement horizontale et verticale).

## VI-5-Appareillage

### 1-La boîte de cisaillement

Il existe différents modèles de boîte de cisaillement, dans laquelle est mise l'éprouvette ; une boîte de cisaillement comporte essentiellement :

- une demi-boîte inférieure, munie d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée ;
- une demi-boîte supérieure ; et un piston, muni à sa base d'une pierre poreuse plate, striée ou

dentée, glissant librement dans la demi-boîte supérieure et transmettant à l'éprouvette l'effort vertical exercé, et deux goupilles, solidarissant les demi-boîtes, avant l'essai.

Les dimensions intérieures des demiboîtes couramment utilisées sont de 6 x 6 cm.

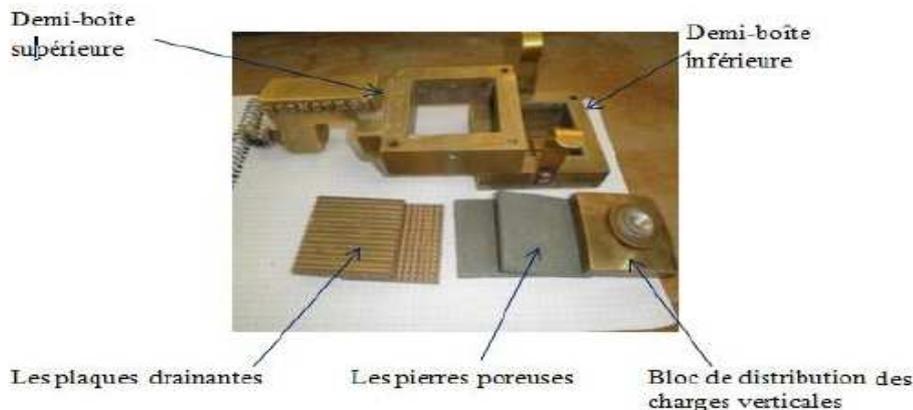


Figure VI-4 : La Boîte de cisaillement

## 2- Les bâtis de consolidation

Lorsque la consolidation ne se fait pas sur la machine de cisaillement, les bâtis de consolidation sont de même conception que ceux de la compressibilité. Ils comportent en plus une tige support de comparateur pour la mesure des tassements des éprouvettes d'essais.

## 3- Les poids

Ce sont des disques plats fondus, permettant leur centrage et leur superposition sur le plateau de charge de levier du bâti.

Chaque bâti de consolidation doit avoir sa série propre de poids de manière à pouvoir effectuer simultanément la consolidation de différentes séries d'éprouvettes d'essai sous les contraintes normales désirées.

## 4- La machine de cisaillement

La machine cisaille le sol à vitesse constante. Elle peut être manuelle, mais dans ce cas les essais à vitesse lente sont exclus. Elle est à moteur avec plusieurs vitesses. Elle comporte essentiellement :

- Un chariot porte-boîte entraîné horizontalement à vitesse constante entraînant lui-même la demi-boîte inférieure et l'éprouvette d'essai.

- Un anneau dynamométrique, retenant la demi-boîte supérieure dont les déformations indiquent les efforts tangentiels développés dans le plan de cisaillement
- Un système de levier étrier, appliquant sur le piston de la boîte les charges normales désirées à l'aide de différents poids.

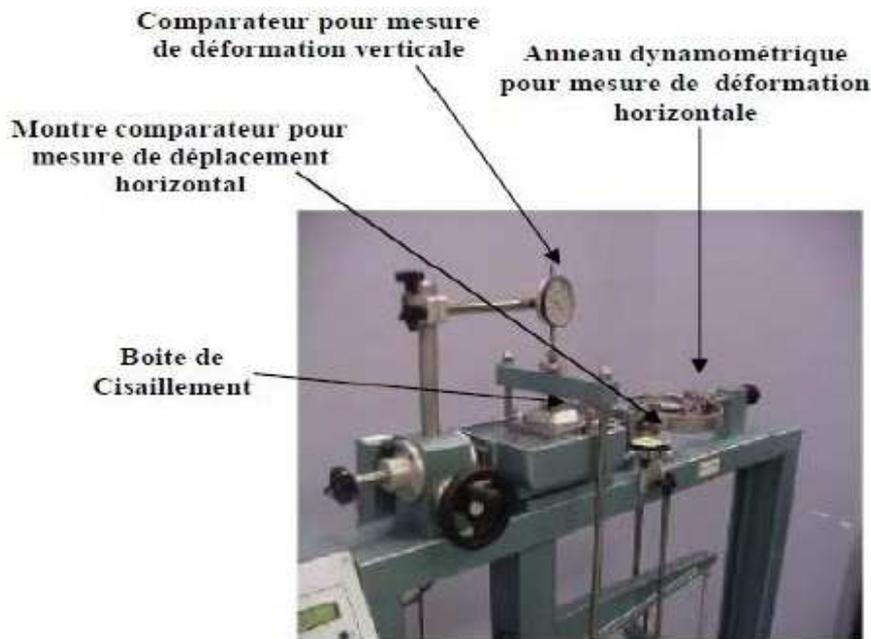


Figure VI-5 : l'appareillage complet de l'essai du cisaillement

### VI-6-Avantages

- Simple (la manipulation est facile) ;
- Rapide (la durée d'exécution courte) ;
- Economique (le coût n'est pas cher).

### VI-7-Inconvénients

- Contraintes et déformations ne sont connues que sur le plan de rupture ;
- Non uniformité de déformation dans le sol ;
- Frottement de deux demi-boîtes ;
- Pas de contrôle de la pression interstitielle.

### VI-8-Déroulement de l'essai

Après avoir préparé l'échantillon et mis dans la boîte de cisaillement il faut :

-mettre l'ensemble sur l'appareil et appliquer sur la face supérieure de l'échantillon un effort vertical, résultant des poids placés sur le plateau, engendrant ainsi une contrainte normale de (100, 200,300KPA), maintenue constante tout le long de l'essai ;

-régler la vitesse de la machine, de façon à imposer un déplacement horizontal relatif constant ;

-mettre tout les comparateurs (déplacement horizontale, déplacement vertical et force)à zéro ;

-Actionner la machine et prendre des lectures sur les trois comparateurs simultanément, à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15secondes).

La rupture est caractérisée par l'apparition du pic ou par l'existence d'un palier, ce qui permet d'arrêter l'essai après 4 à 5 lectures décroissantes ou stabilisées, si non, on arrête à la déformation horizontale maximale, correspondant à (1,4 cm) de déplacement.

Après avoir terminé l'essai, on convertit toutes les lectures obtenues sur les

Différents comparateurs en unités de calcul.

A la fin de l'essai nous allons suivre les étapes suivantes :

-Couper le moteur appuyant sur la touche « stop » ;

-Enlever les poids du plateau de charge ;

-Débloquer l'anneau dynamométrique ;

-Enlever la boîte de chariot de la machine ;

-Sortir l'échantillon de la boîte ;

-Prendre au besoin une photo ;

-Nettoyer les pierres poreuses ;

-Bien nettoyer les boîtes de cisaillement.

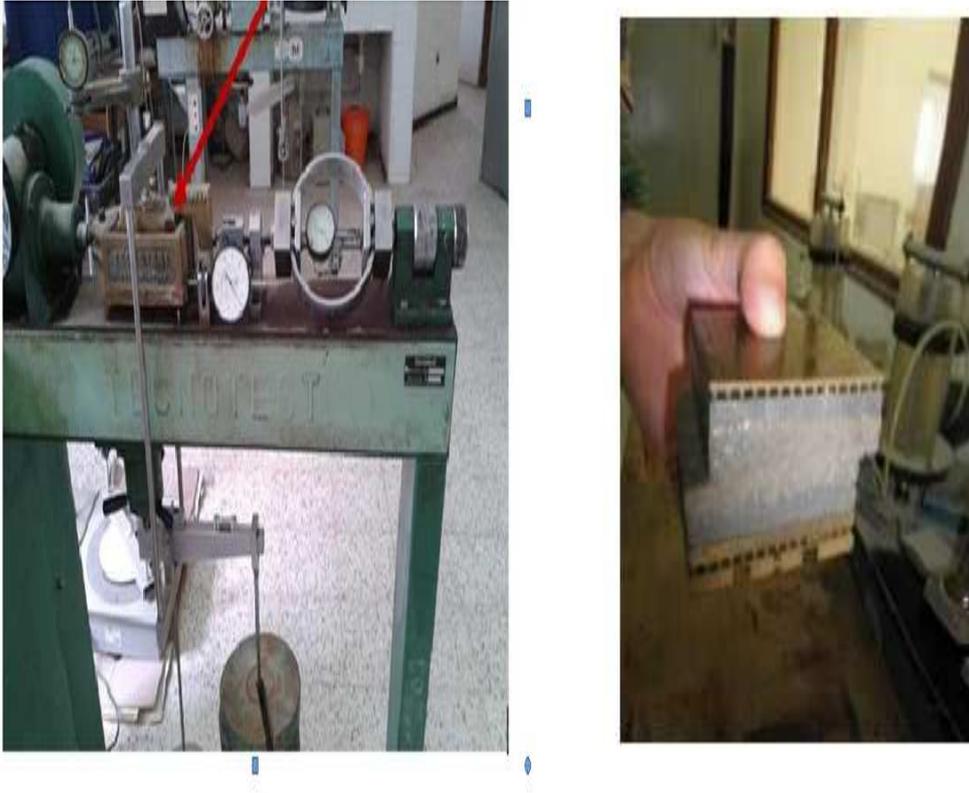


Figure VI-6-: le matériau après cisaillement

### VI-9-Expression des résultats

Les lectures obtenues sur les différents comparateurs, sont converties en unités de calcul

Comme suit :

La section corrigée:  $SC = L (L - \Delta L)$  (mm<sup>2</sup>)

Avec : L: longueur de la boite de cisaillement, L= 60 mm ;

$\Delta L$ : déplacement horizontal en mm;

La contrainte tangentielle :  $\tau = (La * k) / Sc$  (KPA)

Avec : La: force de cisaillement (dan) ;

K : coefficient de la machine de cisaillement (sans dimension) ;

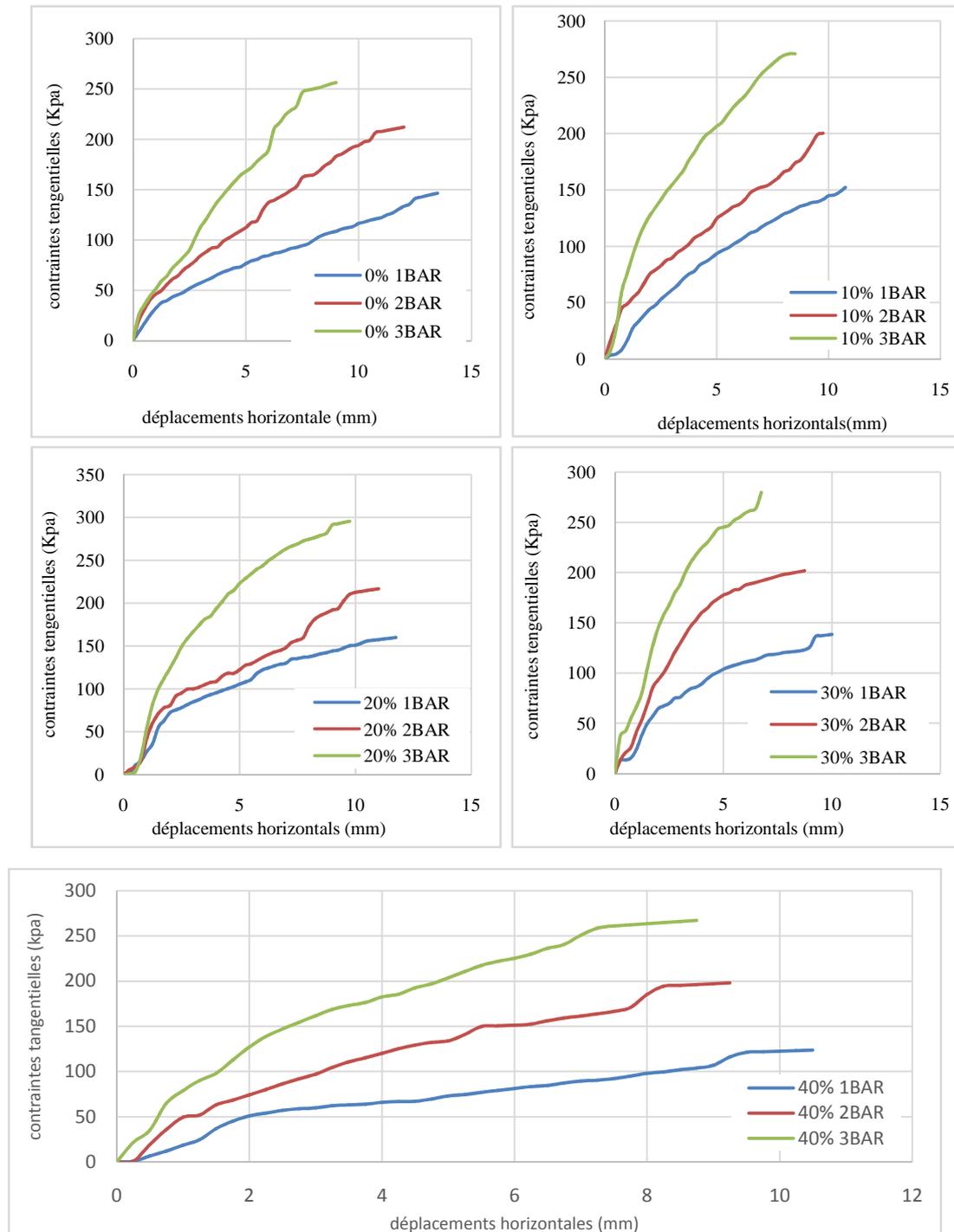
Sc : section corrigée (m<sup>2</sup>) ;

**VI-10-représentation des résultats**

**VI-10-1-Courbe contrainte déformation  $\tau = f(\Delta h)$**

$\Delta h$  : étant la déformation horizontale (mm) ;

$\tau$  : étant la contrainte tangentielle (kpa) ;



FigureVI-7 : les courbes contraintes tangentielles en fonction des déformations horizontales pour les différents mélange selon la charge appliqué

VI-10-2- Courbe de  $\Delta_v = f(\Delta_h)$

Avec  $\Delta_v$  : étant la déformation verticale (mm)

$\Delta_h$  : étant la déformation horizontale (mm)

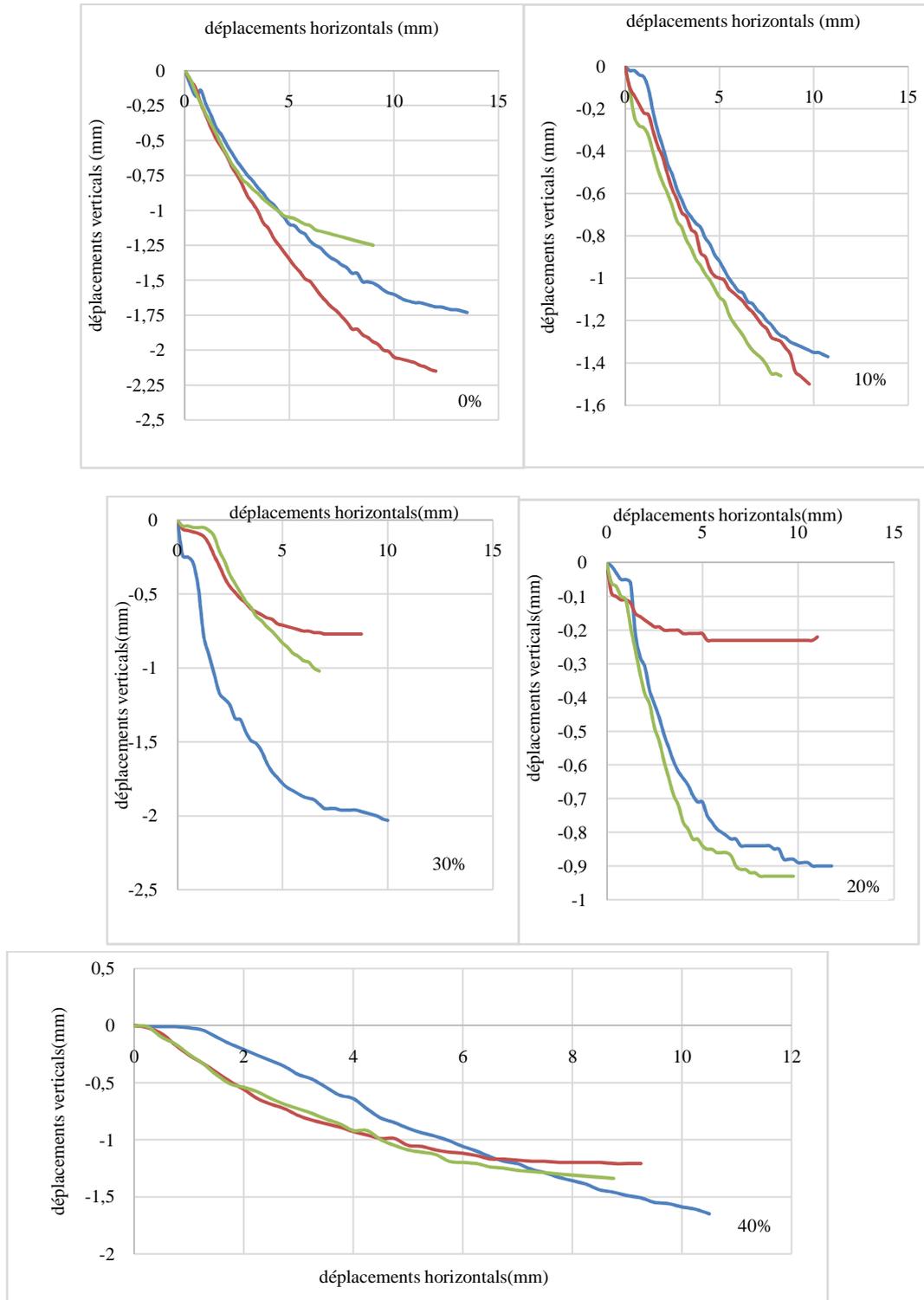


Figure VI-8 : les courbes des déformations verticales en fonction des déformations Horizontales pour les différents mélanges

**VI-10-3-Courbe intrinsèque  $\tau = f(\sigma)$**

Nous reproduisons l'essai sur plusieurs éprouvettes, pour différentes valeurs de la contrainte normale  $\sigma$  (qui a les valeurs de 100Kpa ;200Kpa et300Kpa ) ;

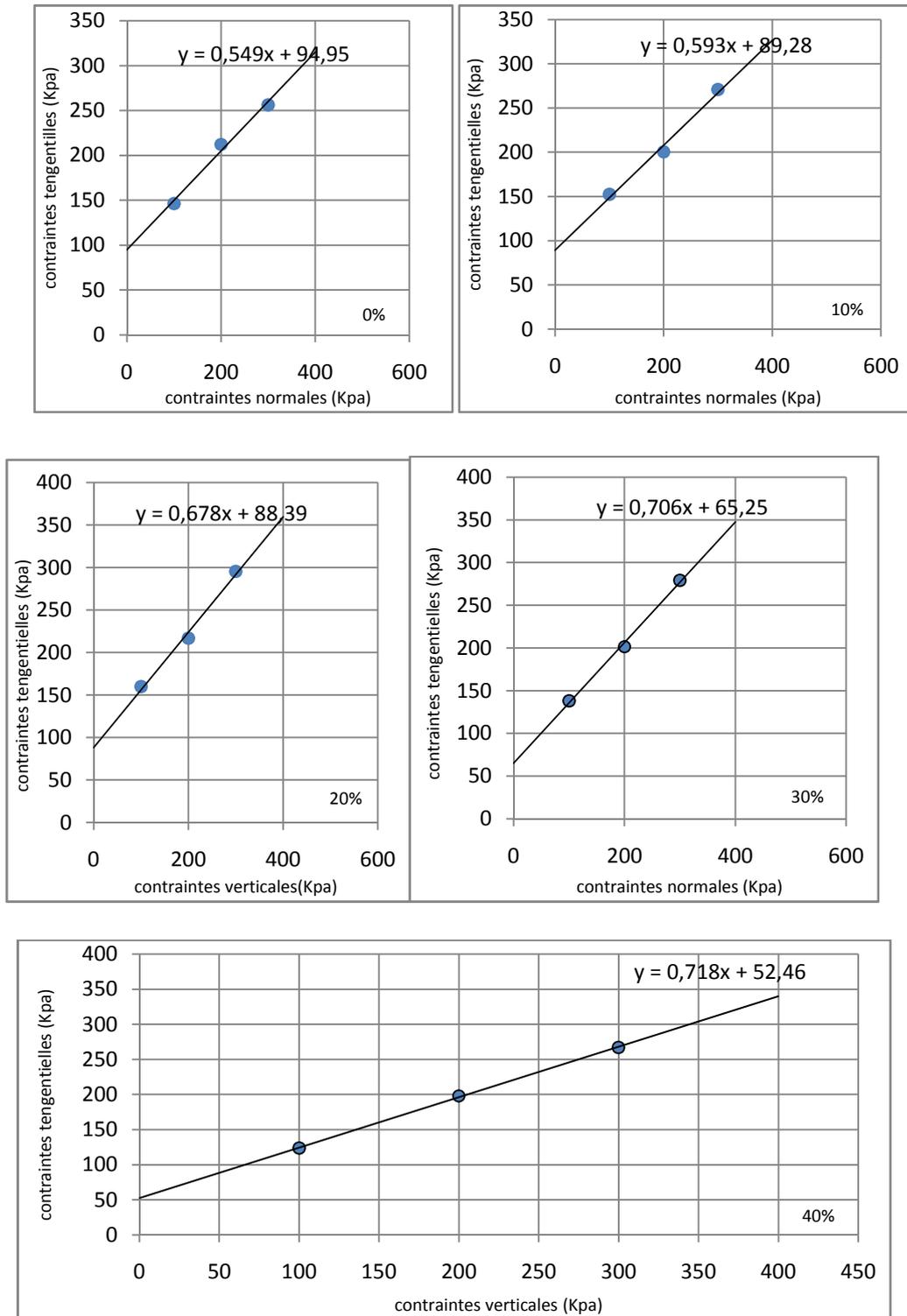


Figure VI-9 : Courbes intrinsèques  $\tau = f(\sigma)$  pour les différents mélanges

VI-11- 2-les caractéristiques mécaniques(c et  $\epsilon$ )

Tableau VI-1:les valeurs des angles de frottement interne et les cohésions pour les différents mélanges

essai	0%	10%	20%	30%	40%
$\epsilon$ (°)	28.8	30.67	34.15	35.22	35.71
C(kpa)	94.957	89.283	88.393	65.253	52.463

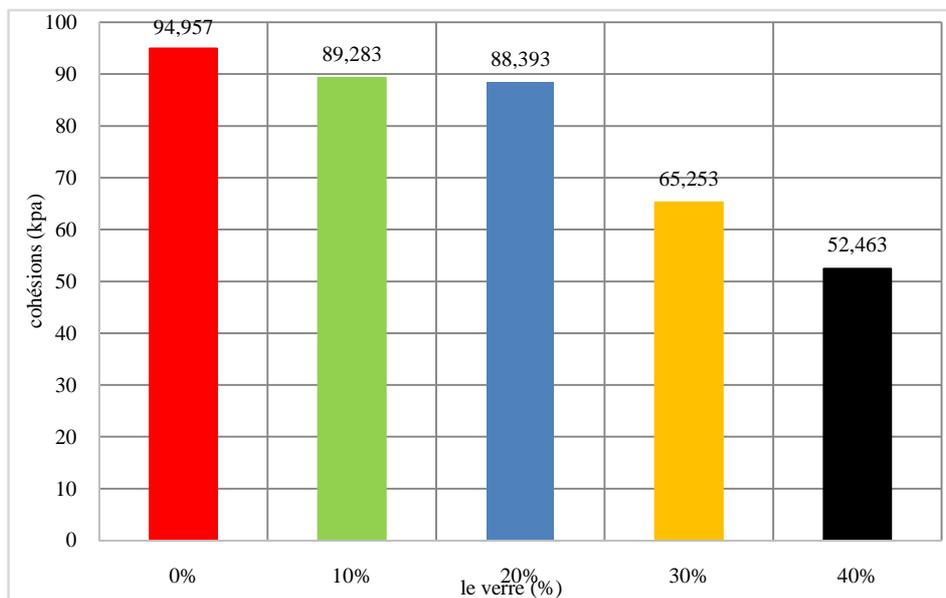
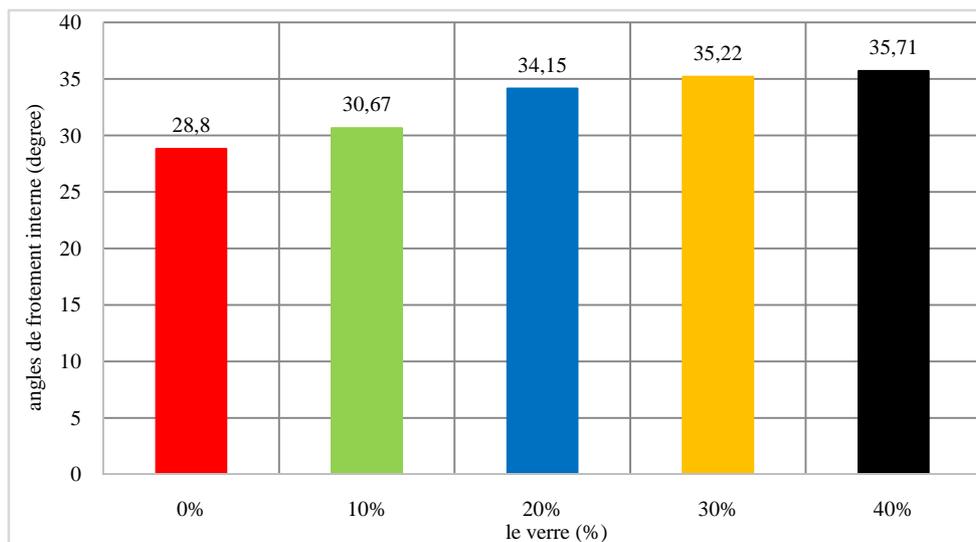
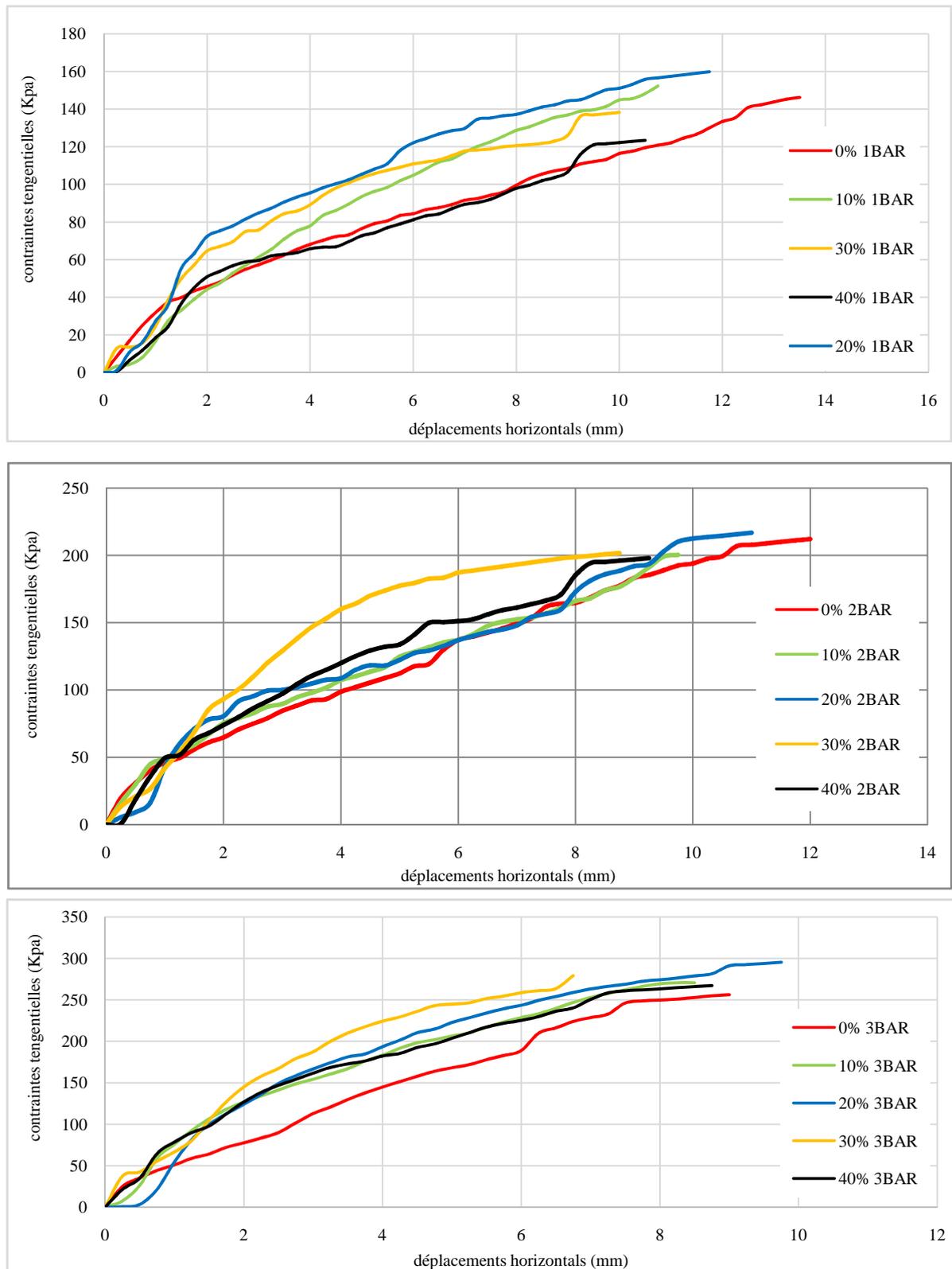


Figure VI-10 : les valeurs des cohésions (C) des cohésions pour les différents mélanges

Figure VI-11 : les valeurs des angles de frottement interne ( $\epsilon$ ) pour les différents mélanges

VI-10-5-Les courbes contraintes –déformations selon la charge appliquée



FigureVI-12 :comparaison des courbes contraintes –déformations selon les pourcentage verre et la charge appliqué

### **VI-11-Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus montrent que la résistance au cisaillement des différents mélanges augmente de plus en plus avec l'accroissement de la contrainte normale appliquée comme le montre (la figure VI-7). En effet, avec l'augmentation de la contrainte normale, les grains se resserrent davantage et le frottement entre eux augmente, ce qui fait accroître leur résistance au cisaillement.

En conséquence, le resserrement des grains diminue le volume de l'échantillon, ce qui engendre un comportement de plus en plus contractant au cours du cisaillement en fonction de l'augmentation des contraintes normales comme montrer dans (la figureVI-8 )

Les caractéristiques mécaniques développées par les différents mélanges sont traduites par les figures (VI-10 et VI-11). Ces figures montrent que les cohésions des mélanges diminuent de plus en plus avec l'ajout du verre. Tandis que les angles de frottement internes évoluent inversement et augmentent ainsi en fonction de l'ajout du verre. En effet, le verre est un matériau très frottant et atteint parfois des angles de frottement supérieurs à 50°, tandis que la marne est un matériau très cohérent,

Ainsi l'évolution des deux caractéristiques mécaniques ( $c$  et  $\varphi$ ) évoluent souvent en fonction du matériau le plus dominant dans l'échantillon.

Les figures (VI-12), montrent l'évolution de la résistance au cisaillement des différents mélanges en fonctions de leurs teneurs en verre sous les différentes contraintes normales appliquées. L'ensemble des courbes montre que les ajouts de verre de 20 à 30% présentent généralement les meilleurs comportements au cisaillement sous les différentes contraintes normales. Ces teneurs en verre offrent un compromis entre les cohésions et les angles de frottements internes développés, ce qui offre aux mélanges les meilleures résistances au cisaillement.

### **VI-14-Conclusion**

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement au cisaillement des matériaux étudiés, à savoir leurs résistances au cisaillement, leurs variations de volume et l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques ( $C$  et  $\varphi$ ).

L'ajout du verre a présenté des résultats très intéressants en cisaillement. Le comportement en cisaillement des différents mélanges, notamment pour des proportions de 20 à 30% est

sensiblement amélioré comparativement à la marne seule.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé, fait partie d'une étude globale sur la valorisation des matériaux locaux. Il vise particulièrement, à l'exploitation et à la valorisation de nouvelles sources de granulats naturelles (marne) et recyclés (débris de verre), en vue de leurs utilisation dans le domaine routier (couches de fondations et couches de base). Les mélanges reconstitués à base de marne et de débris de verre sont soumis aux principaux essais routiers (Proctor, CBR et cisaillement à la boîte).

Les résultats obtenus à l'issue des essais de laboratoire réalisés, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'analyse chimique, montre que la marne étudiée est argileuse, moyennement plastique, ce qui limite son utilisation seule comme matériau routier.
- L'ajout du verre à des proportions de 10 à 20% améliore sensiblement la densité des mélanges et présentent une meilleure aptitude au compactage, à des teneurs en eau réduites. Ceci est signe d'économie de sources naturelle, notamment alluvionnaire et d'économie d'eau qu'est une denrée rare dans certaines régions.
- Les mélanges présentent des portances immédiates très intéressantes pour des teneurs en verre de 10 à 30% vérifiant largement les exigences des normes en vigueur.
- En présence d'eau, les portances des mélanges diminuent sensiblement, néanmoins, les teneurs en verre de 10 à 20% présentent des portances acceptables avec des gonflements relatifs faibles.
- Les mélanges présentent des comportements en cisaillement très intéressants, notamment dans le cas des teneurs en verre de 20 à 30%.

Après analyse des différents résultats, les proportions de 10 à 30% de verre peuvent être acceptables pour la confection des mélanges marne + verre. Toutefois, la proportion de 20% peut être considérée comme idéale pour le comportement optimal des mélanges sous les différents types de sollicitations.

Ce travail de recherche peut présenter un intérêt capital en géotechnique routière pour notre région, tant sur l'aspect économique et sur l'aspect écologique et environnemental. Il peut également apporter un plus à la filière du recyclage des matériaux qui est un domaine ouvert à l'innovation.

En perspectives, cette étude mérite d'être complétée par d'autres essais, notamment à long terme sous l'effet d'autres sollicitations mécaniques (sollicitations cycliques, ...) et climatiques (gel-dégel, température, ...). Elle mérite également qu'elle soit concrétisée à l'échelle réelle, en associant les universitaires et les entreprises afin d'étudier le comportement de ces matériaux sur un tronçon de route et d'élargir éventuellement leur utilisation pour d'autres domaines de construction.

**Berga -A ;( 2003).** Éléments de mécanique des sols ; 2003.

**Bouchez -C ; (2008).** Rapport de sédimentologie : étude des milieux de dépôts, Sciences de la Terre et des Planètes, pp 2-8 ; 2008.

**Bordes-P; Guignard- G ; et al ;(1996).** L'entretien courant des chaussées ; guide pratique, document diffusé par le service d'étude des routes et d'autoroute ; 1996.

**Cllaud -M ;(2004).** Cours de la mécanique des sols tome I ; décembre (2004).

**Delahaye-D ; Roux.A ; (1975).** Désordres sur des remblais en marne, Bull. Liaison Labo P. et Ch. - 75 – janv.-fév. 1975 - Réf. 1575.

**Derriche-Z, Cheikh-L ; (2004).** Caractéristiques géotechniques des marnes Plais anciennes d'Alger, Bull Eng Géol. Environ 63 : pp 367–378 ; 2004.

**Engelke –R-L;( 1997).** Glass as a Road Base Substitute, Garcla and Wright Consultant, Public Works; April 1997.

**Etude sur l'industrie du verre ;** décembre 2001 [http://www.ineris.fr/ippc/default/files/files/gls\\_bref\\_1201\\_v1.pdf](http://www.ineris.fr/ippc/default/files/files/gls_bref_1201_v1.pdf) ;

**Etude sur le recyclage des déchets ménagers ;** 2012 <http://www.senat.fr/rap/o98-415/o98-4155.html>»

**Ghazvinian –A-H., Moradian.Z.A et al ;(2005).** International Journal of Rock Mechanics et Mining Sciences, Failure behavior of marlstone under triaxle compression, vol. 45, 2005, pp.807–814.

**Gérard -D ; Paul - R ;( 2007).** Aide mémoire de mécanique des sols ; 2007.

**Gérard -P; Bertrand-H ; (2003).** Fondation et ouvrage en terre, préface de André Isnard ;quatrième tirage ; 2003.

**Hermite-R; (1969).** Au pied du mur, presses de l'imprimerie Firmin-Didot, novembre 1969, Paris, France.

**Kalli F-Z ;(2009).** Cours de route ,4ieme année (page : 11-12-13) ; 2009.

**LCPC ;(1994).** Conception dimensionnement des structures des chaussées, guide technique LCPC sera 1994.

**LCPC ;(1987).** Essai de cisaillement à la boîte, méthode d'essai LPC n° 21, Laboratoire Central Des Ponts et Chaussées, Paris, France.

**Mellal et Lamri- B ; (2010).** Etude du comportement physico-mécanique d'une marne argileuse traitée à la chaux éteinte. (Cas de l'autoroute Est-Ouest Tronçon Oued Fodda/Khemis Miliana (Algérie)). pp 574-583. Université Hassiba Ben Bouali De Chleff, Algérie ; 2010.

**Nowamooz -H ; (2007) .** retrait/gonflement des sols argileux compacts et naturels, Thèse de Doctorat de L'institut national polytechnique de lorraine, (École Doctorale RP2E) 2007.

**Robitaille-V ; Tremblay.D ;(1997).** Mécanique des sols, théorie et pratique, Edition Modulo, 1997, Canada.

**SADIKI-S; FALEH-A; et al ;( 2006).** Papales de Géographia, Estimation de l'état de dégradation des sols sur marnes du pré rif (MAROC) par la susceptibilité magnétique : exemple du bassin versant de l'Oued ", .vol. 44, pp. 119 ; 2006.

**Normes françaises suivantes :**

- NF P94-056(tamissage) ;
- NF P94-057(sidérométrie) ;
- NF P94-050(teneur en eau par étuvage) ;
- NF P94-051(les limites d'atterberg) ;
- NF P94-078(les essais de portance) ;
- NF P94-071(l'essai de cisaillement direct à la boîte) ;
- NF P94-093(l'essai Proctor modifié) ;
- la norme française FD18-11(l'analyse chimique (agressivité du sol)).