

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

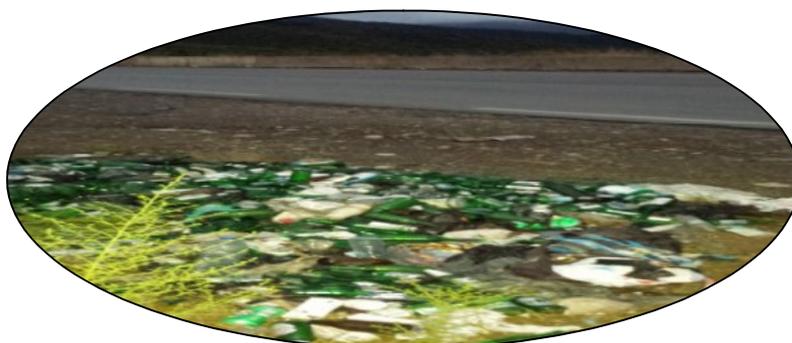
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

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



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

***ETUDE DU COMPORTEMENT D'UN MELANGE DE
SCHISTE + VERRE POUR UNE VALORISATION
DANS LA CONSTRUCTION ROUTIERE.***



Présenté par :

M^{elle} BELKACEMI SALIHA

Devant le jury composé de :

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

Année : 2014/2015

Remerciements

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

J'adresse mes sincères remerciements et j'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur M^r BOUDLAL Omar, Maitre de conférences B à l'UMMTO, pour ses conseils judicieux, pour ses qualités scientifiques et humaines, pour la disponibilité dont il a toujours fait preuve à mon égard, et pour m'avoir fait profiter de son expérience dans le domaine.

J'adresse mes plus vifs remerciements à M^r 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 M^r DEHMOUS Hocine, Maitre de conférences à l'UMMTO, pour avoir accepté de juger ce travail.

Mes chaleureux remerciements sont adressés à Mr BOUKHERROUB Med Ameziane, ingénieur du laboratoire pédagogique de mécanique des sols du département de génie civil de l'UMMTO, pour sa disponibilité et son aide par des conseils et des astuces dans la partie expérimentale.

Mes profonds remerciements sont adressés aux membres du laboratoire L.C.T.P de Tizi-Ouzou.

Je remercie également ma chère famille, pour leurs encouragements. Et je tiens enfin à remercier toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué à la réussite de ce mémoire.

Merci a tous

SOMMAIRE

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des principales notations et indices.

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1. Introduction..... 4

I.2. Définition 4

I.3.les principales couches de chaussée..... 5

I.3.1. Le sol support..... 5

I.3.2. Couche de forme 5

I.3.3. Les couche d'assise 6

I.3.4. La couche de surface 6

I.4. Les différents types de chaussées 6

I.4.1. Les chaussées Souples..... 6

I.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses 7

I.4.3. Les chaussées à structure mixte 8

I.4.4. Les chaussées semi-rigides (assises traitées aux liants hydrauliques) 8

I.4.5. Les chaussées à structure inverse 9

I.4.6. Les chaussées à structure en béton de ciment 9

I.5. Le dimensionnement des chaussées..... 10

I.6. Matériaux utilise 11

I.7. Dégradation des chaussées..... 13

I.7.1. Pourquoi les chaussées se dégradent? 13

I.7.2. types de dégradations des chaussées 13

I.8. Action des véhiculés sur les chaussées 16

I.8.1. Actions verticales 16

I.8.2. Actions tangentielles 17

I.8.3. Actions dynamiques 17

I.8.4. Vibrations 18

I.9. Conclusion 18

CHAPITRE II : RECYCLAGE ET MATERIAUX RECYCLES

II.1. Introduction 19

II.2. Définition..... 19

II.3. Pourquoi Recycler ? 20

II.4. Les Materiaux Recycles..... 20

II.4.1. Papier et carton 20

II.4.2. Plastique.....	21
II.4.3. Métal.....	21
II.4.4. Aluminium.....	21
II.4.5. Acier.....	22
II.4.6. Bois.....	22
II.4.7. Verre.....	24
II.5. Interet du recyclage dans le genie civil.....	24
II.6. Quelques statistiques sur le recyclage.....	26
II.6.1. Valorisation des déchets en Suisse.....	26
II.6.2. Valorisation des déchets en Allemagne.....	26
II.6.3. Valorisation des déchets au Québec.....	27
II.6.4. Valorisation des déchets en France.....	28
II.7. Le recyclage en Algerie.....	29
II.8. Le verre.....	30
II.8.1. Définition.....	30
II.8.2. La composition du verre d'emballages vert.....	30
II.8.3. Propriétés physiques des débris de verre en géotechnique.....	31
II.8.4. Le recyclage du verre.....	33
II.8.5. Domaines d'utilisations.....	35
II.9. Conclusion.....	38

CHAPITRE III : ESSAIS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1. Introduction.....	39
III.2. Les matériaux utilisés.....	39
III.3. Les schistes.....	40
III.3.1. Définition des schistes.....	40
III.3.2. Les différents types de schiste.....	40
III.4. Essais d'identifications.....	42
III.4.1. Teneur en eau (w).....	42
III.4.2. Les masses volumiques.....	43
III.4.3. Indice des vides, degré de saturation et porosité.....	45
III.4.4. Les limites d'Atterberg.....	47
III.5. Analyse chimique de schiste.....	49
III.6. Analyse granulométrique.....	50
III.7. Quelques propriétés du verre.....	53
III.8. Préparation des échantillons.....	54
III.9. Conclusion.....	54

CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES

IV.1.Introduction	55
IV.2. Définition du compactage	56
IV.3.Rôle du compactage sur la durée de vie des ouvrages	57
IV.4. Paramètres influents du compactage	57
IV.4. 1. Influence de la teneur en eau	57
IV.4. 2. La nature du matériau	58
IV.4. 3. Energie de compactage	58
IV.4. 4. L'Angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines	59
IV.4.5.Sol-support	60
IV.5. Les essais de compactage en laboratoire	60
IV.6. L'essai Proctor modifié	61
IV.6.1. définition	61
IV.6.2. But de l'essai	62
IV.6.3. Principe de l'essai	62
IV.6.4. Matériel utilisé	63
IV.6.5. Expression des résultats	64
IV.7. Essai de portance californien (CBR : California Bearing Ratio Test)	72
IV.7.1. Définition	72
IV.7.2. But de l'essai	72
IV.7.3. Principe de l'essai	72
IV.7.4. Matériel utilisé	73
IV.7.5. Mode opératoire	74
IV.7.6. Expression des résultats	76
IV.7.7. Interprétation des résultats	79
IV.8.essai micro-deval	80
IV.8.1.Définition	80
IV.8.2.Objectif de l'essai	80
IV.8.3.Principe de l'essai	80
IV.8.4.Equipement nécessaire	81
IV.8.5.Conduite de l'essai	81
IV.8.6.Résultats	82
IV.9.Essai Los Angeles	82
IV.9.1.Définition	82
IV.9.2.Objectif de l'essai	82
IV.9.3.Equipement nécessaire	82
IV.9.4.Conduite de l'essai	82
IV.9.5.Résultats	84
IV.10. Conclusion	85

CHAPITRE V : ESSAI DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE DE CASAGRANDE

V.1.Introduction	86
V.2.Notion de résistance au cisaillement (LCPC, 1987).....	86
V.3. But de l'essai	87
V.4. Appareillage.....	88
V.5.Principe et mode opératoire.....	89
V.5.1.Préparation des échantillons	89
V.5.2.Principe de l'essai.....	89
V.5.3. Mode opératoire.....	90
V.5.4. Influence de la phase aqueuse	91
V.5.4.Vitesse de mise en charge.....	91
V.5.4.Influence de la nature du sol sur la résistance au cisaillement	91
V.6. Avantages et inconvénients de la boite de cisaillement	94
V.7. Expression des résultats.....	94
V.8. Présentation des résultats.....	94
V.9.Interprétations des résultats	103
V.10.conclusion.....	104
Conclusions et perspectives	105
Références bibliographiques.	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Coupe transversale d'une chaussée.

Figure I.2 : les couches d'une chaussée souple.

Figure I.3: les couches d'une chaussée bitumineuses épaisses.

Figure I.4: les couches d'une chaussée à structure mixte.

Figure I.5: les couches d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.

Figure I.6: les couches d'une chaussée à structure inverse.

Figure I.7: les couches d'une chaussée en béton de ciment.

Figure I.8: Exemples de courbes granulométriques.

Figure I.9: dégradation d'arrachement.

Figure I.10: remonté des fines : dégradation franche, significative et étendue (LCPC ,1998).

Figure I.11: L'orniérage (LCPC ,1998).

Figure I.12: fissure.

Chapitre II

Figure II.1 : Cycle de recyclage.

Figure II.2: Evolution des déchets d'emballages en entrés usines de recyclages en France.

Figure II.3: Evaluation de la quantité du verre recycle.

Figure II.4: Recyclage des différentes matières en 2010.

Figure II.5: Le verre d'emballages.

Figure II.6: Bouteilles de verre jetées sur les bords des routes.

Chapitre III

Figure III.1 : les granulats de schiste et les débris de verre d'emballages.

Figure III.2 : Gisement de schiste dans la Grande Kabylie.

Figure III.3 : les différents diamètres du schiste utilisé.

Figure III.4 : Appareillage utilisée pour peser hydrostatique.

Figure III.5 : les différents états de sols.

Figure III.6: détermination des limites de liquidité w_L .

Figure III.7: détermination des limites de plasticité w_p .

Figure III.8: Analyse granulométrique par tamisage.

Figure III.9: Courbe granulométrique du schiste utilisé.

Figure III.10: Préparation de verre.

Figure III.11: courbe granulométrique du verre utilisé.

Chapitre IV

Figure IV.1 : Compactage des soles.

Figure. IV.2 : Objectifs du Compactage.

Figure. IV.3 : Influence de la nature du matériau.

Figure. IV.4 : Influence de l'énergie de Compactage.

Figure IV.5 : Courbe Proctor.

Figure. IV.6 : Essai Proctor.

Figure. IV.7 : Appareillage Proctor.

Figure IV.8 : Courbe Proctor du schiste.

Figure IV.9 : Courbe Proctor du schiste+10%verre.

Figure IV.10 : Courbe Proctor du schiste+20%verre.

Figure IV.11 : Courbe Proctor du schiste+30%verre.

Figure IV.12 : Courbe Proctor du schiste+50%verre.

Figure IV.13 : Courbe Proctor comparative des de tous les échantillons.

Figure IV.14 : Evolution des densités sèches en fonction du pourcentage du verre.

Figure IV.15 : Evolution des teneurs en eau en fonction du pourcentage du verre.

Figure IV.16 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

Figure IV.17 : Presse de l'essai CBR.

Figure IV.18 : Détermination de l'indice CBRimm.

Figure IV.19 : Eprouvettes après poinçonnement.

Figure IV.20 : Courbes effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement.

Figure IV.21 : Evolution des IPI en fonction du pourcentage du verre.

Figure IV.22 : Courbes effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement.

Figure IV.23 : Evolution des CBRimm en fonction du pourcentage du verre.

Figure IV.24 : Courbe comparative d'indices CBRimm et IPI.

Figure IV.25 : Mode opératoire d'essai micro deval.

Figure IV.26 : Mise en place du granulat essai Los Angeles.

Figure IV.27 : Etat du granulat en fin d'essai.

Chapitre V

Figure V.1 : Courbe de contraintes-déformations.

Figure V.2 : Droite intrinsèque.

Figure V.3 : Appareillage du cisaillement.

Figure V.4 : Principe de la boîte de cisaillement.

Figure V.5 : Mode opératoire du cisaillement.

Figure V.6 : Echantillons (schiste + verre) après cisaillement.

Figure V.7 : Cas des sols pulvérulents.

Figure V.8 : Cas des sols cohérents.

Figure V.9 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 0% de verre).

Figure V.10 : Courbes de variations de volume (schiste + 0% de verre).

Figure V.11 : Droite intrinsèque (schiste + 0% de verre).

Figure V.12 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 10% de verre).

Figure V.13 : Courbes de variations de volume (schiste + 10% de verre)

Figure V.14 : Droite intrinsèque (schiste + 10% de verre).

Figure V.15 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 20% de verre).

Figure V.16 : Courbes de variations de volume (schiste + 20% de verre).

Figure V.17 : Droite intrinsèque (schiste + 20% de verre).

Figure V.18 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 30% de verre).

Figure V.19 : Courbes de variations de volume (schiste + 30% de verre).

Figure V.20 : Droite intrinsèque (schiste + 30% de verre).

Figure V.21 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 50% de verre).

Figure V.22 : Courbes de variations de volume (schiste + 50% de verre).

Figure V.23 : Droite intrinsèque (schiste + 50% de verre).

Figure V.24 : Courbes de contraintes-déformations pour $\sigma = 100\text{kPa}$.

Figure V.25 : Courbes de contraintes-déformations pour $\sigma = 200\text{kPa}$.

Figure V.26 : Courbes de contraintes-déformations pour $\sigma = 300\text{kPa}$.

Figure V.27 : Courbes variations de volume pour $\sigma = 100\text{kPa}$.

Figure V.28 : Courbes variations de volume pour $\sigma = 200\text{kPa}$.

Figure V.29 : Courbes variations de volume pour $\sigma = 300\text{kPa}$.

Figure V.30 : Evolution des angles de frottement en fonction du pourcentage du verre.

Figure V.31 : Evolution des cohésions en fonction du pourcentage du verre.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau II.1: Capacité de recyclage.

Tableau II.2 : Bilan matières de reprise et de recyclage en suisse pour l'année 2004.

Tableau II.3 : Evolution de recyclage du verre en Allemagne. (Source: office fédéral des statistique).

Tableau II.4 : Quantité de matières résiduelles récupérée par la collecte sélective municipale de 1992 à 2002 (en 1000 tonnes).

Tableau II.5 : Quantité de verre récupérée au Québec depuis 1988 (en tonnes métriques).

Tableau II.6: performance en 2002 de récupération par secteur en milliers de tonnes.

Tableau II.7 : Résultats des tests physiques effectués sur les débris de verre.

Tableau II.8 :Composition chimique des débris de verre utilisés dans le ciment portland.

Chapitre III

Tableau III. 1 : Teneur en eau de schiste.

Tableau III. 2 : Teneur en eau de schiste après immersion.

Tableau III. 3: Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.

Tableau III. 4: Classification selon la masse volumique sèche.

Tableau III. 5: Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.

Tableau III. 6: Détermination du degré de saturation. (D'après TERZAGHI)

Tableau III. 7 : Résumés des résultats précédents.

Tableau III. 8: Rapport de l'analyse chimique du schiste.

Tableau III. 9: Classification des sols en fonction de leur teneur en sulfates.

Tableau III. 10 : Description des sols en fonction de leur teneur en CaCO_3 .

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques des appareils Proctor normal et modifié.

Tableau IV.2 : Résultats d'essai Proctor pour schiste.

Tableau IV.3 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 10%verre.

Tableau IV.4 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 20%verre.

Tableau IV.5 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 30%verre.

Tableau IV.6 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 50%verre.

Tableau IV.7 : Les teneure en eau optimaux et les densités sèches.

Tableau IV.8 : Résultats d'essai CBRimm.

Tableau IV.9 : Résumé des résultats d'essai CBR (IPI et CBRimm).

Tableau IV.10 : Calcul du coefficient micro-Deval.

Tableau IV.11 : Les classes granulaires utilisées.

Tableau IV.12 : Calcul du coefficient los Angeles.

Tableau IV.13 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure.

Chapitre V

Tableau V.1 : Evaluation des angles de frottement et des cohésions en fonction du pourcentage du verre.

LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

W : Teneur en eau naturelle ;
W_{optm} : Teneur en eau de l'optimum ;
Mh : Masse humide ;
Ms : Masse des grains solides ;
ρ_d : La masse volumique sèche ;
ρ_h : La masse volumique humide ;
ρ_s : La masse volumique des particules solides ;
ρ_w : masse volumique de l'eau ;
e : l'indice des vides ;
S_r : Le degré de saturation ;
n : La porosité ;
C_u : Le coefficient d'uniformité ;
C_c : Le coefficient de courbure ;
γ_d : La densité sèche ;
IPI : l'indice Portant immédiat ;
Δh : la variation de hauteur mesurée ;
H : hauteur initiale de l'éprouvette ;
G : Gonflement linière relatif ;
CBR_{imm} : l'indice CBR après immersion ;
φ : angle de frottement interne ;
c : cohésion drainée ;
L : longueur de la boîte de cisaillement ;
ΔL : déplacement horizontale ;
S_c : la section corrigée ;
ε_v : La variation de volume en pourcentage (%) ;
ΔV : variation volumique ;
τ : La contrainte tangentielle ;
T : la force de cisaillement ;
ε_h : la déformation horizontale ;
σ : la contrainte normale appliquée.
I_p : Indice de plasticité ;
K : Coefficient de perméabilité ;

INTRODUCTION GENERALE

Dans la plupart des pays, le réseau routier présente le patrimoine le plus important qui appartient essentiellement à l'état. Chaque jour plusieurs kilomètres de rues, de routes, d'autoroutes, de pistes d'aéroports sont construits pour accroître les échanges et donner un dynamisme aux régions. Les administrations routières doivent entretenir, exploiter, améliorer, remplacer et préserver ce patrimoine tout en gérant avec soin les ressources financières et humaines qui doivent servir à réaliser ces objectifs.

La chaussée est une structure composite réalisée par empilement de couches de matériaux. Aujourd'hui, la communauté « routière » s'accorde sur l'importance de réaliser un bon collage à l'interface des couches de chaussée, et cela, afin d'assurer l'intégrité de la structure de chaussée pendant toute sa durée de vie, mais aussi, après des travaux de renforcement. Atteindre ces objectifs, nécessite un choix minutieux des matériaux utilisés afin de satisfaire le fameux rapport (qualité/prix).

La recherche de l'économie dans les projets, ainsi que la nécessité d'exploiter convenablement les ressources naturelles conduisent à essayer d'utiliser au mieux tous les matériaux locaux disponibles sur place. D'après une étude réalisée en 2000 par l'UNICEM (Union Nationale des industries de carrières et matériaux de construction), 200 millions de tonnes de granulats naturels sont utilisés chaque année en France par l'industrie routière avec une augmentation de 4% par an. Les ressources naturelles s'amenuisent et la demande augmente. Nous sommes ainsi, face à une situation de surexploitation des carrières, qui entraîne un problème environnemental réel. Cependant, 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.

Plusieurs matériaux tels que les débris de béton, les mâchefers, les débris de verre, ont fait l'objet du recyclage dans les pays développés notamment, dans le domaine du génie civil. Le travail réalisé, s'inscrit dans ce contexte, il s'intéresse particulièrement au recyclage des débris de verre, en vue de leur utilisation dans le domaine routier. La valorisation locale du verre s'inscrit dans un schéma de développement durable. Elle présente plusieurs enjeux, à commencer par la diminution du tonnage des déchets mis en décharge et de afférents coûts, la réduction des inconvénients associés au verre (tessons, incendies de décharge), le

développement de nouvelles filières économiques sur le territoire et l'économie de matière première (carrières de grave).

Dans ce mémoire est traité particulièrement le verre ménager (bouteilles de verre). L'objectif recherché est la possibilité d'utiliser les débris de verre d'emballage comme granulats pour corps de chaussées (couches de fondation et couches de base). Ceci est fait à base de mélanges de granulats de schiste et différentes proportions de verre (0 à 50%).

Après avoir identifié les matériaux sélectionnés, les mélanges (schiste + verre) sont soumis aux principaux essais mécaniques routiers, à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié, les essais de portance avant et après immersion à la presse CBR et les essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les résultats obtenus sur les différents mélanges, sont ensuite comparés aux résultats obtenus sur de schiste seuls soumis aux mêmes essais et réalisés dans les mêmes conditions de laboratoire.

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

Le chapitre I présente des généralités sur les chaussées. Il traite principalement, les définitions des différentes couches constituant une chaussée, les différents types de chaussées, leur dimensionnement...

Le chapitre II présente des généralités sur le recyclage. Les matériaux recyclés, l'intérêt du recyclage dans le génie civil, quelques statistiques sur le recyclage. Il s'intéresse principalement au recyclage du verre et particulièrement au verre d'emballage (les travaux réalisés sur le recyclage du verre et les domaines d'utilisation).

Le chapitre III introduit la partie expérimentale de cette étude. Il est consacré aux différents essais d'identification des matériaux utilisés (schiste et verre), afin de déterminer les caractéristiques physiques et chimiques. Il présente également les différents échantillons préparés.

Le chapitre IV présente les essais de compactage Proctor et essais de portance CBR réalisés au laboratoire. Ces essais permettent d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage ainsi que leur portance sous les plus mauvaises conditions hygrométriques. Sont présentés également quelques essais routiers, à savoir l'essai Los Angeles et l'essai Micro-Deval. Sont présentés ainsi, les différents modes opératoires, les résultats d'essais et les

différentes comparaisons sous forme de tableaux et de courbes avec les interprétations correspondantes.

Le chapitre V, est consacré aux essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Ces essais permettent de traduire le comportement des matériaux étudiés du point de vue résistance au cisaillement et variation de volume. Ils permettent de déduire les caractéristiques mécaniques, à savoir l'angle de frottement interne et la cohésion. Sont présentés ainsi, le but et le principe de l'essai, l'appareillage, le mode opératoire, ses avantages et ses inconvénients, et enfin, les principaux résultats obtenus et les interprétations correspondantes.

Enfin, le présent mémoire sera terminé par des conclusions synthétisant les principaux résultats obtenus dans cette étude et quelques perspectives pour de futures recherches.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1. INTRODUCTION

L'histoire de la route est indubitablement attachée au développement de l'humanité et des civilisations.

La civilisation romaine a véritablement marquée de son empreinte une partie de l'Europe par l'aménagement d'infrastructures, qu'elles soient viaires ou bien d'adduction d'eau potable. Leur conception leur a permis d'en laisser trace jusqu'à nos jours.

Il est important de noter que l'histoire des routes est aussi liée à la volonté d'expansion des nations et donc des besoins de leurs armées. Il est alors nécessaire de pouvoir déplacer des troupes et de l'armement rapidement à travers de nouveaux pays.

Ces voies sont alors assez rapidement marquées par leur capacité à supporter la circulation de chars tirés par des attelages bovins. Il est nécessaire dans ces conditions qu'elles disposent de la résistance mécanique nécessaire. La notion de chaussée est inventée; les romains utilisent alors des matériaux minéraux durs sous forme de blocs. Les techniques utilisées proviennent de la maçonnerie, on donne alors à la route une forme bombée, ce qui permet le report des efforts sur les bords de chaussée qu'il suffit alors de caler. Cette technique sera utilisée pendant près de 20 siècles.

La qualité de la construction des chaussées joue un rôle primordial. Celle ci passe d'abord par une bonne connaissance du sol support et un choix judicieux des matériaux à réaliser.

Le dimensionnement des structures de chaussée constitue une étape importante de l'étude. Il s'agit en même temps de choisir les matériaux nécessaires ayant des caractéristiques requises et de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la structure de la chaussée.

I.2. DEFINITION D'UNE CHAUSSEE

La chaussée est la partie renforcée et affectée à la circulation des véhicules. Pour subir directement les actions des véhicules et les facteurs naturels, sa largeur dépend essentiellement de considération de débit, elle est divisée en voies de circulations. (Coquand, 1978).

Les chaussées sont assimilables à une structure multicouche. Elles sont mises en œuvre sur une plateforme support, en général surmontée d'une couche de forme.

I.3.LES PRINCIPALES COUCHES D'UNE CHAUSSEE

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (figure I.1), qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic sur le sol support. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. (LCPC, 2000).

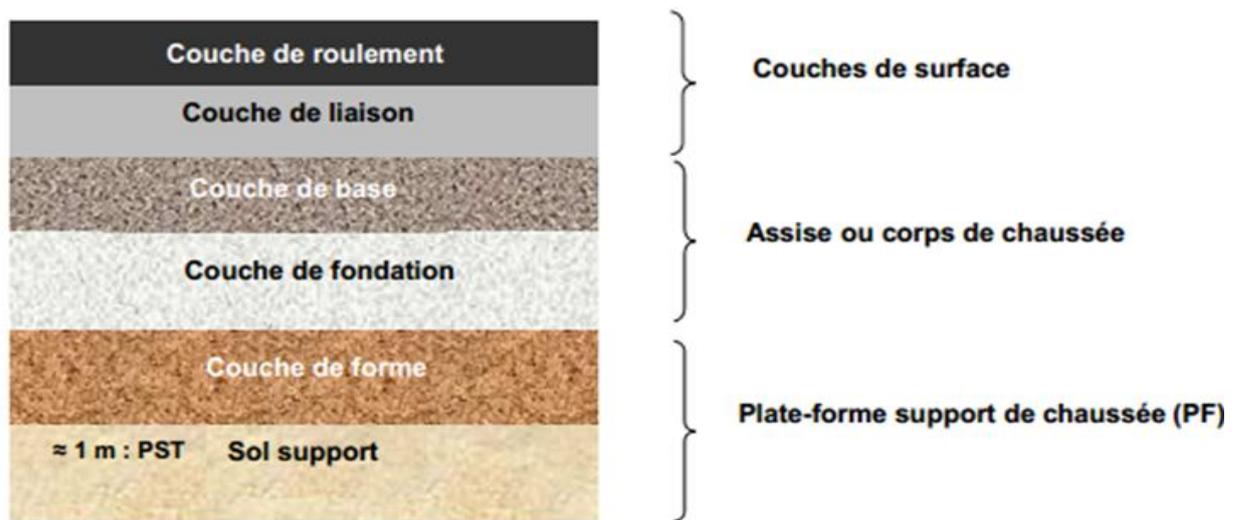


Figure I.1 : Coupe transversale d'une chaussée.

I.3.1.Le sol support

Est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme supporte de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée.

I.3.2.La Couche de forme

La couche de forme est un élément de transition qu'on l'introduit entre le sol support et les couches de sol afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol.

Cette couche, ne faite pas partie intégrante de la chaussée, elle peut constituer soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydraulique.

Elle a plusieurs fonctions :

- Lors des travaux, elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier.

- Elle permet de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol terrassé et de protéger ce dernier du gel.

I.3.3. Les couches d'assise

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : la couche de fondation, surmontée de la couche de base.

- **Couche de fondation:** elle est constituée de gravier concassé 0/40 d'une épaisseur de 20 cm. Elle répartit les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations.
- **Couche de base:** elle est constituée de gravier 0/25 et bitume elle est d'une épaisseur de 20 cm. Cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle les pressions élevées s'atténuent avant d'être transmises à la couche de fondation.

I.3.4. La couche de surface

A son tour la couche de surface a généralement une structure bicouche;

- **La couche de roulement:** c'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. On lui demande des qualités d'usage précis à savoir: une forte adhérence, une bonne drainabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules. Selon les besoins, on utilise soit la technique des enrobés épais, soit celle des enrobés minces ou bien des enrobés très minces voire ultra minces.
- **La couche de liaison:** l'apport structurel de cette couche est secondaire (sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée), elle est tributaire de la pérennité de la chaussée.

I.4. LES DIFFERENTS TYPES DE CHAUSSEES

Les structures de chaussées sont classées selon la nature des matériaux, leur localisation dans la structure de chaussée et l'intensité du trafic (SET94, Gidel, 2001), en 6 principaux types selon la norme (NF P 98-080-1 et la norme NA 5365).

I.4.1. Les chaussées souples

Principalement utilisées pour la réalisation des routes secondaires peu empruntées par les poids lourds (moins de 200 poids lourds par jour).

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

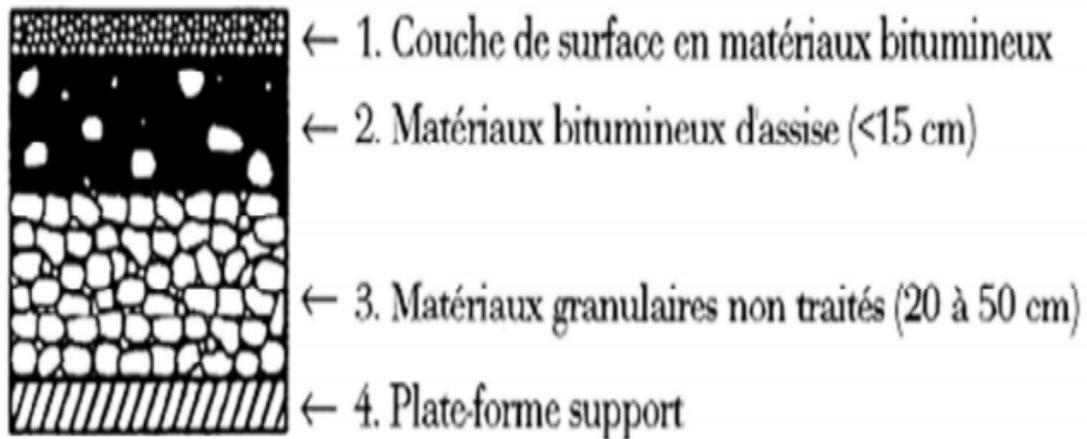


Figure I.2 : Les couches d'une chaussée souple.

I.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse surmontée corps de chaussée d'épaisseur comprise entre 15 et 40cm (composé d'une couche de base et une couche de fondation) en grave traitées aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques.

La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser en les atténuant fortement les contraintes verticales transmises au sol. La qualité des interfaces a une grande importance pour ce type de chaussée, en effet : si les couches bitumineuses sont liées, les allongements maximaux se produisent à la base de la couche liée la plus profonde; par contre, lorsqu'elles sont décollées, chaque couche se retrouve sollicitée en traction, provoquant la ruine prématurée de la structure.

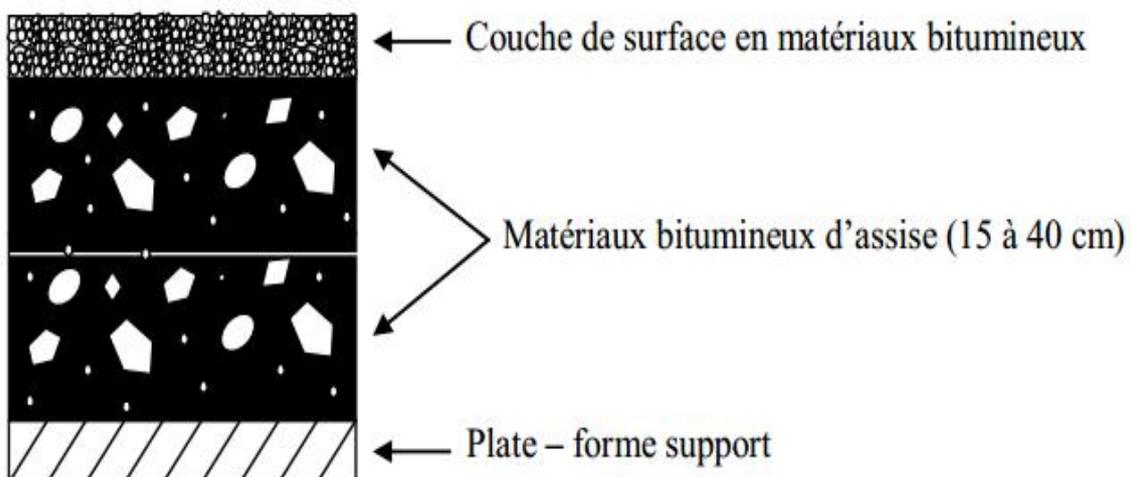


Figure I.3: Les couches d'une chaussée bitumineuses épaisses.

I.4.3. Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base:10 à 20cm) sur un couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de $\frac{1}{2}$.

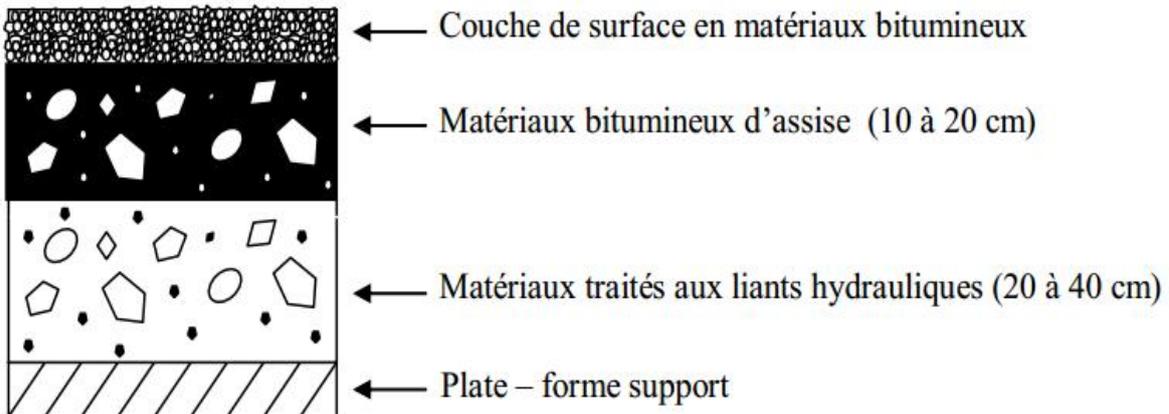


Figure I.4: Les couches d'une chaussée à structure mixte.

I.4.4. Les chaussées semi-rigides (assises traitées aux liants hydrauliques)

Pour les forts trafics ($T_2 \leq T_i \leq T_0$), Ces structures comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposée en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50cm. Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au support sont très faibles. En revanche, la couche traitée subit des contraintes de traction-flexion et qui s'avèrent prédominantes pour son dimensionnement.

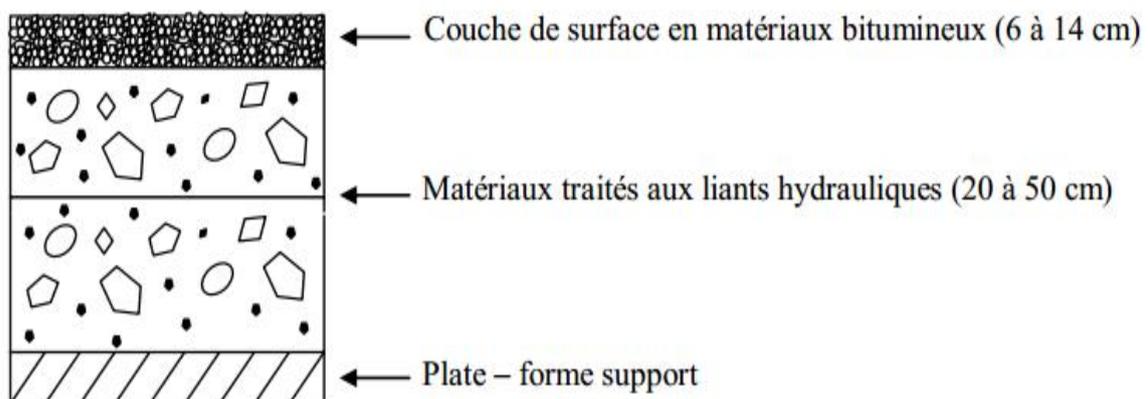


Figure I.5: Les couches d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.

I.4.5. Les chaussées à structure inverse

En les comparant aux structures mixtes, les chaussées inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires non traités d'environ 12cm. Cette couche est introduite entre la couche bitumineuse de 15cm d'épaisseur et la couche de fondation en matériaux traitée aux liants hydrauliques.

L'épaisseur totale de la structure est comprise entre 60 et 80cm.

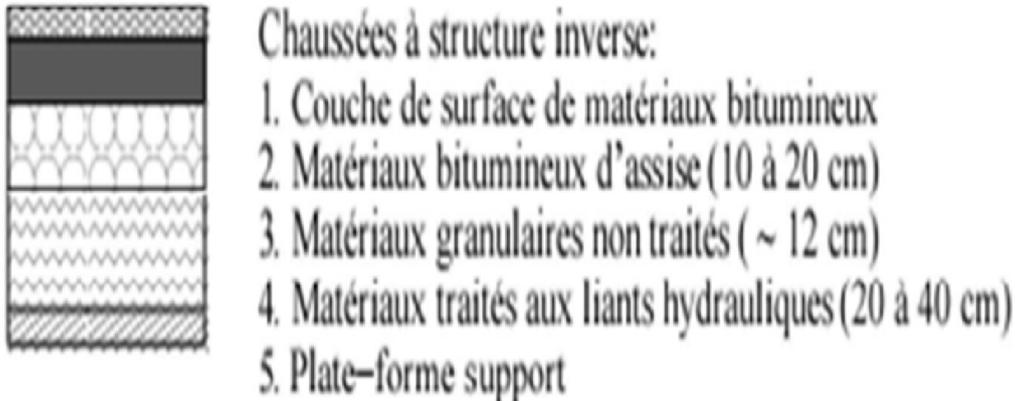


Figure I.6: Les couches d'une chaussée à structure inverse.

I.4.6. Les chaussées à structure en béton de ciment

Sont constituées d'une couche de béton de 15 à 40cm recouverte d'une couche mince en enrobés bitumineux.

La couche de béton peut surmonter :

- Une couche de fondation en matériaux traitée aux liants hydrauliques ou en béton de ciment;
- Une couche drainante en matériaux non traités,
- Une couche bitumineuse qui repose sur couche de forme.

La couche de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

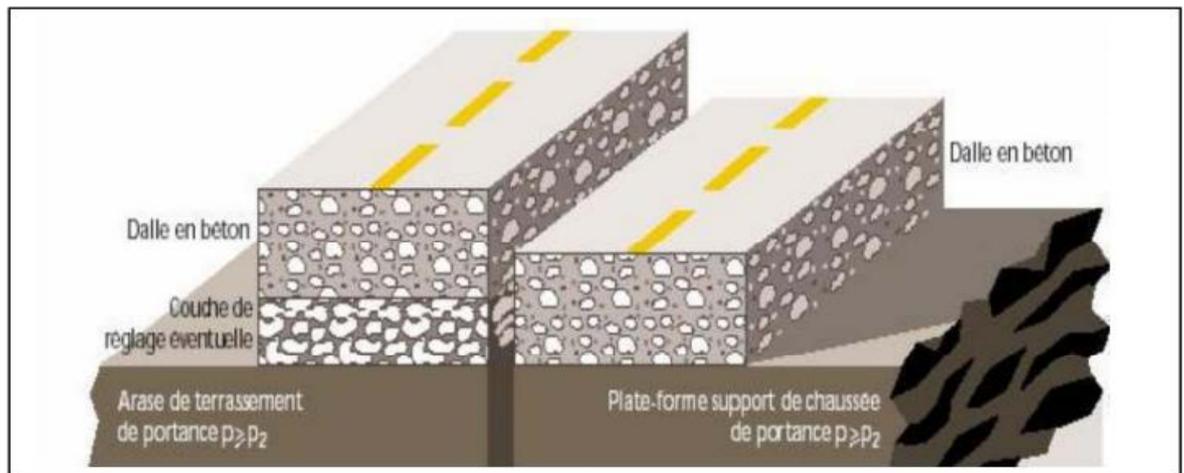


Figure I.7: Les couches d'une chaussée en béton de ciment.

I.5. DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

D'une part la chaussée doit représenter les qualités recherchées pour qu'elle satisfasse les exigences de l'utilisateur d'une part et pour qu'elle puisse avoir la durée de vie et la qualité de comportement calculées avec toutes les contraintes auxquelles elle est soumise, et d'autre part elle doit répondre à moindre coût.

Pour cela, le dimensionnement de la chaussée tient compte des paramètres suivant :

- **Le trafic:** Le trafic de dimensionnement est essentiellement le poids lourds (véhicules supérieur à 3.5tonnes). Il intervient comme paramètre d'entrée dans le dimensionnement des structures de chaussées et le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux pour la fabrication des matériaux de chaussée.
- **L'environnement:** Le climat et l'environnement influent considérablement sur la bonne tenue de la chaussée en termes de résistance aux contraintes et aux déformations, ainsi : La variation de la température intervient dans le choix du liant hydrocarboné, et aussi les précipitations liées aux conditions de drainage conditionnent la teneur en eau du sol support.
- **Le sol support:** Les structures de chaussées reposent sur un ensemble dénommé « plate – forme support de chaussée » constitué du sol naturel terrassé, éventuellement traité, surmonté en cas de besoin d'une couche de forme.
- **Les matériaux:** Les matériaux utilisés doivent résister à des sollicitations répétées un très grand nombre de fois (le passage répété des véhicules lourds).

I.6. MATERIAUX UTILISES

Le choix des matériaux dépend de beaucoup de facteurs surtout économique et qualitatif. Les qualités requises des matériaux destinés à constituer les couches de fondation et de base sont énumérées par Jeuffroy (1974),

1. matériaux Présenter une granulométrie conforme, de telle sorte que le matériau ne ségrége pas dans les diverses manipulations, mais constitue une couche facile à régler et présente par frottement interne une bonne résistance aux efforts.

La propreté du matériau est impérative, le matériau ne doit pas comporter trop d'éléments fins argileux sous peine de voir diminuer la stabilité et la résistance à la fatigue.

Se mettre en place facilement et ne pas avoir la courbe Proctor trop pointue, il doit Présenter une compatibilité acceptable.

La stabilité du matériau obtenu par frottement interne, cohésion, remplissage des vides doit être indépendante des conditions climatiques.

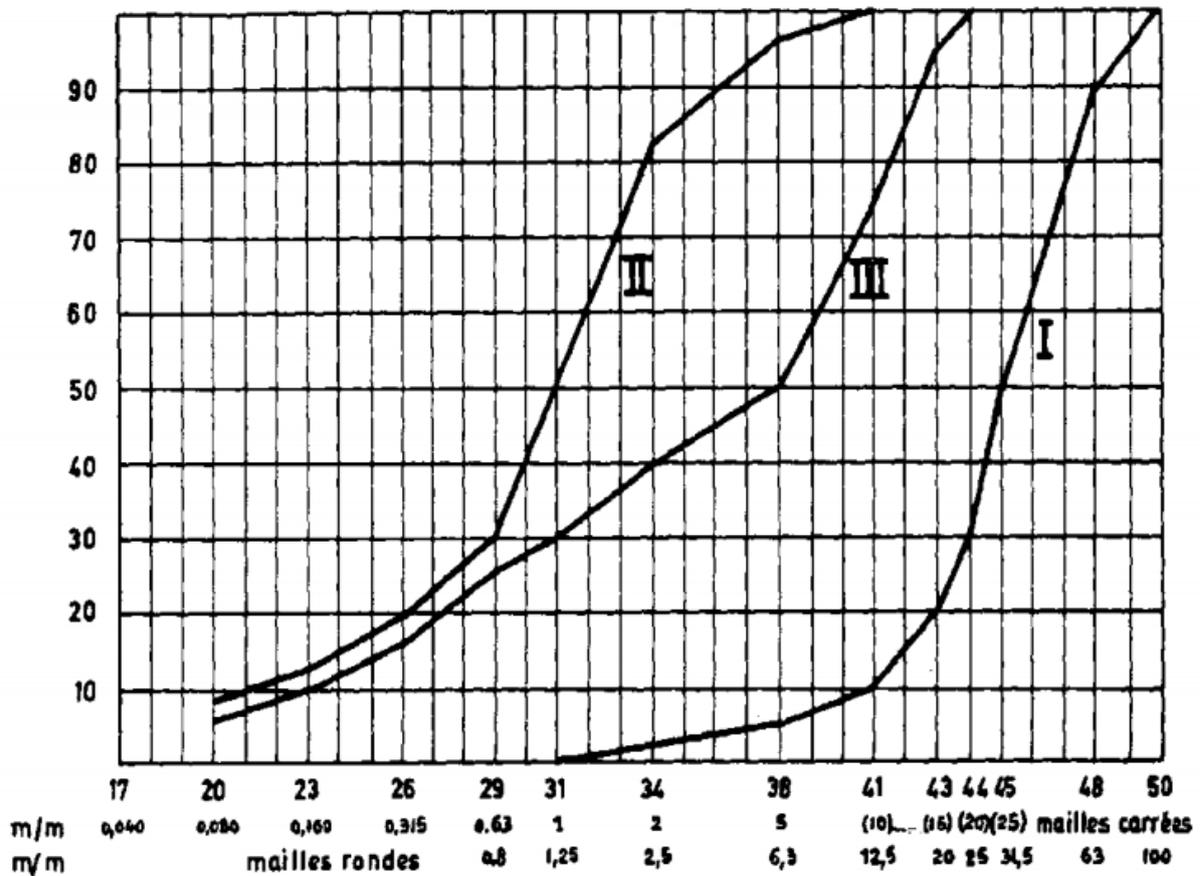


Figure I.8: Exemples de courbes granulométriques.

La courbe granulométrique a une grande importance car elle conditionne la possibilité d'obtenir un bon positionnement et un bon arrangement des grains sous l'effet de compactage, dont une compacité élevée. Cela recommande une meilleure stabilité, une meilleure résistance à l'orniérage et un bon étalement des charges sur le sol de fondation.

Le pourcentage des éléments inférieurs à 0.08mm est paramètre essentiel. Une diminution de la cohésion provient du manque de fines et l'instabilité de la couche en présence l'eau peut être à l'origine d'un excès de ces particules. Il est donc nécessaire de considérer les limites de spécifications comme impérative : 2% au minimum et 10% au maximum.

2. Le matériau ne doit pas comporter des fines argileuses, Les fines argileuses sont dangereuses parce que, situées entre les gros grains et à coup sûr humidifiées un jour ou l'autre, elles feront chuter le frottement interne jusqu'à l'annuler presque totalement. Dès lors, la couche incriminée se déformera comme un liquide visqueux et sera le siège d'ornières.

3. Le matériau doit présenter un compactage acceptable, Le pourcentage de fines, ou fillers, c'est-à-dire éléments passant à 80 μm , joue un rôle important. Si ce pourcentage est nul ou simplement insuffisant, le matériau est peu compact, difficile à serrer s'il n'est pas concassé.

La granulométrie de ces fines et surtout leur nature minéralogique, sont très importantes à maîtriser. On admet en général que le pourcentage des fines doit rester compris entre 5 et 15 %, cette fourchette constituant un maximum.

4. Le matériau doit être constitué par un agrégat d'autant plus dur et résistant.

5. La forme des grains ainsi que la dureté de la roche. Des matériaux entièrement concassés, très anguleux et de roche très dure, ne se mettent pas toujours facilement en place. La compacité après compactage peut ne pas être très élevée, à moins que la granulométrie soit parfaitement étudiée.

L'angularité est l'une des factures importantes concourant à la stabilité de l'assise de chaussée. Elle est caractérisée par un indice de concassage I_c . Selon les trafics et la nature de la couche, on prescrit des indices de concassage supérieurs à 80.

I.7. DEGRADATION DES CHAUSSEES

I.7.1. Pourquoi les chaussées se dégradent ?

Les causes de dégradations des chaussées sont :

- **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'unessieude13 tonnes a autant d'effet sur la structure de a chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme. La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée qui présente alors des dégradations.

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

- **Les conditions climatiques**

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

- **Les malfaçons**

Les malfaçons d'origines diverses lors de la construction ou de l'entretien (mauvais matériaux, épaisseurs insuffisantes, etc.) et également les tranchées exécutées ultérieurement sont cause de désordres.

- **Les accidents, les incidents**

Des dégradations ponctuelles peuvent être causées suite à des accidents de circulation ou des utilisations anormales du domaine public.

I.7.2. Types de dégradations des chaussées

Les dégradations des chaussées, selon le catalogue des dégradations de surface des chaussées du (LCPC, 1998) (7), peuvent être divisées en quatre familles : les arrachements et les mouvements de matériaux, les dégradations de déformations, les fissures.

- **Les dégradations d'arrachement**

Ces dégradations concernent plutôt la qualité de la couche de surface et en ce sens des problèmes de sécurité routière en rapport avec l'adhérence et l'uni des chaussées. Ces phénomènes sont dus soit à l'usure de la couche de surface,

l'arrachement des gravillons du revêtement, le départ localisé de matériaux de la couche de surface, le départ de gravillon de la couche de surface ou bien le départ du liant autour des granulats dans la couche de surface.



Figure I.9: Dégradation d'arrachement.

- **Les mouvements de matériaux**

Ces dégradations sont causées par des remontées du liant à la surface de la chaussée, par l'enfoncement de gravillons dans l'enrobé en période chaude, les remontées des éléments fins à la surface de chaussée; ou par l'éjection de l'eau à la surface lors du passage des véhicules lourds par suite de l'existence de cavités sous la couche de surface.



Figure I.10: Remonté des fines: dégradation franche, significative et étendue (LCPC, 1998).

- **Les dégradations de déformation**

Ces dégradations sont en général celles qui donnent des déformations visibles en surface, comme les phénomènes irréversibles suivants: l'ornièrre, l'affaissement, le gonflement, le bourrelet, le déclage de joint de dalle ou de bord de fissure, le flambement, les déformations de forme de tole ondulée.

Ces dégradations ont plusieurs raisons, nous pouvons citer le sous-dimensionnement ou une mauvaise qualité de l'assise entrainant des contraintes verticales excessives à la surface du sol support ou des couches non traitées: une réduction de portance du sol support par défaut de drainage ou conséquence du dégel; un drainage ou assainissement localement défectueux; un retrait hydrique du sol support.



Figure I.11: L'ornièrre (LCPC ,1998).

- **Les fissures**

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

Causes possibles :

- Tassement du corps de chaussée (retrait ou gonflement de la couche de base),
- Joint de bandes d'épandage ou reprises du travail au finisseur (tapis d'enrobés) mal exécuté,

- Elargissement de chaussée exécuté avec un dimensionnement différent de la chaussée existante,
- Mauvais accrochage de la couche de surface sur la couche de base,
- Différence importante entre la portance du corps de chaussée et celle du tapis d'enrobés,
- Effet horizontaux importants dus à la circulation (freinage, virages),
- Manque de stabilité de la chaussée sur la rive (accotement non rechargé),
- Effet du gel.



Figure I.12 : Fissures dans une chaussée.

I.8. ACTION DES VEHICULES SUR LES CHAUSSEES

Les chaussées au cours de leur âge subissent plusieurs types de sollicitations. Outre des sollicitations climatiques, les véhicules notamment les poids lourds, exercent des efforts importants et divers sur la chaussée, (Coquand, 1978), (Brunel, 2004-2005).

I.8.1. Actions verticales

Le poids des véhicules est transmis sous forme de pressions, soit exceptionnellement par des bandages ferrés ou en caoutchouc plein, soit généralement par des pneumatiques.

Les bandages pleins, surtout les jantes métalliques, exercent sur la chaussée une action extrêmement brutale et nocive. Les charges sont généralement limitées à 150 Kg par cm de jante, mais la pression peut atteindre localement des valeurs considérables; heureusement, la proportion de véhicules à bandages pleins diminue fortement. Leur nocivité est toutefois dépassée par certains véhicules militaires ou agricoles (à chenilles, crampons, etc.) et par des pneus à clous.

I.8.2. Actions tangentielles

Les roues exercent sur la chaussée des actions tangentielles par :

- La transmission de l'effort moteur ou de freinage ;
- La mise en rotation des roues non motrices ;
- La résistance aux efforts transversaux.

I.8.3. Actions dynamiques

Le véhicule automobile comporte une infrastructure (essieux) sur laquelle reposent par l'intermédiaire d'organes de suspension, le cadre rigide qui porte le moteur, la carrosserie, etc. Les organes de suspension sont les ressorts qui se déforment sous l'action des forces statiques, et surtout des actions dynamiques corrélatives au franchissement des obstacles.

Lorsque le mouvement régulier d'une roue est modifié par la rencontre d'un obstacle, d'une dénivellation, etc., cette roue se trouve instantanément surchargée ou déchargée: du fait de l'élasticité du pneumatique et de la suspension élastique des véhicules, des oscillations se produisent engendrant une série de surcharges positives ou négatives avec des valeurs maximales pouvant atteindre 1,5 à 1,8 fois la charge statique.

Sur des chaussées sensibles au cisaillement horizontal, parcourues par des véhicules circulant à la même vitesse, il en résulte un risque d'usure localisée des chaussées à intervalles réguliers correspondant à la période propre du véhicule; cette usure entraîne des sollicitations de même période, et le phénomène s'accélère rapidement: c'est la tôle ondulée souvent observée sur des pistes en matériaux granuleux non enduits.

Les chocs constituent en définitive, une cause essentielle de l'usure des véhicules d'une part, de la chaussée d'autre part. Il y a donc intérêt à obtenir et conserver l'uni de la chaussée. Cette qualité, n'est pas seulement favorable au confort des usagers, mais aussi à l'abaissement des dépenses de roulage de toutes natures (carburant, pneumatiques, usure).

I.8.4. Vibrations

Une étude au sismographe a été faite sur les vibrations produites par le passage de lourdes charges montre que, ces vibrations ont une période propre à la section de route considérée (nature, épaisseur). Quant à leur amplitude, elle est fonction d'une part de la nature des roues (10 fois plus forte avec bandages pleins qu'avec bandages élastiques), d'autre part de la surface de la chaussée (degré d'uni, nature du revêtement : les pavés, surtout mauvais sont favorables aux vibrations).

I.9. CONCLUSION

Actuellement, la réalisation des chaussées est basée essentiellement sur l'exploitation des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins.

Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Cependant, ces dernières années, la demande en agrégats devient de plus en plus croissante en rapport avec le développement du pays, au point où les sources naturelles restent parfois incapables de satisfaire les besoins nationaux. Ainsi, de nouveaux matériaux issus du recyclage des débris de béton, des débris de verre, etc, sont mis à l'épreuve afin de compenser du moins partiellement le manque en granulats. Cette étude s'inscrit dans ce même contexte, elle traite particulièrement le recyclage des débris de verre ménager dans la construction routière.

Le chapitre suivant est consacré à l'évolution de la filière du recyclage ainsi que les différents matériaux recyclés.

CHAPITRE II

RECYCLAGE ET MATERIAUX RECYCLES

II.1. INTRODUCTION

Le recyclage, est une technique de traitement des déchets très adoptée ces dernières années, notamment dans les pays développés tels que la Belgique et le Canada. Dans le domaine du génie civil, il consiste en la transformation des débris en vue de leur utilisation comme matière secondaire. Certains débris peuvent être utilisés tels quels, comme remblais, de même que les terres non contaminées. D'autres, ne pourront être directement réemployés. Il faudra d'abord en extraire les éventuels contaminants (bois, papiers, métaux, plastiques,...), puis les concasser. Les granulats ainsi obtenus pourront être réutilisés lors de la construction de routes ou de travaux d'infrastructure.

Les débris, avant d'être réutilisés, nécessitent de passer par une installation de recyclage et de faire l'objet d'une identification préalable, puis d'une étude de formulation permettant d'en valider le réemploi envisagé (assises traitées, béton routier, remblais...).

II.2. DEFINITION

Le recyclage peut être défini comme recouvrement ou réutilisation des matériaux ou articles. En d'autres mots, toute méthode d'extraction de valeur en forme d'énergie ou matière à partir des déchets à n'importe quel moment du cycle de vie d'un produit. (Chamarande et Jolivet, 2015).

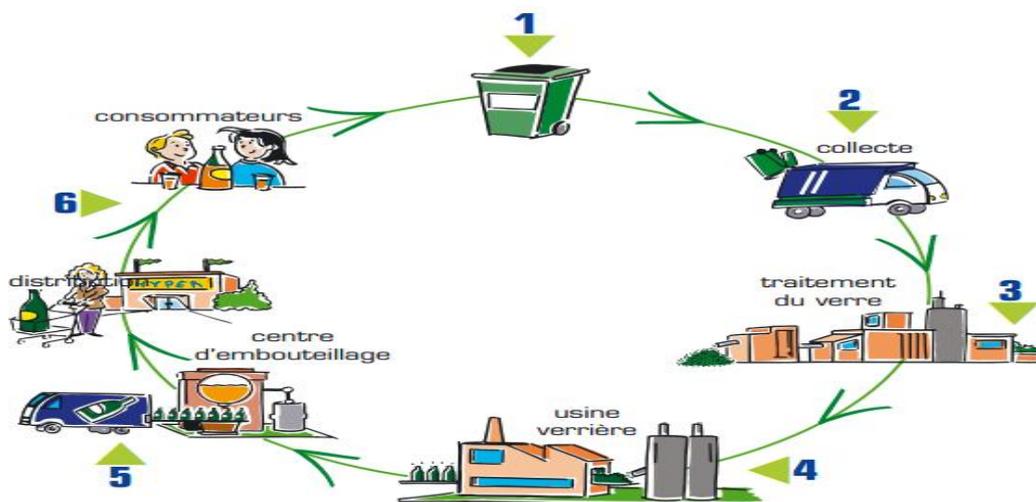


Figure II.1 : Cycle du recyclage.

II.3. POURQUOI RECYCLER ?

Recycler permet de :

- Préserver les ressources naturelles de moins en moins nombreuses en évitant les activités forestières et minières ;
- Préserver des quantités phénoménales d'eau ;
- Diminuer la demande en énergie dans les processus de fabrication ;
- Prévenir la contamination de l'air, de l'eau et du sol par les activités extractrices et les sites d'élimination (dépotoirs, incinérateurs) ;
- Favoriser la conservation et la protection de l'environnement et des écosystèmes ;
- Diminuer la pollution : pour chaque tonne de matières recyclées, c'est 2,8 tonnes de gaz à effet de serre évitées.

II.4. LES MATERIAUX RECYCLES

II.4.1. Papier et carton

Le papier et le carton représentent près du tiers des déchets d'une famille moyenne. Une feuille de papier ne peut être recyclée qu'environ 7 fois, car la fibre végétale raccourcit et se fragilise au fil du processus de recyclage.

Que fait-on avec le papier récupéré ?

- Carton;
- Mouchoirs;
- Papier hygiénique ;
- Essuie-tout;
- Boîtes à œuf ;
- Isolants à fruits;
- Litière pour animaux;
- Boîtes de céréales, à chaussures;
- Annuaire téléphonique;
- Isolants thermiques;
- Revêtements de toiture ;
- Boîtes de carton ondulé ;
- Matériaux de construction.

II.4.2. Plastique

La base des plastiques, c'est le pétrole ou le gaz naturel, des ressources non renouvelables et polluantes. Le plastique n'est donc pas une matière organique qui se décompose, hormis les produits minces et peu résistants, tels que les sacs de plastiques (bien qu'ils nécessitent de 200 à 450 ans avant de se décomposer !).

Que fait-on avec le plastique récupéré ?

- Briquets ;
- Classeurs à anneaux (vous pouvez par contre retirer et récupérer le carton...);
- Caoutchouc et tuyau d'arrosage;
- Contenants d'huile à moteur ou de solvant (section 4 « produits domestiques dangereux »);
- Pellicule extensible (Saran Wrap) ;
- Emballage de viande, de fromage, etc. ;
- Jouets ;
- Mobilier en plastique ;
- Sacs de croustilles et autres friandises, de craquelins, de céréales.

II.4.3. Métal

Comme le verre et le plastique, une des particularités de la plupart des métaux est qu'ils se recyclent à l'infini ! Le recyclage des métaux permet de préserver l'environnement sous plusieurs facettes, en tête de liste venant l'exploitation d'une mine, une activité très destructrice et polluante. On évite ainsi les opérations d'extraction, de raffinage et de transport, activités consommant beaucoup d'énergie et d'eau et produisant une quantité importante de gaz à effet de serre.

II.4.4. Aluminium

- 1 tonne d'aluminium recyclé, c'est 6 tonnes de gaz à effet de serre évités ;
- En recyclant une seule canette d'aluminium, on économise assez d'énergie pour alimenter une ampoule de 100 watts durant 20 heures !
- Pour faire 1 tonne d'aluminium, il faut 60 000 cannettes de boissons gazeuses ou de bières. Au Québec seulement, on en consomme environ 1 milliard par année !

- L'aluminium recyclé prend la forme de canettes, de papier d'emballage, de mobilier de jardin et de pièces automobiles.

II.4.5. Acier

Présentement, 65 % des produits fabriqués en acier le sont à partir d'acier recyclé.

- L'acier de 6 châssis de voitures recyclés peut fournir la charpente d'une maison (en termes de bois, on parle de 40 arbres) ;
- L'acier récupéré entre dans la fabrication de pièces pour les moteurs, de structures d'acier et de boîtes de conserve.

Ce qui se recycle :

- Boîtes de conserve ;
- Canettes ;
- Capsules de bière ;
- Papiers, feuilles et assiettes d'aluminium ;
- Couverts en métal.

II.4.6. Bois

Les déchets en bois ont plusieurs origines :

- L'exploitation forestière : souvent brûlés sur place (branchages, écorces,...), ou laissés à l'abandon (sciures), la nature faisant le reste.
- Les industries de première transformation : chutes de scieries.
- Les industries de deuxième transformation (menuiseries, charpentes,...) où les déchets de bois peuvent avoir été traités et doivent alors entrer dans des circuits de traitements spécifiques.
- Les objets en bois ou partiellement en bois, parvenus ou non en fin de vie et dont le propriétaire se débarrasse : ces déchets peuvent être aussi composés de bois traités.
- La restauration de mobilier ancien, méthode de traitement d'une forme de déchet en bois qui en génère elle-même d'autres. Il peut s'agir également de bois traités.

La valorisation des déchets de bois non traités peut se faire de plusieurs manières, selon les besoins des entreprises et les différentes essences de bois :

- compostage des écorces de résineux ;

- concassage des écorces de résineux pour le paillage couvre-sol en horticulture ;
- fabrication de panneaux d'agglomérés à partir de sciures et de copeaux ;
- utilisation en papeteries pour les dosses et déligneurs d'essence non tanniques ;
- production d'énergie à partir des écorces et des sciures de feuillus : ce mode de valorisation est souvent réalisé en interne par les entreprises productrices et l'énergie ainsi obtenue, est utilisée pour le chauffage des locaux ou le séchage du bois ;
- fabrication de charbon de bois pour les dosses et déligneurs de feuillus ;
- valorisation en granulés ou briquettes pour servir de combustible.
- Certains éléments comme les palettes, caisses ou cagettes sont des déchets qui se prêtent facilement à la valorisation matière par le biais du réemploi, avec ou sans réparation.

S'ils ne peuvent être réemployés, ils peuvent être l'objet d'une valorisation énergétique :

- les cagettes, très souvent endommagées, ne sont pas réparables et sont donc assez peu réutilisées; elles sont en revanche brûlées.
- Les caisses et palettes, en revanche sont fréquemment réutilisées plusieurs fois : c'est le cas de près de la moitié des palettes « multi-rotations » qui sont consignées et généralement prises en charge par un réparateur sous-traitant pour l'entreprise utilisatrice, ou par un récupérateur qui les répare et les revend. Les déchets générés par cette activité de réparation sont le plus souvent brûlés, sinon ils rejoignent le circuit réglementé des bois traités.
- Les palettes en bois non traitées et non réutilisées peuvent être broyées et le broyat trié et débarrassé des impuretés métalliques (clous et agrafes) et plastiques (reste de suremballages) est dirigé vers l'industrie du panneau.
- La valorisation énergétique de ces emballages est assez peu répandue mais la tendance est au développement de petites unités de chauffage destinées aux bâtiments de collectivités locales.

II.4.7. Verre

Comme le plastique, le verre est une matière inerte, c'est-à-dire qu'elle ne bouge pas, ne se transforme pas. Une bouteille enterrée ne se décomposera pas et existera pendant 4 000 ans. D'où l'importance de la recycler. D'autant plus que fabriquer du verre nécessite beaucoup d'énergie, car le mélange de base comprenant du sable, du carbonate de sodium et de la chaux doit être amené à une température variant entre 1 500 °C et 1 600 °C pour fabriquer un objet de verre.

Le verre peut être recyclé indéfiniment sans perdre ses propriétés et sa qualité. Il reprend vie sous forme de bouteilles, de bocaux et de pots de toutes sortes.

II.5. INTERET DU RECYCLAGE DANS LE GENIE CIVIL

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu.

En France, le secteur de la démolition produit annuellement 20 à 25 millions de tonnes de gravats (GDCBFNB, 1994). Tous les gravats de démolition ne peuvent être utilisés afin de produire des granulats de recyclage.

Face aux 400 millions de tonnes de granulats naturels produits en 2001 (UNPG, 2001), le granulats recyclés de déchets de démolition ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter ou de limiter de façon significative l'exploitation des gisements naturels.

Selon Charlot (1993), en France, les déchets de démolition sont issus des friches industrielles (40 %), des logements (35 %) et des travaux publics (25 %). Ces déchets sont composés de 50% de maçonnerie, 30 % de béton, 5 % de bitume et 15 % de matériaux autres (bois, métal, papier, plastique, etc).

Par exemple, la Belgique produit annuelle environ 72 millions de tonnes par an de granulats tous types confondus (bruxellesenvironnement.be, 2012). La répartition des différents types de granulats s'effectue de la manière suivante :

- granulats naturels environ 43 millions de tonnes par an (+/- 58 %), la fabrication des bétons consomme à elle seule 15 millions de tonnes;

- granulats marins environ 4 millions de tonnes par an (+/- 5,5 %);
- granulats artificiels environ 2 millions de tonnes par an (+/- 2,25 %);
- sables/graves environ 11 millions de tonnes par an (+/- 14,75 %);
- granulats recyclés 14 millions de tonnes par an (+/- 19,5 %).

Depuis plusieurs années, le Service cantonal de gestion des déchets de Genève (GEDEC) s'efforce de créer les conditions favorisant une réutilisation systématique des matériaux inertes dans le secteur de la construction.

Les matériaux issus du recyclage peuvent, selon leurs caractéristiques, être considérés comme des matériaux de terrassement, ou comme des granulats pour chaussée.

Dans cette convention, les entreprises de construction routière et les entreprises de terrassement, notamment, dans le cadre de la mise en œuvre des orientations du Grenelle de l'Environnement, s'engagent à préserver les ressources non renouvelables et se donnent les objectifs suivants :

- Le réemploi ou la valorisation de 100% des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers de terrassement (objectif annoncé : une amélioration de 10% de réemploi dès 2012 et de 100% de réemploi ou de valorisation à l'horizon 2020);
- Une meilleure valorisation des matériaux issus de déconstruction routière et un accroissement du recyclage des déchets de chantier ;
- L'augmentation de la réutilisation en centrale des matériaux bitumineux issus de la déconstruction routière (objectif annoncé : 60% en 2012).

Recycler des déchets dans une utilisation comme granulats pour les routes ou la construction permet:

- Une économie de la ressource naturelle ;
- Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;
- La réduction des quantités de matériaux mis en décharge.

II.6. QUELQUES STATISTIQUES SUR LE RECYCLAGE

Le recyclage est une pratique récente mais en progression rapide. En Europe, la collecte du verre a été pionnière (années 1970 en France). Des structures se sont ensuite mises en place pour collecter les vieux vêtements, les journaux et magazines (années 1980), les piles, les emballages (années 1990), les papiers dans leur ensemble, les équipements électriques et électroniques (années 2000), les ampoules basse consommation (années 2010).

II.6.1. Valorisation des déchets en Suisse

La Suisse a produit en 1999 quelque 2,6 millions de tonnes de déchets urbains. Ils contiennent 15% d'objets et d'emballages exclusivement en plastique, auxquels il faut ajouter 3% de plastiques compris dans les emballages et les articles composites. Le bilan matières de reprise et de recyclage en suisse pour l'année 2004 décrite dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Bilan matières de reprise et de recyclage en suisse pour l'année 2004 (Source : Empa).

Fraction	Quantité en tonnes	En pourcentage
Batteries	204	0.3
Condesaturs	120	0.2
Autre matériels dangereux	233	0.3
Métaux	45 869	61.2
Mélange de métaux et plastiques	8776	11.7
Plastiques	9133	12.2
Cables	1105	1.5
Ecrans (CRT et LCD)	6862	9.2
Toners d'impression	1204	1.6
Autre matériaux	1450	1.9
Total	74 957	100

II.6.2. Valorisation des déchets en Allemagne

L'Allemagne est l'un des pays leader dans la gestion environnementale en général et la gestion des déchets en particulier. Une grande partie de sa politique est axée sur le recyclage des déchets.

En 2000, sur les 3,4 millions de tonnes de verre retournés (récupérés des containers de collecte sélective ou par d'autres circuits) 83 % ont été recyclés. En 2002, la quantité totale du verre produit a été de l'ordre de 7,6 millions de tonnes dont 4 millions provenant du verre récupéré (recyclé).

L'évolution de recyclage du verre en Allemagne décrite dans le tableau II.3.

Tableau II.3 : Evolution de recyclage du verre en Allemagne. (Source: office fédéral des statistique)

Quantités (tonnes)	1995	1997	1999	2000
Quantités récupérées	3705	3470	3530	3414
Quantités recyclées	2788	2737	2845	2838
Taux de recyclage	75 %	79 %	80.6%	83%

II.6.3. Valorisation des déchets au Québec

Au Québec, les objectifs de récupération et de valorisation des produits résiduels sont fixés dans le cadre d'une politique de gestion intégrée des déchets solides. Quantité de matières résiduelles récupérée par la collecte sélective municipale de 1992 à 2002 est résumé dans le tableau II.4 .

Tableau II.4 : Quantité de matières résiduelles récupérée par la collecte sélective municipale de 1992 à 2002 (en 1000 tonnes). (Source: bilan sur la gestion des déchets au Québec, 2002)

Matières	1994		1996		1998		2000		2002	
	Quantité	%								
Papier Carton	130	76	198	75.9	216	80.3	258	80.1	301	84.8
Verre	28	16.4	42	16.1	34	12.6	40	12.4	30	8.5
Métaux ferreux	7	4.1	11	4.2	11	4.1	12	3.7	12	3.4
Métaux non ferreux	0	0	0	0	0	0	1	0.3	1	0.3
Plastique	6	3.5	10	3.8	8	3	11	3.4	11	3.1
Total	171	100	261	100	269	100	322	100	355	100

Le tableau II.5 représente la quantité de verre récupérée au Québec de 1988 à 2008 ;

Tableau II.5 : Quantité de verre récupérée au Québec depuis 1988 (en tonnes métriques)

Secteur	1988	1992	1994	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008
Collecte sélective	4 000	22 000	28 000	42000	34 000	40 000	30 000	42 000	59 000	67 000
Consigne CRU	28 000	19 000	13 000	8 000	22 000	15 000	15 000	18 000	22 000	25 000
ICI	2 000	13 000	23 000	36 000	45 000	35 000	27 000	34 000	36 000	36 000
Total	34 000	54 000	64 000	86 000	101000	90 000	71 000	94 000	117000	128000

Le tableau II.6, Présente la performance en 2002 de récupération par secteur en milliers de tonnes ;

Tableau II.6: performance en 2002 de récupération par secteur en milliers de tonnes.
(bilan sur la gestion des déchets au Québec)

Secteurs	Déchets générés	Potentiels	Objectif	Récupérés	Récupérés/ Potentiels		Objectif visés
					2000	2002	
Municipal	3474	3028	1817	598	16%	20%	60%
ICI	4659	4230	3384	2398	50%	57%	80%
CRD	3131	2845	1707	1775	47%	62%	60%
Total	11 264	10 103	6 908	4 771	40%	47%	65%

Avec :

ICI : Secteur des Industries, Commerces et Institutions.

CRD : Secteur des industries de la Construction, de la Rénovation et de la Démolition.

II.6.4. Valorisation des déchets en France

En 2002, 2 453 000 de tonnes de déchets d’emballages ont été recyclées dans le cadre des contrats passés avec les sociétés agréées (Eco-Emballages et Adelphe). L’évolution des quantités recyclées est présentée sur la figure II.2.

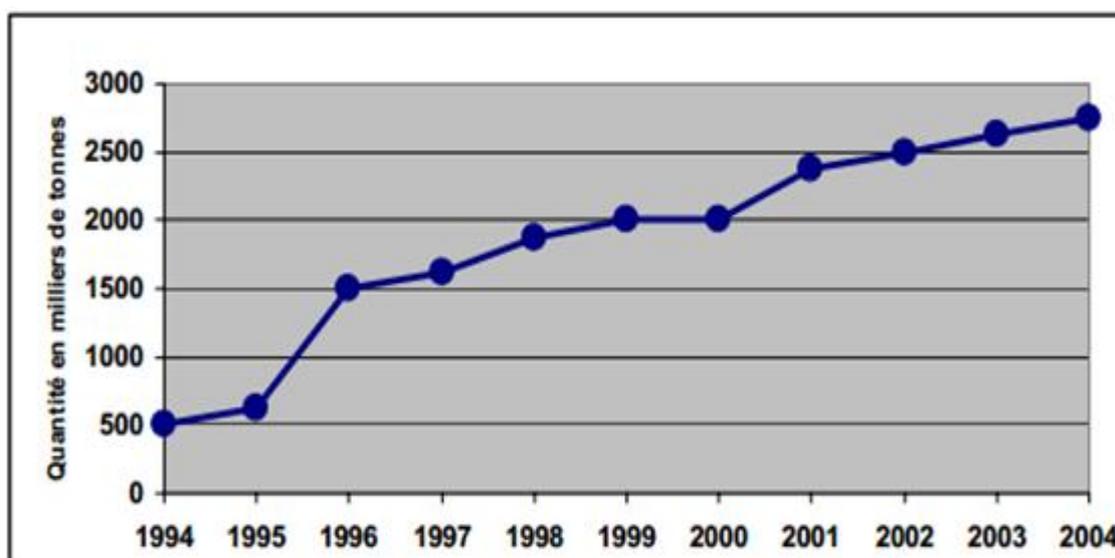


Figure II.2: Evolution des déchets d’emballages en entrés usines de recyclages en France.

(Eco-Emballages et Adelphe, 2004)

La figure II.3 présente l'évaluation de la quantité du verre recyclé en France.

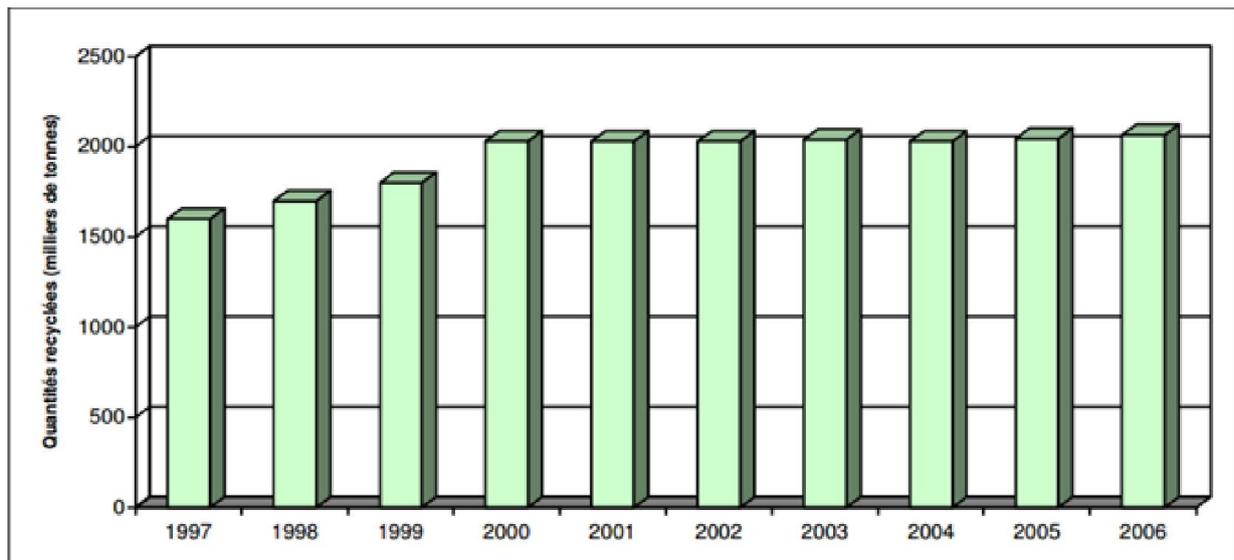


Figure II.3: Evaluation de la quantité du verre recycle

(Fédération des chambres syndicales de l'industrie du verre).

La figure II.4, présente le recyclage des différentes matières en 2010 en France.

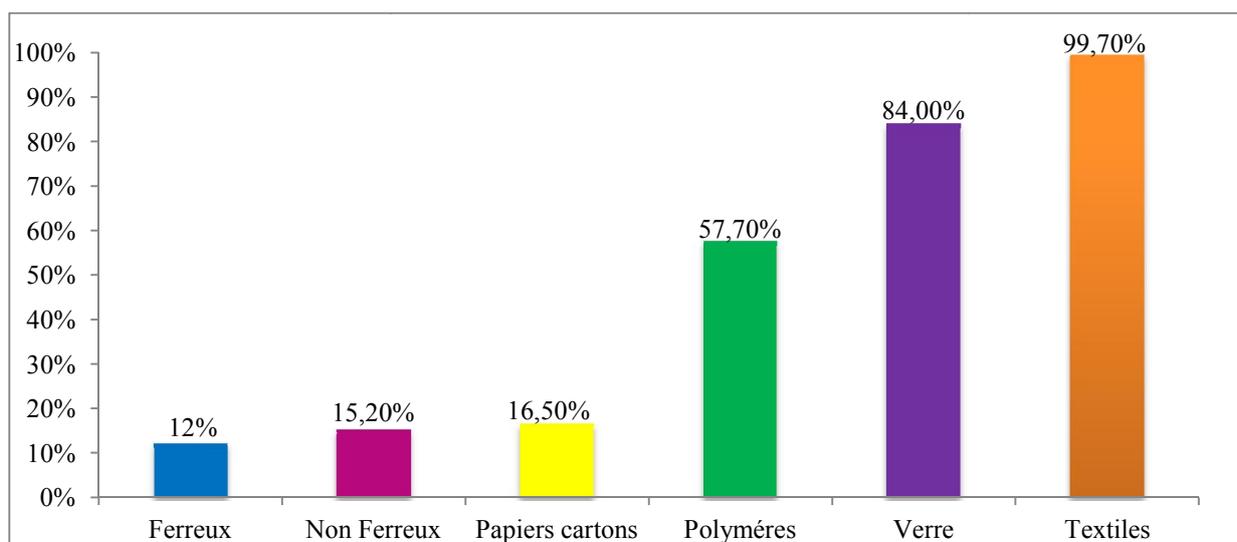


Figure II.4: Recyclage des différentes matières en 2010.

II.7. LE RECYCLAGE EN ALGERIE

La composition des déchets solides produits en Algérie se caractérise par une part très significative des produits organiques avec un taux moyen de 72%. Quant au plastique, il ne représente que 10% de ces déchets et 9.3 % pour le papier/carton, 4.14% pour le chiffon et autres, 3.2% pour les métaux et 1.36% pour le verre (MATE, 2004).

La consommation des produits alimentaires frais (fruits et légumes) explique ce constat. Le passage des entreprises productrices des boissons et d'eau minérale à l'utilisation des bouteilles en plastique au lieu des bouteilles en verre a augmenté le taux des matériaux à recycler.

Tableau II.1: Capacité de recyclage.

Nature des déchets	Quantité en tonne/ an
Papier	385.000
Plastique	130.000
Métaux	100.000
Verre	50.000
Matières diverses	95.000
Total	760.000

II.8. LE VERRE

II.8.1. Définition

« le verre est un solide obtenu par figeage d'un liquide qui n'a pas cristallisé » : limite le terme verre aux seuls produits obtenus par refroidissement d'un liquide.

D'où la définition plus générale :

« Le verre est un solide non cristallin qui présente le phénomène de transition vitreuse ». (Houdaer, 2015).



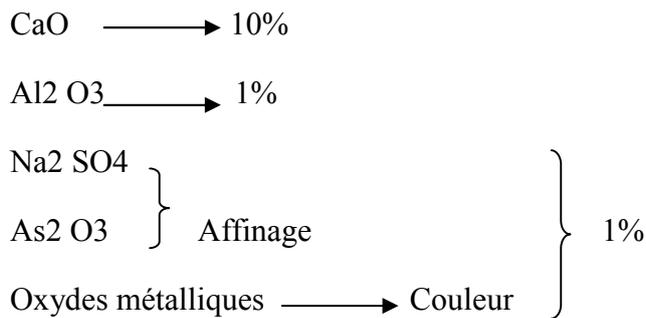
Figure II.5: Le verre d'emballages.

II.8.2. La composition du verre d'emballages vert

Lit de Fusion (10 à 30 %) + calcin (70 à 90%)

SiO₂ → 73%

Na₂O → 15%



II.8.3. Propriétés physiques des débris de verre en géotechnique

L'université de Philadelphie (Wartman et al. 2004) a mené des études sur le comportement physique des débris de verre. Deux échantillons de verre ont été utilisés dans le cadre de ce projet. Le premier échantillon était constitué de débris provenant de déchets domestiques (alimentaires, jus, bières, boissons gazeuses, et occasionnellement des morceaux de porcelaine) provenant d'une carrière de Pennsylvanie, tandis que le second échantillon comprenait des déchets de verre industriels (automobiles, écrans de télévision et d'appareils électroniques) achetés chez un commerçant de la ville dont l'activité consistait à laver et stocker les débris de verre et de les revendre aux industries pharmaceutiques et vitrières de la région.

L'échantillon provenant du commerçant était moins bien trié et contenait plus de matériau non verre que l'échantillon provenant de la carrière. On retrouvait presque 3,4 % des déchets provenant des étiquettes, des couvercles de métal et de plastique.

De plus, cet échantillon dégageait une très forte odeur de moisissures. Le premier échantillon contenait peu d'odeur et seulement 0,8 % de déchets autres que les débris de verre.

Les essais en laboratoire ont consisté à déterminer les différentes propriétés physiques et mécaniques de ces résidus. Les résultats sont présentés dans le tableau II.7.

Tableau II.7 : Résultats des tests physiques effectués sur les débris de verre
(Wartman. Grubb, 2004).

Teste	Teste standard	Echantillon N° 1		Echantillon N°2	
		Sans modification	Après modification	Sans modification	Après modification
Teneur en eau(%)	ASTM D2216-98	2.36	-	4.22	-
Teneur en saleté (%)	Gravimètre	0.34	-	1.82	-
Densité (D)	ASTM C127-88	2.48	-	2.48	-
Densité minimum (Kg/m ³)	ASTM D4254-00	1150	-	1270	-
Densité maximum (Kg/m ³)	ASTM D4253-00	1790	-	1740	-
Rapport des grains D ₅₀ (mm)	-	2.24	1.6	3	2.5
Coefficient d'uniformité Cu	-	6.2	6.5	7.2	7.8
% sable (0.075-4.75 mm)	-	91.3	87	70	76
Particules fines (<0.075 mm) %	-	3.2	6.2	1.2	2.2
Classification USCS	ASTM D2487-98	SW	SW	SW	SW-SM
Conductivité hydraulique (cm/s)	ASTM D2434-68	1.61x10 ⁻⁴	-	6.45x10 ⁻⁴	-
Proctor modifié $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	ASTM D1557-00	18.3	-	17.5	-
W _{opt} (%)	-	9.7	-	11.2	-
Proctor standard $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	ASTM D698-00	16.8	-	16.6	-
W _{opt} (%)		12.8	-	13.6	-
Cisaillement direct	ASTM D3080-98				
σ_n (kPa)					
0 - 60		61 - 63°	-	59 - 62°	-
60 - 120		58 - 61°	-	55 - 59°	-
120 - 200		63 - 68°	-	47 - 55°	-
Angle de frottement		48°	-	47°	-

Chaque échantillon a été trié selon le système de classification unifié (United Soil Classification System).

Selon cette classification, les débris de verre affichaient les caractéristiques d'un gravier (SW). La densité spécifique était de 2,485 (g/cm³) et la densité maximum se situait entre 16,6 et 17,5 kN/m³. Les poids volumiques obtenus des essais Proctor modifié et standard ont été respectivement de 18,3 et 17,5 kN/m³. Les débris de verre peuvent être utilisés dans les ouvrages de génie civil, de construction et de géotechnique, y compris les tranchées, les remblais, les murs de soutènement, les aires de stationnement ainsi que dans la construction routière.

Après avoir compilé les analyses en laboratoire sur les débris de verre, les auteurs (Wartman, Grubb, 2004) conclurent que ces débris de verre constituaient d'excellents matériaux pour le drainage. Ainsi, les décharges annuelles des États-Unis, constituées de 7,8 millions de tonnes de rebuts de verre (Statistiques EPA, 2000) pourront servir à l'industrie de la construction et du génie civil qui sont les premiers intéressés par ces rebuts.

II.8.4. Le recyclage du verre

- Le verre est un matériau « vitrine » pour l'environnement car il se recycle à 100% et l'infini sans qu'il perde ses qualités intrinsèques.
- En faisant fondre une tonne de verre collecté, on obtient une tonne de verre de même qualité, c'est un cycle perpétuel.
- Le recyclage du verre s'inscrit dans un objectif de protection de l'environnement et de valorisation maximale des déchets ménagers. En recyclant le verre, on évite la mise en décharge ou l'incinération.
- Recycler le verre, qu'il soit brun, vert ou clair, permet une économie énergétique de 30%. En recyclant une seule bouteille, vous contribuez à l'économie d'assez d'énergie pour allumer une ampoule de 100 watts durant 4 heures! De plus, il faut 50% moins d'eau, la pollution de l'air est réduite de 20% et les résidus miniers de 80% !
- Les bouteilles de bière sont également broyées puis recyclées en nouveaux produits. Cependant, en les rapportant chez votre épiciériste ou votre dépanneur, elles seront réutilisées par les embouteilleurs plus d'une quinzaine de fois avant d'être recyclées.
- D'un point de vue écologique, le recyclage du verre réduit le CO₂, 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 CO₂ 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 CO₂ 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 carbone du transport du calcin est, en moyenne, moins élevé que celui du transport des matières premières.



Figure II.6: Bouteilles de verre jetées sur les bords de routes.

II.8.5. Domaines d'utilisations

1. Utilisation du verre dans le ciment portland

Lorsque concassé très fin, voir en poudre ; il développe des propriétés cimentaires. A cet égard, il pourrait être utilisé pour substituer une partie du ciment. Les études restent à être complétées.

Les rebuts de verre, comme d'autres matériaux, sont utilisés dans la fabrication du ciment Portland. Les verres de récupération sont ainsi utilisés comme constituant principal pour le clinker, un adjuvant pour le ciment, ou même comme granulat pour le béton. L'utilisation du verre dans le ciment Portland en est encore à l'état expérimental. Ces débris de verre sont préalablement lavés avant de passer dans une meule à verre.

Le résultat de ce meulage est une poudre qui passe le tamis de 600 μm . L'examen aux rayons X montre qu'il s'agit d'une poudre amorphe.

D'après une étude récente (Dyer et Dhir, 2001) sur le comportement des débris de verre dans le ciment Portland, les résidus de verre affichaient la composition chimique décrite dans le tableau Tableau II.8.

Tableau II.8 :Composition chimique des débris de verre utilisés dans le ciment portland.

Composition	Débris de verre, masse en %			%
	Blanche	Verte	Brun	
CaO	6.43	10.26	10	64.9
Al ₂ O	2.41	2.81	3.2	5
SiO ₂	70.39	72.05	70.01	21.1
K ₂ O	0.23	0.52	0.82	0.6
Na ₂ O	16.66	14.31	15.35	0.3
Fe ₂ O ₃	0.32	0	0	2.7
MnO	0.04	0.04	0.04	0.01
MgO	2.59	0.9	1.146	1.6
TiO ₂	0.08	0.11	0.11	0.2
Cr	0.02	0	0	0.03
SO ₃	0.19	0.07	0.06	3.3

2. Utilisation des résidus de verre dans les enrobés bitumineux

Le verre peut être utilisée comme granulats dans l'enrobé dans une proportion maximale de 15 % ; la partie très fin peut être utilisée comme filler.

Un grand nombre d'expériences ont été menées visant l'utilisation des résidus de verre comme granulats dans les enrobés bitumineux. Ce type d'enrobé est appelé Glasphalt. Entre 1969 et 1988, environ 45 localités aux États-Unis et au Canada ont utilisé avec succès le Glasphalt sur des sites tels que les routes locales, les aires de stationnement ainsi que les routes à grande vitesse (autoroutes). Le département des transports du Connecticut (Conn DOT), a réalisé une étude de mise en œuvre technique ainsi qu'une analyse économique de l'utilisation des débris de verre dans les enrobés bitumineux.

3. Utilisation du verre recyclé dans la construction routière

Peut être utilisée à 100 % dans l'infrastructure. Les propriétés physique et mécanique du verre concassé permettent d'envisager son utilisation dans la sous-fondation d'une chaussée ; comme il peut être mélangé dans une proportion aux granulats des couches de pierre concassée de la structure de la chaussée.

Plusieurs études et/ou projets ont été traités concernant l'utilisation de verre dans la construction des chaussées. Certains de ces projets visaient l'incorporation d'un pourcentage de résidus de verre dans les granulats conventionnels de chaussées, alors que d'autres visaient l'utilisation à 100 % du verre brisé dans certaines parties de la structure des chaussées.

Comme exemples, et dans le but de diminuer les montagnes de déchets solides dans la municipalité ; l'Université Technique du Texas(1995) a réalisé une étude sur l'utilisation des résidus de verre comme matériau de construction dans la structure et l'infrastructure 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 résulta que l'usage des rebuts de verre comme matériaux de construction ne causa aucun problème particulier, tant pour le producteur que pour l'entrepreneur (Rogel et Engelke, 1997). Ainsi, les débris de verre se mélangent parfaitement aux granulats et se comportent comme un matériau normal. Ce mélange nécessite moins d'eau afin d'obtenir une densité acceptable. Les équipements de construction ainsi que les véhicules n'avaient pas eu à subir de dommages causés par l'utilisation des débris de verre comme matériau de construction en couche de base.

Une étude menée en laboratoire à l'Université de l'Alaska (Raad, 1992) a également démontré que l'utilisation de verre brisé dans l'enrobé n'en détériorait pas les propriétés, dans la mesure où sa teneur ne dépassait pas 15 %, mais il semble que le véritable optimum soit à 7,5 %. Dans le cadre de ce projet, l'auteur a également étudié l'influence sur la portance (CBR) de l'utilisation d'un pourcentage de verre dans un mélange verre-silt tout en précisant que les valeurs CBR n'étaient pas modifiées en autant que le pourcentage de verre ne dépassait pas 15%.

Une autre expérience forte intéressante a été réalisée en Idaho (Zeyher, 2002). Il s'agit de l'utilisation intégrale de 300 tonnes de verre concassé dans un remblai de route. Dans ce cas, le verre a d'abord été mis en place sur une épaisseur de 200 à 250 mm pour ensuite être compacté à l'aide d'un tracteur suivi d'un compacteur. L'expérience fut jugée concluante.

La ville de Sherbrooke a informé le département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, de l'intérêt de la ville et de RECYC-QUÉBEC d'investiguer la possibilité d'utiliser du verre issu de la collecte sélective dans la construction routière et, plus particulièrement, dans la structure d'une chaussée.

La réalisation d'une telle expérience a été envisagée à la ville de Sherbrooke, puisqu'en septembre 2005, plus de 1000 tonnes de verre étaient accumulées au Centre de tri et de récupération de la région sherbrookoise et ne trouvait pas preneur.

II.9. CONCLUSION

Le verre est une matière récupérée par l'ensemble des programmes de collecte sélective. Dans cette étude, nous avons choisi de recycler et de valoriser ce matériau (verre) dans la construction routière, particulièrement, dans les structures de chaussées (couches de fondations et couches de base).

Le verre brisé peut présenter des propriétés intéressantes pour un matériau de chaussée puisqu'il s'agit d'un matériau très perméable et, par conséquent, peu capillaire donc peu susceptible au gel. Néanmoins, son comportement mécanique sous l'effet du trafic doit satisfaire les conditions exigées par les normes pour valider son utilisation dans le domaine routier. Dans ce même contexte, nous avons étudié le comportement d'un mélange de granulats naturels de schiste et des débris de verre pour une éventuelle utilisation dans la construction routière. L'identification des matériaux utilisés, dans cette étude fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1. INTRODUCTION

Avant d'étudier le comportement mécanique de tous matériaux, il est nécessaire de déterminer un ensemble de propriétés (physiques, chimiques, minéralogiques,...) qui permettent de le caractériser et de faciliter la compréhension de son comportement mécanique. Ces propriétés sont déterminées par des essais de laboratoire, appelés «essais d'identification» :

- La teneur en eau (w);
- Masse volumique des grains solides (ρ_s);
- Masse volumique humide (ρ_h);
- Masse volumique sèche (ρ_d);
- L'indice des vides(e),
- La porosité (n)
- Le degré de saturation (Sr) ;
- Limites d'Atterberg ;
- Analyse granulométrique ;

III.2. Les matériaux utilisés

Dans ce travail, les mélanges étudiés sont composés de deux matériaux essentiels, à savoir les granulats de schistes et les débris de verre.

Le schiste étudié est extrait au niveau de la wilaya de Tizi Ouzou, tandis que le verre est obtenu par collecte de bouteilles d'emballage.



Figure III.1 : Les granulats de schiste et les débris de verre d'emballages.

III.3. LES SCHISTES

Le massif ancien de la Grande Kabylie est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphique et d'une couverture schisteuse épimétamorphique (Bossiere, 1971) ; ces deux ensembles sont eux même recouverts en discordance par une série peu ou non métamorphique (Bossiere et raymond1972). Cette couverture est constituée essentiellement d'un ensemble de sericitoschistes et de chloritoschistes présentant des passées gréseuses.



Figure III.2 : Gisement de schiste dans la Grande Kabylie.

III.3.1. Définition des schistes

Les schistes sont des roches métamorphiques silicoalumineuses à grains fins dont il existe plusieurs sortes mais qui toutes sont à structure feuilletée (la distance entre les plans de stratification ont moins de 5mm), provenant de la transformation des argiles par déshydratation et sous l'action de pression orientées. (Abdmziem, 1998).

Les schistes se forment généralement dans des conditions de faible température et de fortes pressions, donc à des profondeurs variant entre 4000 et 6000m. Leur composition chimique ou pétrographique peut être très diverse (Guillemot, 1986).

III.3.2. Les différents types de schiste

1. Schistes du métamorphisme général très faible

Ils sont à la limite du domaine du métamorphisme ; Ils sont souvent considérés encore comme des roches sédimentaires, par exemple :

- Schiste ardoisiers

Roches ayant acquis une schistosité, à grain fin et homogène, à surface parfois légèrement satinées, noire, grise ou violacée, se débitant en plaquettes laminées dont le constituant principal est l'argile.

- Schistes bitumineux

Schiste contenant du bitume naturel, noir, à toucher gras, riche en matières organiques sapropéliques. Appelés aussi : schistes carburés, schistes pétrolifères.

2. Schistes du métamorphisme général faible (Epizonal)

Ces schistes montrent des recristallisations minérales plus nettes, par exemple :

- Schistes sériciteux ou satinés

Roches ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques, de teinte généralement grise à surface blanchâtre nacrées ou satinées dues à la présence de feuillets de séricite.

- Schistes talqueux

Schistes contenant du talc, accompagné de micas et de quartz, formé lors du métamorphisme de roches ultramafiques.

- Schistes chloriteux

Roches ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques, verdâtre, riche en fines lamelles de chlorite avec fréquemment des amphiboles vert pâle et des granules microscopiques d'épidote.

- Schistes lustrés

Roches métamorphiques cristallines et foliées, composées principalement de calcschistes verts ou des schistes bleus.

3. Schistes du métamorphisme général plus fort (Catazonal)

- Micaschistes

Roche métamorphiques communes, épizonales à mézonales, à grains généralement moyens, à schistosité et foliation marquées, constituées de lamelles de micas visibles à l'œil nu, claire ou sombres selon la couleur du mica, en alternance avec des lamelles de quartz. C'est donc des schistes micacés. Les micaschistes dérivent des argiles et des pélites calcaireuses.

4. Schistes du métamorphisme de contact

- Schistes tachetés

Schistes dans lesquels le métamorphisme de contact à basse intensité a développé des minéraux de néoformation qui se concernent en agrégats ayant l'aspect de taches. Ces roches sont, en général, de couleur grise à noire.

III.4. ESSAIS D'IDENTIFICATIONS

Après concassage manuel des blocs de Schiste, une étude d'identification a été réalisée au laboratoire.



Figure III.3 : Granulats de schiste après concassage.

III.4.1. TENEUR EN EAU (W)

La teneur en eau est le quotient de la masse de l'eau interstitielle (m_w) par la masse des grains solide ; est déterminée selon la norme NF P94-050 (méthode par étuvage).

L'essai de détermination de teneur en eau consiste à peser un échantillon humide puis le passer à l'étuve à 75°C pendant 24 heures le peser une autre fois à sec. Donc la teneur en eau pondérale est calculée comme suit : $W = (M_h - M_s) / M_s$

Les résultats obtenus sont représenté dans le tableau III.1.

Tableau III. 1 : Teneur en eau du schiste.

Mh (g)	Ms (g)	W %
3000	2985,6	0,48

Un deuxième essai effectué sur un autre échantillon après immersion dans l'eau, les résultats obtenus sont :

Tableau III. 2 : Teneur en eau du schiste après immersion.

Mh (g)	Ms (g)	W%
1283,4	1204,6	6,54

Teneur en eau moyenne $w = 7,02\%$.

Le schiste étudié présente une teneur en eau faible à moyenne ; ceci peut être expliqué par le fait que le matériau est prélevé en période estivale et donc influencé par l'effet de la température.

III.4.2. LES MASSES VOLUMIQUES

a) La masse volumique sèche pd par pesée hydrostatique

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-053.

L'essai consiste à peser l'échantillon de roche sec (m_s), paraffiné aussitôt après la totalité de sa surface extérieure puis peser de nouveau et procéder à la pesée hydrostatique.



Figure III.4 : Appareillage utilisée pour peser hydrostatique.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.3.

Tableau III. 3: Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.

	1 ^{er} essai	2 ^{ém} essai	3 ^{ém} essai
Masse de l'échantillon sec (g)	83	76.2	74.3
Masse de l'échantillon paraffiné à l'air (g)	88.8	81.5	78.2
Masse de paraffine (g)	5.8	5.3	3.9
Volume paraffiné (cm ³)	6.44	5.89	4.33
Masse humide d'échantillon paraffiné à l'air (g)	88.8	81.5	78.2
Masse de l'échantillon paraffiné immergé (g)	36.6	32.3	32.5
Volume échantillon paraffiné (cm ³)	52.2	49.2	45.7
Volume échantillon (cm ³)	45.76	43.31	41.8
Densité apparent (g / cm ³)	1.81	1.75	1.78
Moyenne	1.78		

Le tableau III. 4 représente la classification selon la masse volumique sèche.

Tableau III. 4: Classification selon la masse volumique sèche.

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

Selon le tableau ci-dessus, nous avons un schiste de masse volumique sèche moyenne.

b) La masse volumique humide ρ_h

On a: $w = 0.48\%$,

$$\rho_h = \rho_d \times (1+w)$$

$$\rho_h = 1.78 \times (1+0.45)$$

$$\rho_h = 2.581 \text{ (g/cm}^3\text{)}.$$

c) La masse volumique des particules solide ρ_s (pycnomètre)

La détermination de la masse volumique des particules solides est effectuée selon la norme NF P94-054. Elle consiste à mesurer le volume des particules solides par un pycnomètre en utilisant l'eau distillée ou déminéralisée.

ρ_s est utilisée pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé. Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

La masse volumique des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \frac{m_1}{(m_0 + m_1) - m_2}$$

Avec

m_0 : masse du pycnomètre vide remplie d'eau ;

m_1 : masse de l'échantillon ;

m_2 : masse du pycnomètre + eau + échantillon ;

ρ_w : masse volumique de l'eau égale à $1(\text{g/cm}^3)$.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.5.

Tableau III. 5: Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides.

M0 pycnomètre	2630
M1 pycnomètre +échantillon	3899,4
M2 pycnomètre +eau+échantillon	4289,3
M3 + pycnomètre eau	3512,5
ρ_s	2,58

III.4.3. INDICE DES VIDES, DEGRE DE SATURATION ET POROSITE

a) Indice des vides (e)

L'indice des vides est le rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides. Il permet de savoir si notre matériau est serré ou lâche.

Il est déterminé par la relation suivante :

$$e = V_v/V_s \quad (\text{l'indice des vides peut être supérieure à 1}).$$

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_s et ρ_d) selon la formule :

$$e = \rho_s / \rho_d - 1$$

Vu que les masses volumiques sont déterminées, on déduit l'indice des vides par la deuxième relation. $e = 0.45$.

b) Degré de saturation S_r

Le degré de saturation indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en pour-cent.

$$S_r = (V_e / V_s) * 100 \quad (\text{lorsque le sol est saturé, } S_r = 100\%)$$

Il peut aussi être défini par la formule suivante :

$$S_r = (\rho_s / \rho_w) \times (w / e)$$

Sachant que $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$.

$$S_r = (2,58/1) \times (0.48/0,45)$$

$$S_r = 2.752\%$$

Tableau III. 6 : Détermination du degré de saturation. (D'après TERZAGHI)

Sr %	Appréciation
100	Saturé
76 – 99	Détrempé
51 – 75	Mouillé
26 – 50	Humide
1 - 25	Légèrement humide
0	Sec

D'après le tableau III.6 le Schiste étudié est donc dans un état légèrement humide.

c) Porosité n

La porosité est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V). Elle peut s'exprimer en pourcentage ou sans dimension.

$$n = V_v / V \quad (\text{la porosité est toujours inférieure à 1}).$$

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elles sont liées par la formule :

$$n = e / (e + 1)$$

$$n = 0.45 / (0.45 + 1)$$

$$n = 31.03 \%$$

Les résultats des essais d'identification sont résumés dans le tableau III.7.

Tableau III. 7 : Résumés des résultats précédents.

w (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr (%)	n (%)
0,49	2,58	1,78	2.581	0,45	2,752	31,03

Commentaire : le schiste étudié présente une teneur en eau, un degré de saturation et un indice des vides très faibles.

III.4.4. LES LIMITES D'ATTERBERG

Selon sa teneur en eau, un sol sensible à l'eau peut se présenter sous trois états

1. État liquide : les grains de sol sont indépendants et ne se touchent pas. Leurs mouvements relatifs sont aisés.

2. État plastique (pâtes) : les grains sont approchés et ont mis en commun l'eau absorbée qui agit comme un sachet en plastique dans lequel les grains peuvent se mouvoir sans s'écarter.

3. État solide : les grains se sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelque points en chassant l'eau absorbée. Les frottements internes sont alors importants.

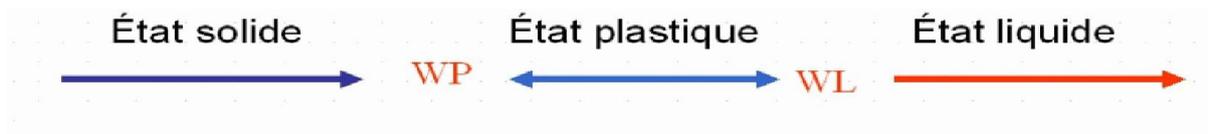


Figure III.5 : Les différents états du sol.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristique du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400µm. Ces limites sont déterminées selon la norme française NF P94 -051.

a) Limite de liquidité w_l

C'est la teneur en eau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure pratiquée dans l'échantillon placé dans une coupelle après 25 chocs.



Figure III.6: Détermination des limites de liquidité w_l .

b) Limite de plasticité w_p

C'est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint $3,0 \pm 0,5$ mm.



Figure III.7: Détermination des limites de plasticité w_p .

c) Indice de plasticité I_p

Différence des limites w_l et w_p . Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p = w_l - w_p$$

Interprétation des résultats

Nous avons constaté que les limites de liquidité et de plasticité du matériau étudié sont non mesurables. C'est-à-dire que nous n'arrivons pas à avoir de pâtes cohérentes en présence d'eau et que l'échantillon s'effrite entre les doigts à chaque essai comme du sable.

Nous avons remarqué que le matériau a des fines plutôt sableuses et granulaires et ne présente pratiquement aucune cohésion entre les grains même en présence d'eau. Donc, il n'existe pas de domaine plastique pour ce matériau.

III.5. ANALYSE CHIMIQUE DU SCHISTE

Le rapport d'essais d'analyse chimique déterminé par le Laboratoire Central Des Travaux Publique (LCTP de Tizi -Ouzou) est résumé dans le tableau III. 8.

Tableau III. 8: Rapport de l'analyse chimique du schiste.

Composants	Pourcentage %
	Schiste marron
Sulfates ($\text{CaSO}_4; 2\text{H}_2\text{O}$)	Trace
Chlorures (NaCl)	0.23%
Carbonates (CaCO_3)	25.86%
Anhydride Carbonique	11.38%

Interprétation des résultats

- **Teneur en Sulfates CaSO_4** : Les sulfates, sont extraits à l'acide chlorhydrique dilué à partir d'une prise d'essai du granulats, selon la norme NF 1744-1(P 18-660-1).

Tableau III. 9: Classification des sols en fonction de leur teneur en sulfates.

Teneur en sulfates	Degré d'agressivité	Symbole	Niveau de protection
0.24 – 0.6	Faiblement agressif	A1	1
0.6 – 1.2	Moyennement agressif	A2	2
1.2 – 2.4	Fortement agressif	A3	2
> 2.4	Très Fortement agressif	A4	3

En se basant sur le rapport de l'analyse chimique réalisée et la classification présentée dans le tableau III.9, nous pouvons dire que le schiste étudié est faiblement agressif et présente des traces de sulfate.

- **Chlorures (NaCl)** : Les chlorures sont exprimés et rapportés en teneur en ion chlore en pourcentage massique du granulats.

Les résultats obtenus montrent que notre matériau contient un faible pourcentage de chlorures.

- **Teneur en CaCO₃**: Cette teneur est un bon indice de résistance mécanique et sensibilité à l'eau. Selon ça valeur, le comportement évolue de celui d'une argile vers celui d'une roche (Cordary, 1995).

Tableau III. 10 : Description des sols en fonction de leur teneur en CaCO₃.

Teneur en CaCO ₃	Désignation du sol
00 – 10	Argile
10 – 30	Argile marneuse
30 – 70	Marne
70 - 90	Calcaire marneuse
90 - 100	calcaire

La teneur en carbonates du schiste étudiée est de 25.86%, il se comporte comme une argile marneuse.

III.6. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Cette analyse est réalisée sur des échantillons de classe (0 / 20 mm) a sec selon la norme (NF P 94-040). Elle permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons.

1. Principe du tamisage

La granulométrie est la mesure de la répartition des grains suivant leur dimension, pour les sols grenus ou pulvérulents : le matériau sera séché à l'étuve pendant 24 heures.

On emboîte les tamis les uns sur les autres, dont leurs ouvertures dans un ordre décroissant du haut vers le bas,

En partie inférieure on dispose un fond étanche, et en haut, un couvercle sera disposé afin d'éviter toute perte du matériau pendant le tamisage.



Figure III.8: Analyse granulométrique par tamisage.

2. Résultats du tamisage

Les résultats de l'analyse granulométrique seront traduits sous forme de courbe appelée courbe granulométrique, qui permet de classer les matériaux étudiés dans l'une des catégories de sols décrites par les normes en vigueur.

a) Le schiste

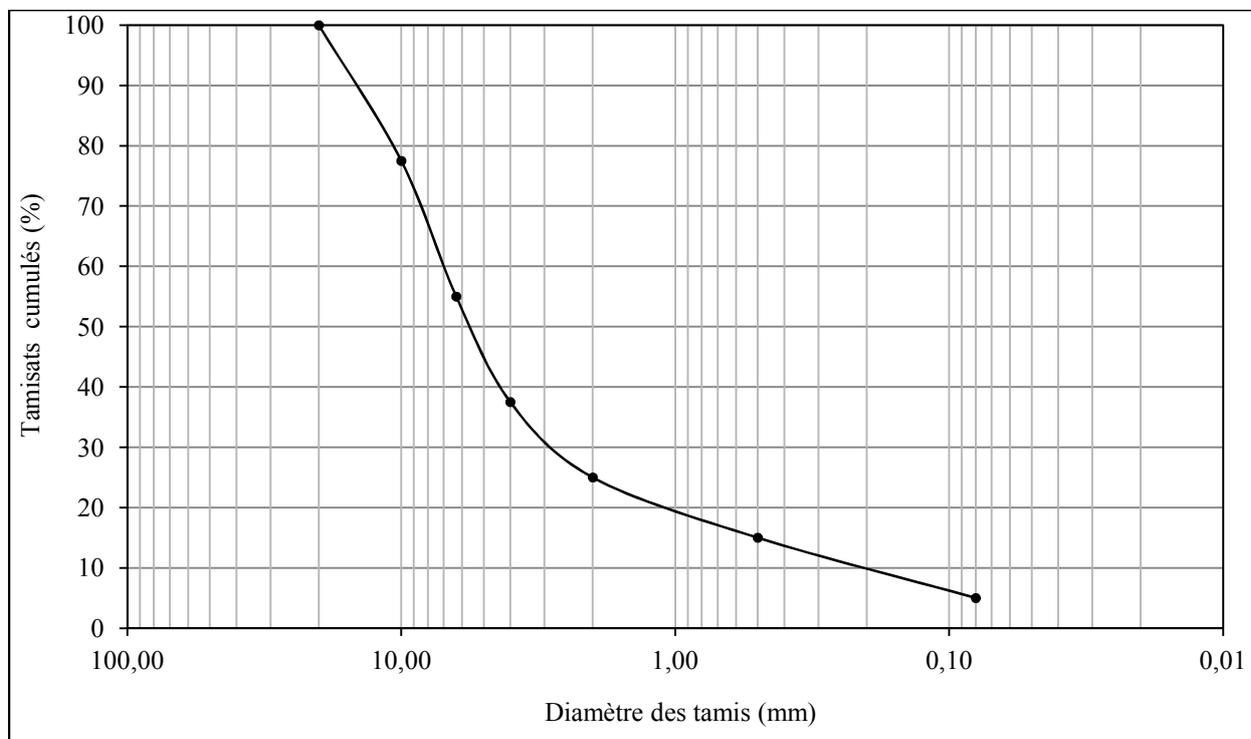


Figure III.9: Courbe granulométrique du schiste utilisé.

Le coefficient d'uniformité ou de Hasen le coefficient C_u .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- Si $C_u > 2$: la granulométrie est dite étalée.
- Si $C_u < 2$: la granulométrie est dite étroite.

Le coefficient de courbure C_c .

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} \times D_{60})}$$

- Si $C_u > 2$ et $1 < C_c < 3$; le sol est dit bien gradué.

Avec :

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

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

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

Dans notre matériau :

$$D_{10} = 0.2 ; D_{30} = 2 ; D_{60} = 7$$

$$C_u = 7/0.2 = 35$$

$$C_c = 2.9^2 / (0.2 \times 7) = 6$$

Donc ; Les granulats de schiste étudié se présentent sous forme d'une grave propre mal graduée, de granulométrie étalée.

b) Le verre

Le verre collecté, a été lavé à l'eau afin de le débarrasser des matières organiques (papier et colle) après séchage, Une analyse granulométrique a été réalisée au laboratoire après le concassage des bouteilles de verre.



Figure III.10: Préparation du verre.

Les résultats de l'analyse granulométrique du verre sont présentés sur la courbe granulométrique de la Figure III.9.

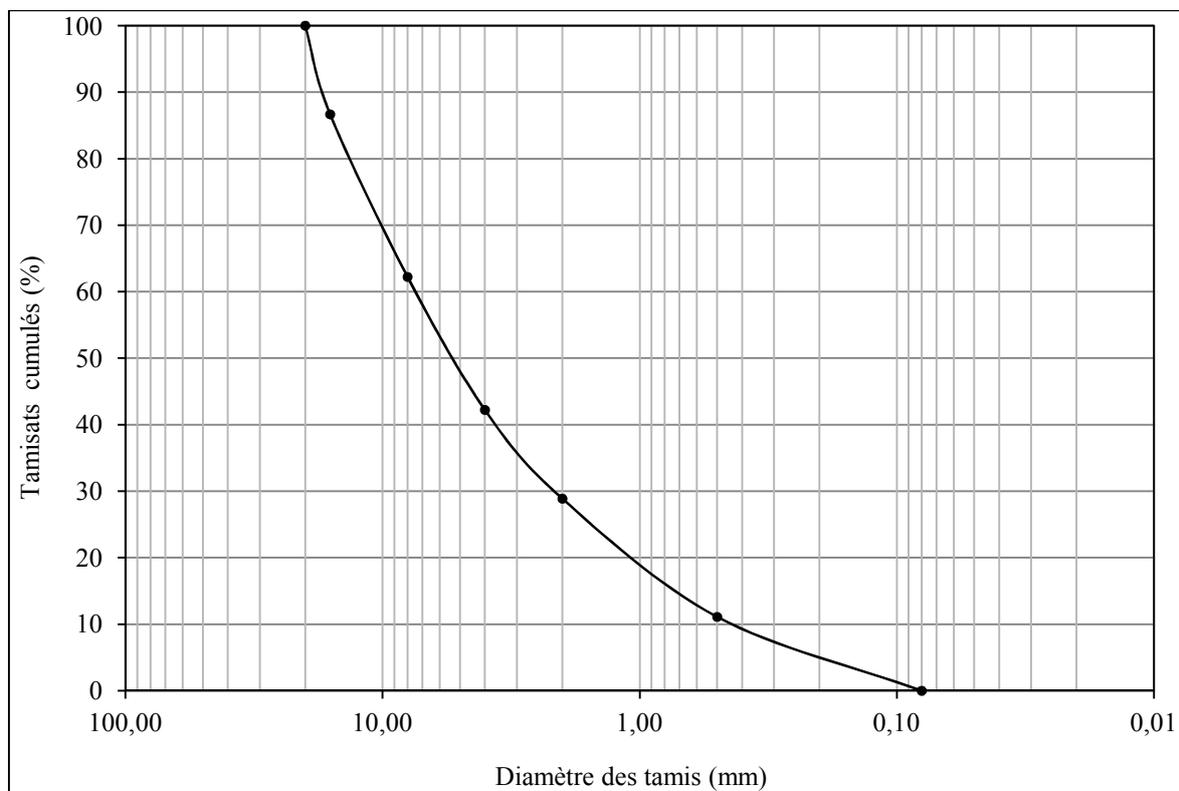


Figure III.11: Courbe granulométrique du verre utilisé.

$$C_u = 6.5 / 0.5 = 13$$

$$C_c = 2.2^2 / (0.5 \times 6.5) = 1.489$$

$C_u > 2$ et $1 < C_c < 3$; Donc ; le verre est dit bien gradué.

Les débris de verre, se présentent selon le système unifié de classification des sols USCS, sous forme dimensionnelle d'une d'une grave propre bien graduée, a granulométrie étalée.

III.7. QUELQUES PROPRIETES DU VERRE

Densité = 2,49 à 2,52 g/cm³ ;

Masse volumique sèche obtenue du Proctor standard = 1590 à 1720 kg/m³ ;

Masse volumique sèche obtenue du Proctor modifié = 1750 à 1890 kg/m³ ;

Porosité = 0.03 % ;

Absorption d'eau = 1.34 % ;

Angle de friction = ϕ = avec 100 % de verre brisé = 51,2° ;

Classification unifiée = SW ;

Pourcentage passant au tamis de 80 microns = 1 à 3 % ;

Perméabilité = 1 à 6×10^{-4} cm/sec; donc très perméable par rapport aux granulats conventionnels utilisés dans les chaussées.

Dans le cas du matériau verre, d'autres essais peuvent donner plus de détails sur sa composition. Sauf que, nos laboratoires ne disposent pas des moyens appropriés pour les réaliser.

III.8. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les échantillons soumis aux essais mécaniques, ont été préparés selon les proportions en schiste et en verre suivantes :

- Echantillon 1 : schiste seuls (classe 0/20 mm) ;
- Echantillon 2 : Mélange de schiste + 10% verre ;
- Echantillon 3 : Mélange de schiste + 20% verre ;
- Echantillon 4 : Mélange de schiste + 30% verre ;
- Echantillon 6 : Mélange de schiste + 50% verre.

III.9. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'identification des matériaux utilisés, afin de mieux présenter leurs aspects physiques, chimiques et minéralogiques. Les résultats obtenus ont permis d'avoir une idée sur la nature de ces matériaux. Ceci contribue sensiblement à mettre en évidence leur comportement mécanique sous les différents types de sollicitations auxquelles ils seront soumis.

Dans le chapitre qui suit, nous allons entamer la première série d'essais mécaniques. Elle comporte les essais de compactage Proctor et les essais de portance CBR en plus des essais Micro Deval et Los Angeles.

CHAPITRE IV

COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

IV.1.INTRODUCTION

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques et physiques des terrains.

L'une des méthodes la plus simple et la plus efficace et évidemment la plus utilisée est « le compactage ». Il permet d'augmenter la densité et la capacité portante d'un matériau grâce à l'application de forces extérieures statiques ou dynamiques.

Le compactage est la méthode la plus ancienne et la plus importante d'amélioration et de stabilisation des sols. Cependant, il a fait l'objet de plusieurs recherches et fut traité par plusieurs auteurs (Holtz et Kovacs, 1991), (Dupain et al, 2000), (Leonards, 1968) et (Robitaille et Tremblay, 1997)...etc. Certains auteurs (Arquie et Morel, 1988), (Arquie, 1972) et (Correa et Quibel, 2000), ont rédigé des ouvrages tout entier pour mieux détailler ce procédé, vu son importance et son utilisation fréquente et indispensable notamment dans les travaux de routes, de barrages,...etc.

Au compactage est directement liée la portance des sols, évaluée par les essais CBR avant ou après immersion. Les essais CBR sont indispensables pour tous travaux routiers et permettent le dimensionnement des chaussées.

En plus de l'état de l'art sur les différents essais, dans ce chapitre, sont présentés principalement les résultats d'essais de compactage, d'essais CBR avant et après immersion, ainsi que les résultats d'essais d'usure, à savoir le Micro Deval et Los Angeles.

COMPACTAGE DES MATÉRIAUX

IV.2. DEFINITION DU COMPACTAGE

Le compactage est une réduction de volume du sol presque instantanée due à la réduction des vides remplis d'air. Plus les grains seront resserrés les uns contre les autres, meilleure sera la résistance du sol au cisaillement et meilleur sera le comportement des remblais et couches de chaussées; on recherche donc l'indice des vides le plus petit possible (correspondant au pic de la courbe Proctor).

Le compactage améliore les propriétés mécaniques du sol remanié. Il complète l'effet de stabilisation par remplissage des vides par le liant. Le liant augmente la rigidité (répartition des charges) et diminue l'attrition des gros éléments. (Makhaly, 2008)

En général, après le compactage, le sol acquière :

- Une augmentation de la densité sèche (γ_d/γ_w) ;
- Une augmentation de la capacité portante ;
- Une augmentation de la résistance au cisaillement ;
- Une diminution de la perméabilité ;
- Une diminution de la compressibilité.

Compactage des sols

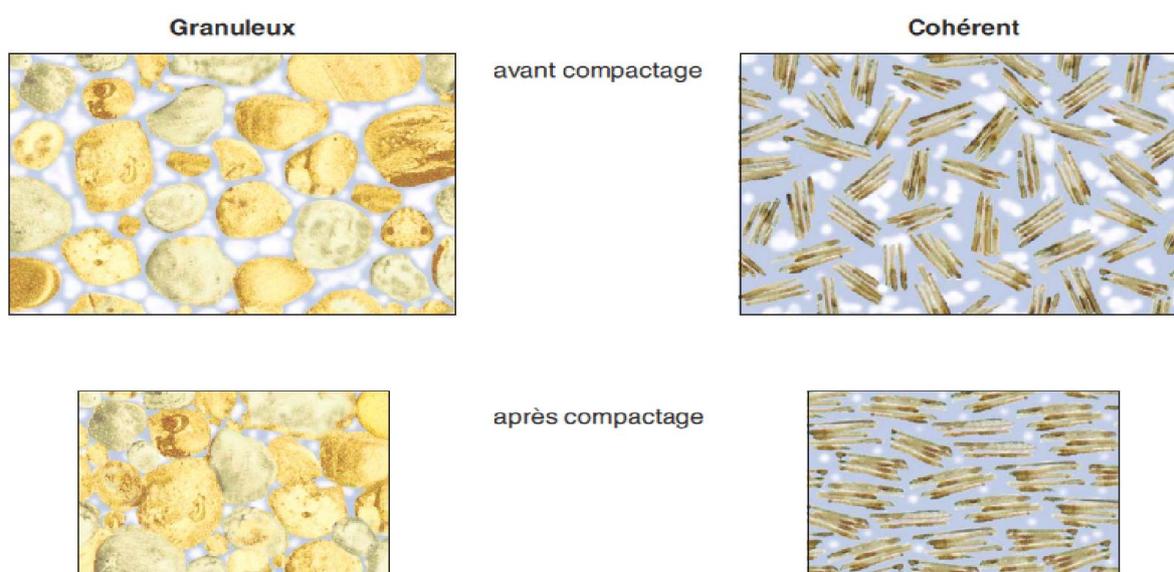


Figure IV.1 : Compactage des sols.

IV.3. ROLE DU COMPACTAGE SUR LA DUREE DE VIE DES OUVRAGES

Le compactage met le matériau dans un état suffisamment serré de telle sorte qu'un tassement ultérieur soit impossible ou peu important. Les mouvements relatifs sont réduits ou supprimés, diminuant ainsi l'attrition. En réduisant le volume des vides, le compactage augmente la densité apparente sèche et diminue la perméabilité qui est fonction de l'indice des vides.

Le compactage entraîne une élévation des caractéristiques mécaniques. En effet, le resserrement des grains augmente le nombre de contacts entre eux et par conséquent leur frottement. L'angle de frottement interne et la cohésion en sont accrus. Il y a également augmentation considérable du module de déformation (Makhaly BA, 2008 ; Kabre, 1991 in Gaye, 1995).

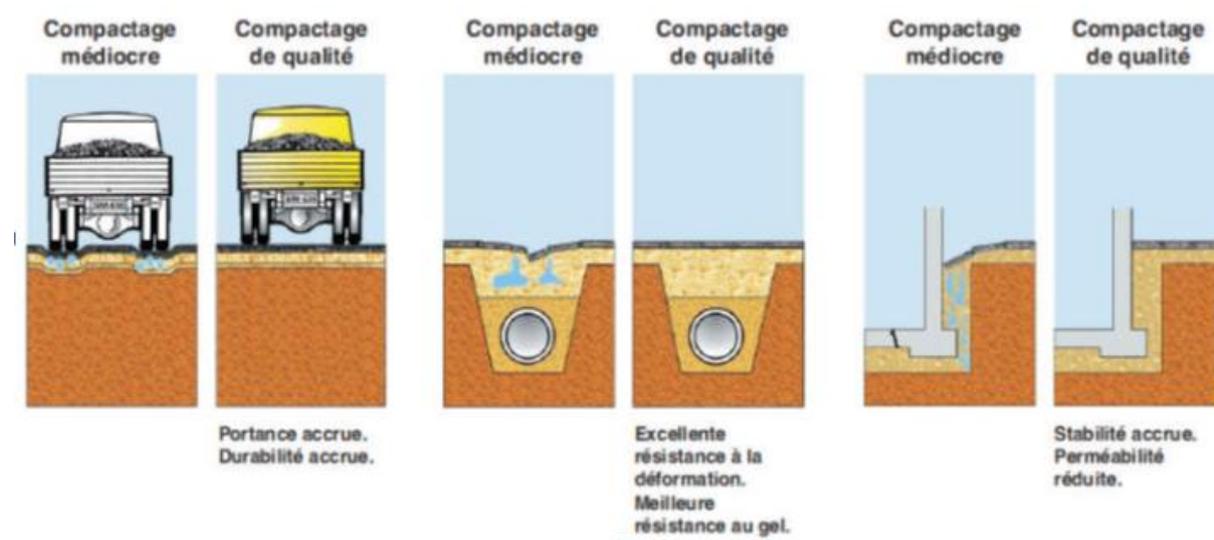


Figure. IV.2 : Objectifs du compactage.

IV.4. PARAMETRES INFLUANTS DU COMPACTAGE

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

IV.4.1. La teneur en eau (courbes de compactage)

C'est en 1933 que l'Ingénieur américain PROCTOR mit en évidence l'influence de la teneur en eau et de l'énergie de compactage sur le poids spécifique sec d'un sol grâce à l'essai qui porte son nom : Essai Proctor.

En effet pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau w d'un échantillon de sol et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec Q en fonction de cette teneur en eau, on obtient une courbe en cloche qui représente un optimum appelé Optimum Proctor.

Ce phénomène s'explique aisément; Lorsque la teneur en eau est élevée (partie droite de la courbe), l'eau absorbe une partie importante de l'énergie de compactage sans aucun profit de plus elle occupe la place des grains solides (aucun tassement possible). Par contre pour des teneurs en eau raisonnable, l'eau joue un rôle lubrifiant non négligeable et la densité sèche augmente avec la teneur en eau (partie gauche de la courbe).

IV.4.2. La nature du matériau

Le comportement et les sollicitations développés par les matériaux sont plus ou moins fonction de leur nature. De façon générale, la courbe Proctor est très aplatie pour les sables et par contre présente un maximum très marqué pour les argiles plastiques (Tchouani Nana ; Callaud, 2004). Pour les matériaux à courbe Proctor aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau. Ces matériaux sont peu sensibles à l'eau mais il est souvent difficile d'améliorer leurs caractéristiques (énergie de compactage à fournir plus importante).

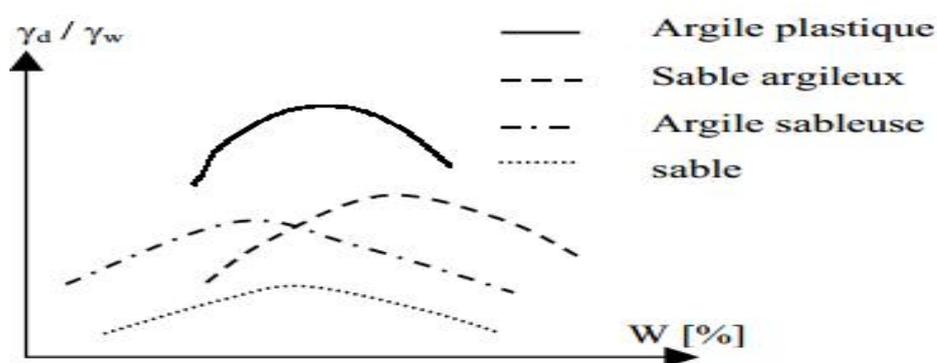


Figure. IV.3 : Influence de la nature du matériau.

IV.4.3. L'énergie de compactage

Pour un matériau donné, si l'énergie de compactage augmente, le poids volumique maximum augmente et les courbes deviennent plus pointues.

Khaye ; Machet ; Morel (1979) in Gaye (1995) montrent que la densité sèche après compactage augmente avec la charge de la roue et la pression de gonflage. Martinez (1980) in Gaye (1995) remarque que la réponse des matériaux granulaires aux sollicitations cycliques qui n'atteignent pas les charges de rupture peut être de trois types ;

- **Adaptation:** l'énergie dissipée et la déformation permanente sont nulles. La réponse du matériau est réversible et élastique ;
- **Accommodation :** les déformations permanentes sont stabilisées et l'énergie dissipée n'est pas nulle (phénomène d'hystérésis). La réponse réversible est non linéaire ;
- **Rochet:** l'énergie dissipée et les déformations permanentes augmentent avec la sollicitation jusqu'à la stabilisation ou la rupture (déformation plastique).

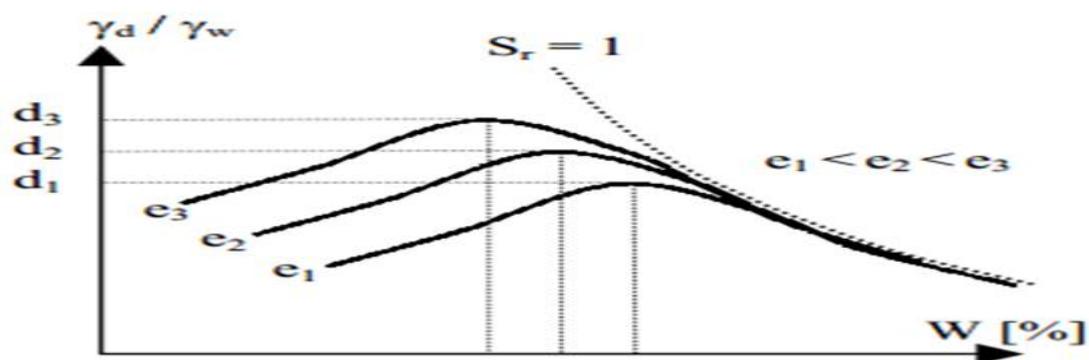


Figure. IV.4 : Influence de l'énergie de Compactage.

IV.4. 4. L'Angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines

L'Angularité, la forme, la granularité et le pourcentage des fines des matériaux très anguleux se mettent difficilement en place entraînant l'augmentation de l'énergie de compactage.

Arquie, Morel (1988) et inGaye (1995) montrent qu'un matériau ayant une bonne granularité aura une densité maximale plus élevée qu'un matériau creux ou ayant un excès de sable. Kabre (1991) et inGaye (1995) indique que la compacité augmente avec le coefficient d'uniformité $CU = D_{60} / D_{10}$.

D_{60} et D_{10} sont les diamètres des tamis qui laissent passer respectivement 60 % et 10 % du matériau.

Machet et Morel (1980) ainsi que in Gaye (1995) trouvent que pour une énergie de compactage donnée, l'indice des vides décroît avec le pourcentage d'éléments fins ($< 80\mu\text{m}$).

IV.4. 5. Sol-support

Pour une même épaisseur de matériau, un support plus rigide conduit à des densités plus élevées.

Les sollicitations développées par un rouleau vibrant sont considérablement influencées par les caractéristiques du sol-support, (Makhaly, 2008 ; Kabre, 1991 et inGaye, 1995).

IV.5. LES ESSAIS DE COMPACTAGE EN LABORATOIRE

Un échantillon de sol, de teneur en eau connue, est compacté dans un moule, aux dimensions normalisées, par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonctions de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différents teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs (W, γ_d), donc un point de la courbe de compactage (courbe A.A.S.C.H.O : American Association of State Highway Officials). Les essais peuvent être réalisés dans deux types de moules, et selon deux modalités, ce qui fait quatre types d'essais. D'autres types, moins couramment utilisés existent également.

On peut utiliser :

- Le moule Proctor 10,2cm de diamètre et 11,7 cm de hauteur (plus un collier mobile permettant de compacter jusque 13 ou 14 cm). Ce moule est utilisé pour les sols de granulométrie $< 5\text{mm}$, on y compacte environ 3 kg de sol.
- Le moule C.B.R. (California Bearing Ration) 15,2 cm de diamètre et 15,2 cm de hauteur. Convient pour des sols contenant des éléments $> 5\text{mm}$. Si le sol contient des éléments $> 20\text{mm}$, ceux-ci sont remplacés, à poids égal, par des éléments de 5 à 20mm. L'échantillon est ici de 6kg.

1. L'essai Proctor Normal (PN)

Dans lequel, l'énergie de compactage est relativement faible et correspond à un compactage modéré. On fait référence au Proctor Normal pour l'étude des sols de remblais (barrage en terre, digues), Pour les terrassements, on utilise en général l'essai Proctor Normal ; le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs.

2. L'essai Proctor Modifié (PM)

Dans ce cas, l'énergie de compactage est plus importante. Il est utilisé pour l'étude des sols de fondation (routes, pistes d'aérodromes,...). On fait référence au Proctor modifié pour les couches de chaussée (pistes d'aérodrome), le compactage effectué avec une énergie supérieure de celle Proctor normale vise une augmentation de la résistance mécanique de la couche.

Tableau IV.1 : Caractéristiques des appareils Proctor normal et modifié.

Type de moule	Essai Proctor normal		Essai Proctor modifié	
	Proctor	CBR	Proctor	CBR
Poids de la dame (kg)	2.48	2.48	4.535	4.525
Diamètre du mouton (m)	0.051	0.051	0.051	0.051
Hauteur de chute (m)	0.305	0.305	0.457	0.457
Nombre de couches	3	3	5	5
Nombre de coups par couche	25	55	25	55
Poids approximatif d'une couche (kg)	0.65	1.7	0.4	1.05
Diamètre du moule (m)	0.1016	0.152	0.1016	0.152
Hauteur du moule (m)	0.117	0.152	0.117	0.152

Dans cette étude, nous avons réalisé les essais de compactage selon le processus du Proctor modifié, tel que prescrit par la norme (NF P 94 – 093).

IV.6. ESSAI PROCTOR MODIFIÉ (PM)

IV.6.1. Définition

C'est une étude de la variation de la masse volumique (avec recherche de la densité maximale) d'un sol soumis à un compactage d'intensité donnée en fonction de l'évolution de la teneur en eau.

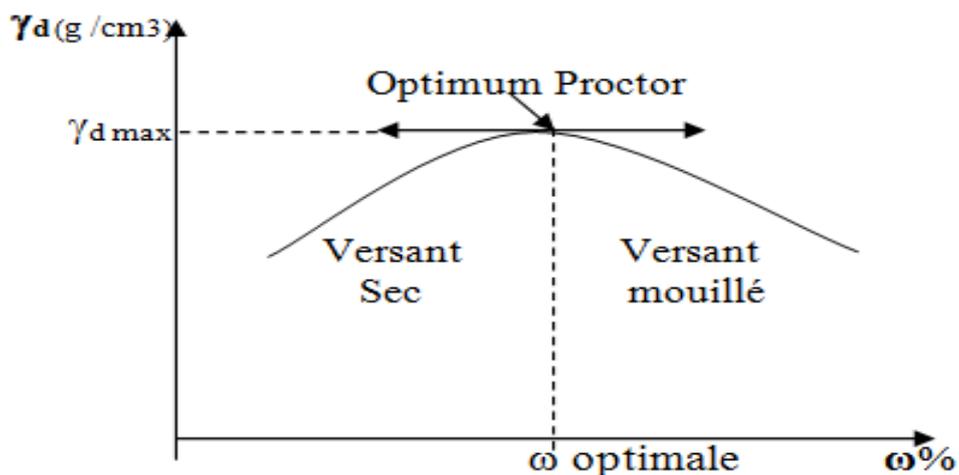


Figure IV.5 : Modèle de courbe Proctor.

IV.6.2. But de l'essai

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale.

IV.6.3. Principe de l'essai

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

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\gamma_d/\gamma_w, w$); on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.



Figure. IV.6 : Essai Proctor.

IV.6.4. Matériel utilisé

Pour cet essai nous avons à notre disposition ;

- Moule Proctor,
- Dame Proctor,
- Règle à raser,
- Balance,
- Etuve,
- Eprouvette graduée,

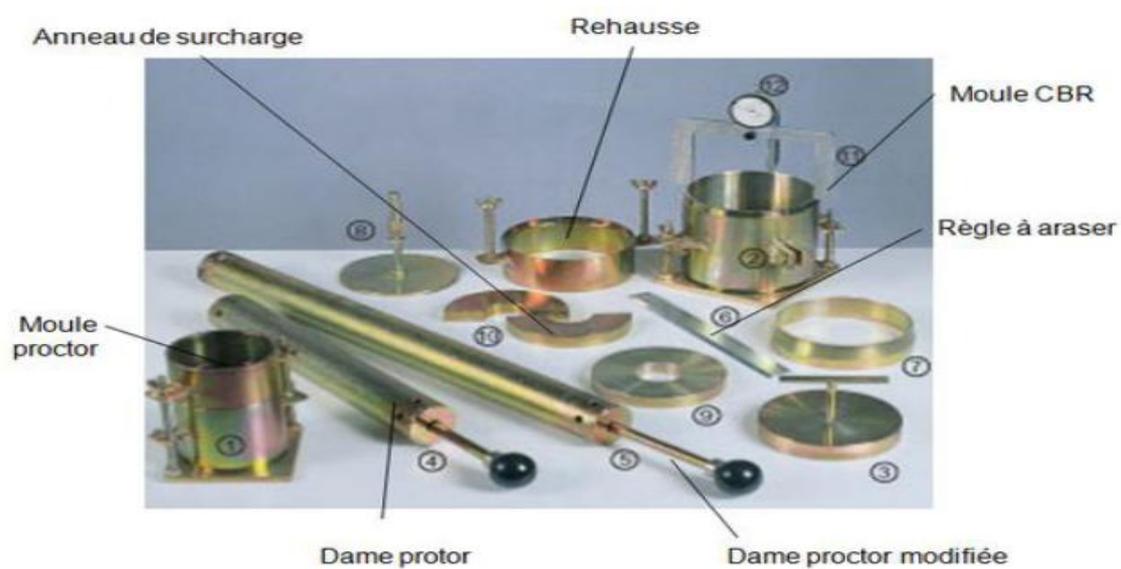


Figure. IV.7 : Appareillage Proctor.

IV.6.5. Expression des résultats

On porte chaque mesure de la densité sèche sur un graphe en fonction de la teneur en eau correspondante.

Schiste + 0% verre

Tableau IV.2 : Résultats d'essai Proctor pour schiste.

ph	ps	w	Densité
4681,7	4545,4	3,00	2,14
4812,6	4641,1	3,70	2,18
5190,4	4897,4	5,98	2,31
5019,2	4644,1	8,10	2,18
4901,38	4502,9	8,85	2,12

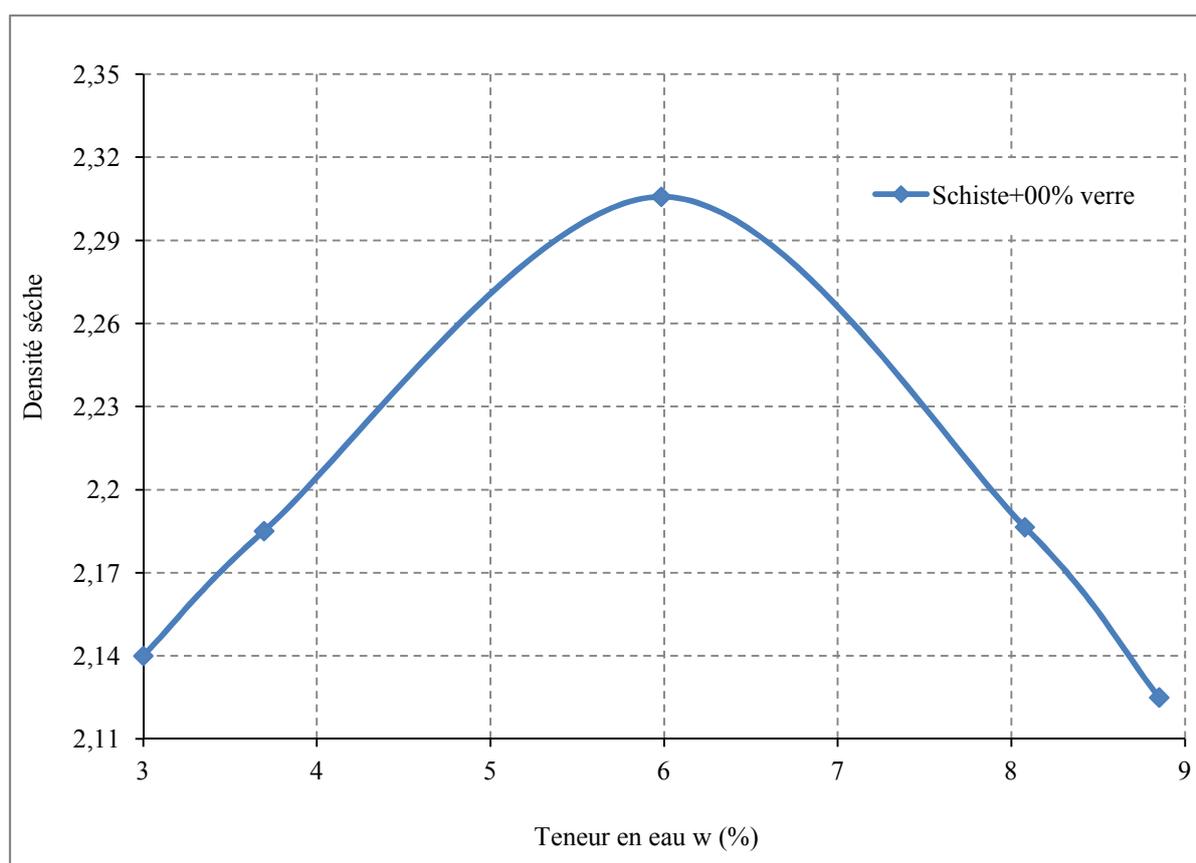


Figure IV.8 : Courbe Proctor du schiste + 0% de verre.

Schiste + 10% verre

Tableau IV.3 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 10%verre.

ph	ps	w (%)	Densité
4743,8	4587,8	3,4	2,16
4860,2	4669,1	4,10	2,20
5098,8	4816,9	5,85	2,26
5088,5	4715	7,32	2,22
4965,8	4609,1	8,2	2,17

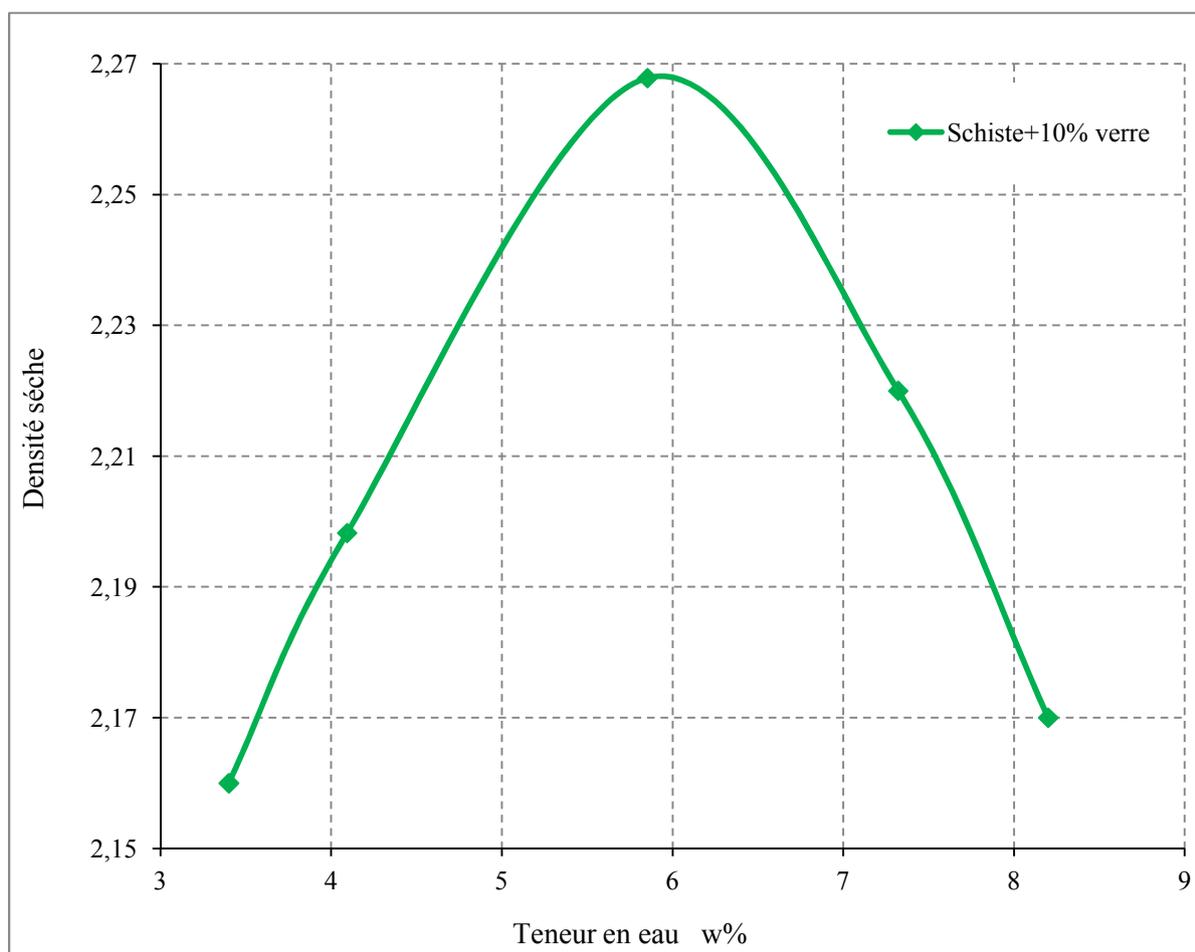


Figure IV.9 : Courbe Proctor du schiste+10%verre.

Schiste + 20% verre

Tableau IV.4 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 20%verre.

ph	ps	W (%)	Densité
4581,2	4439,2	3,2	2,09
4800,1	4604,5	4,48	2,17
4940,9	4675	5,69	2,201
4729,6	4413,3	7,17	2,1

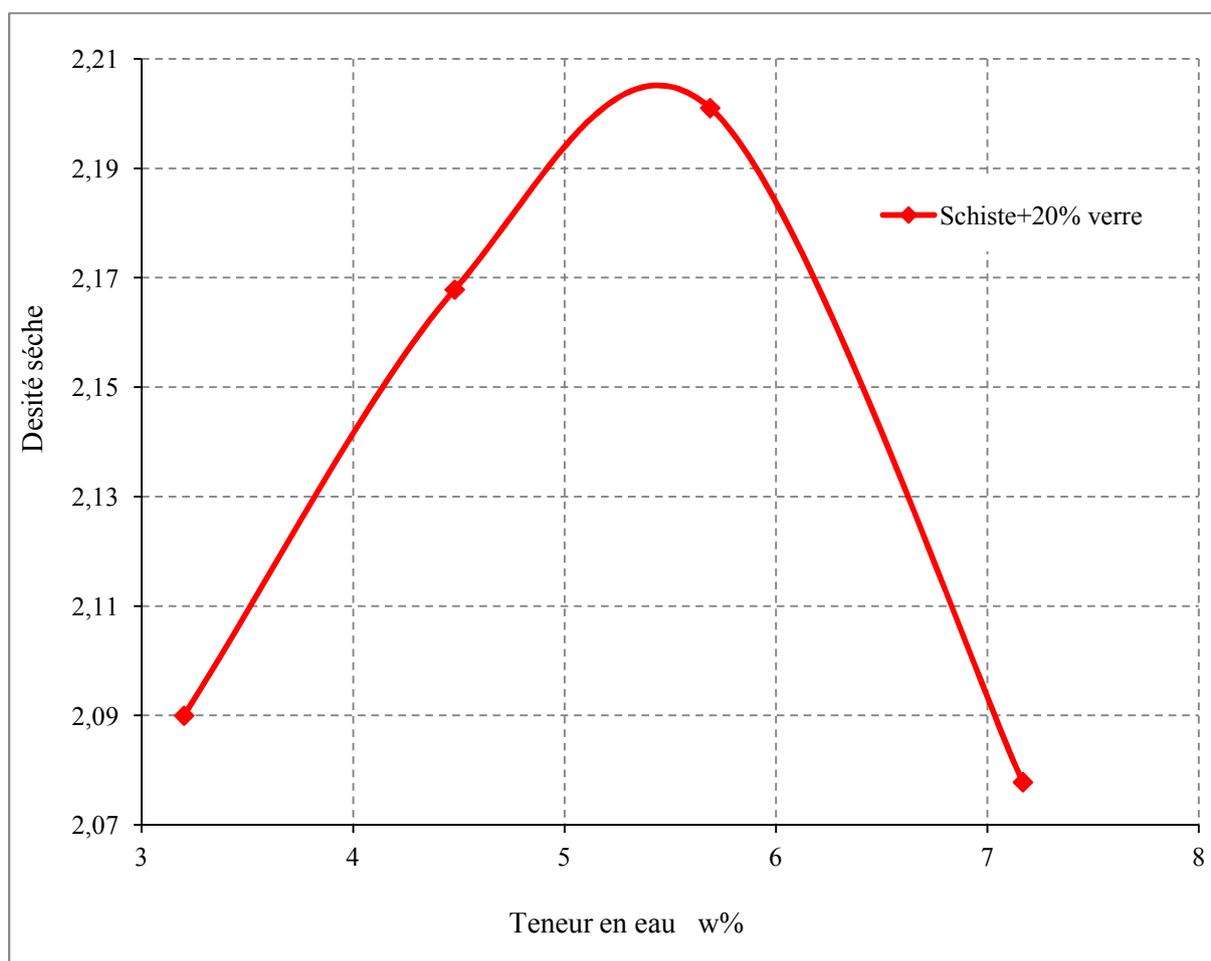


Figure IV.10 : Courbe Proctor du schiste+20%verre.

Schiste + 30% verre

Tableau IV.5 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 30%verre.

ph	ps	W %	Densité
4486,6	4396,1	2,06	2,07
4746,4	4572,6	3,80	2,15
4729,6	4464,5	5,94	2,10
4759	4421,9	7,00	2,07

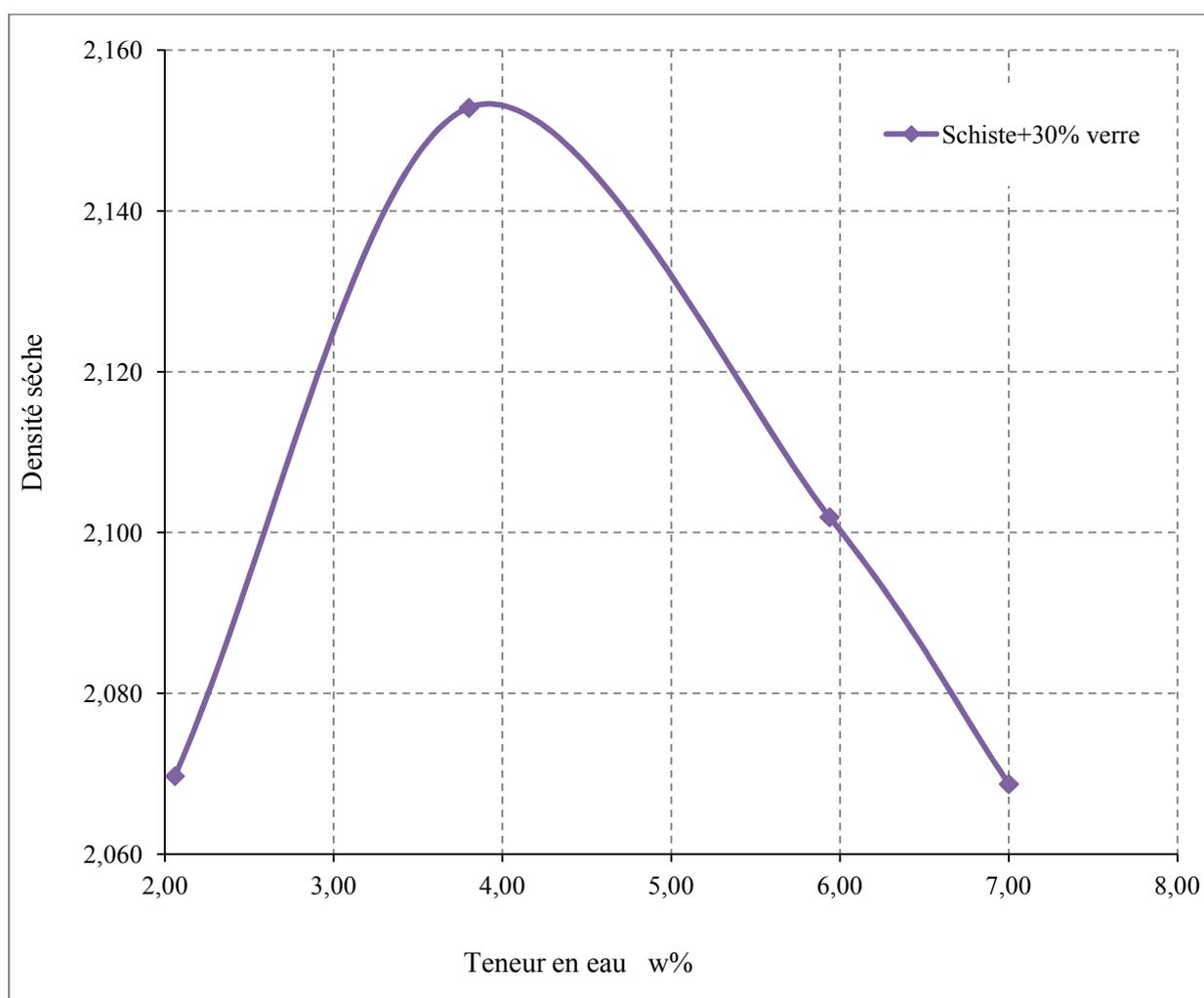


Figure IV.11 : Courbe Proctor du schiste+30%verre.

Schiste + 50% verre

Tableau IV.6 : Résultat d'essai Proctor pour schiste + 50%verre.

ph	ps	w	Densité
4415,1	4354,2	1,4	2,05
4509,6	4419,9	2,19	2,08
4705,3	4528,4	3,91	2,13
4617,4	4356,2	6,00	2,05

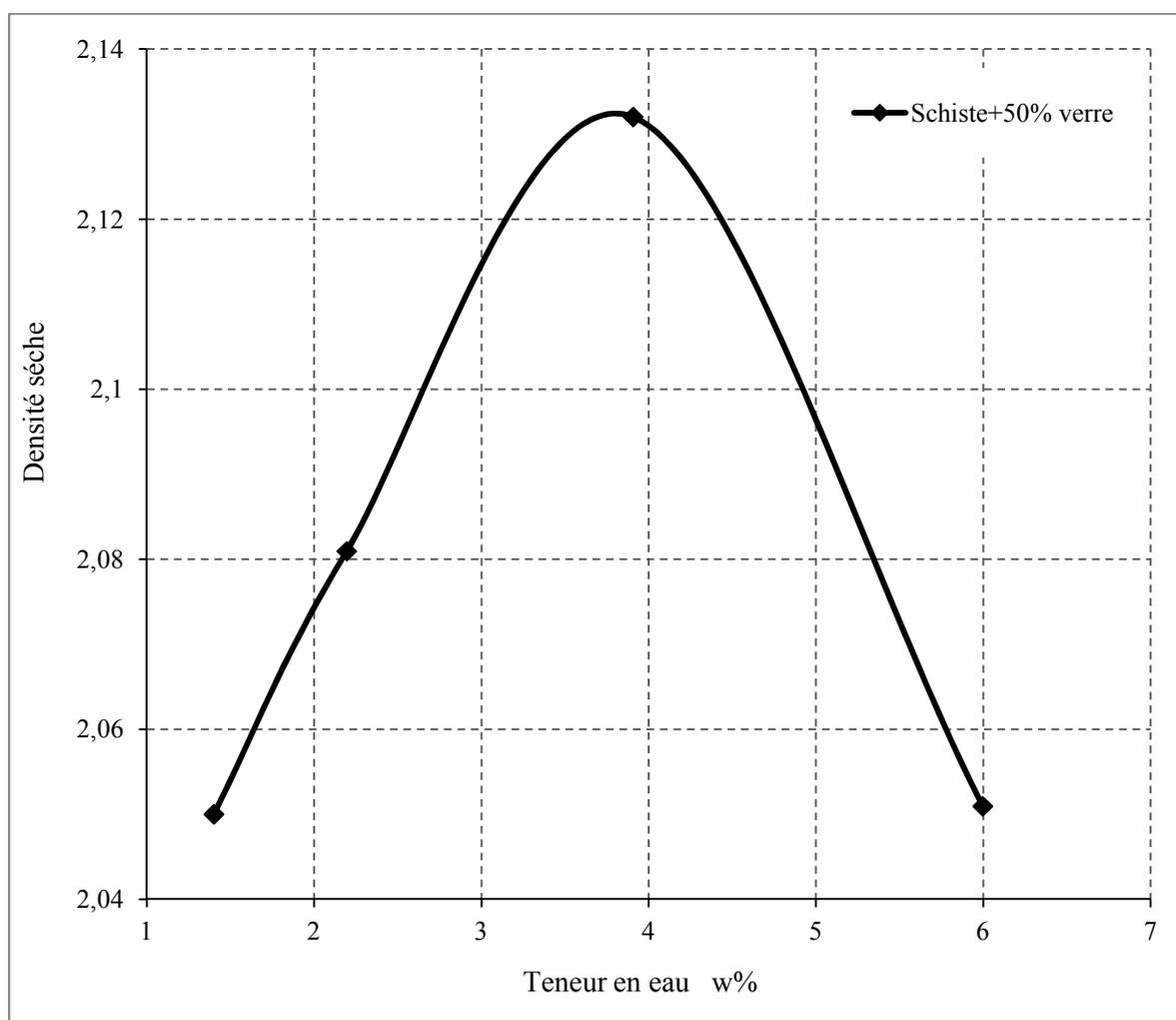


Figure IV.12 : Courbe Proctor du schiste+50%verre.

Courbe comparative de tous les échantillons

Les courbes Proctor obtenues pour l'ensemble des mélanges sont portées sur la figure IV.13.

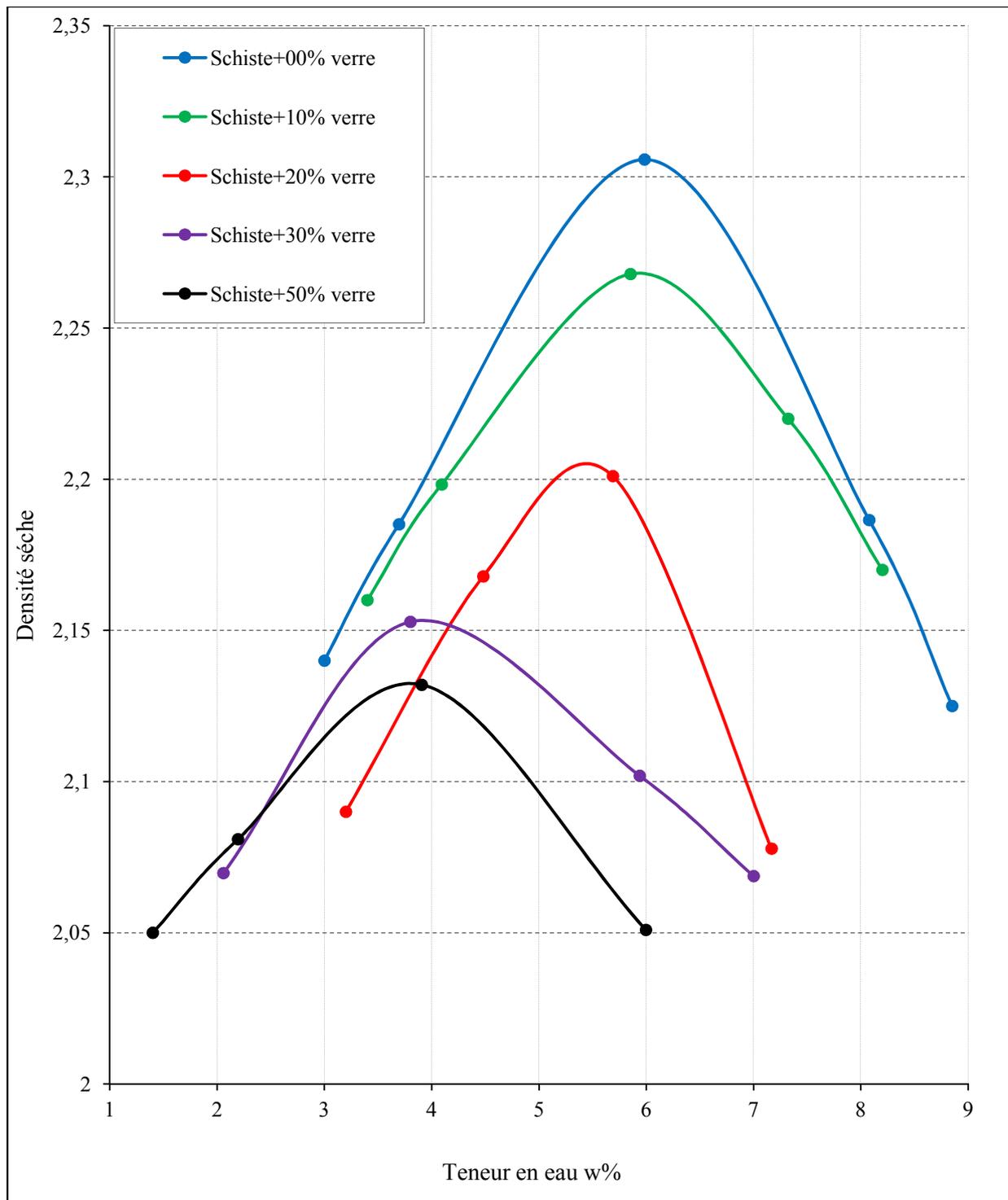


Figure IV.13 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

D'après la figure IV.13, nous constatons que les courbes Proctor ont une allure légèrement bombée, ce qui permet de dire que les mélanges compactés ne sont pas très sensibles à l'eau.

Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales obtenues sont résumées dans le tableau IV.7 et présentées sur les figures IV.14 et IV.15.

Tableau IV.7 : Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales.

Echantillon	W (%)	Densité
Schiste + 0% verre	6	2,305
Schiste + 10% verre	5,86	2,268
Schiste + 20% verre	4,5	2,21
Schiste + 30% verre	3,93	2,155
Schiste + 50% verre	3,8	2,133

1. Densité sèche

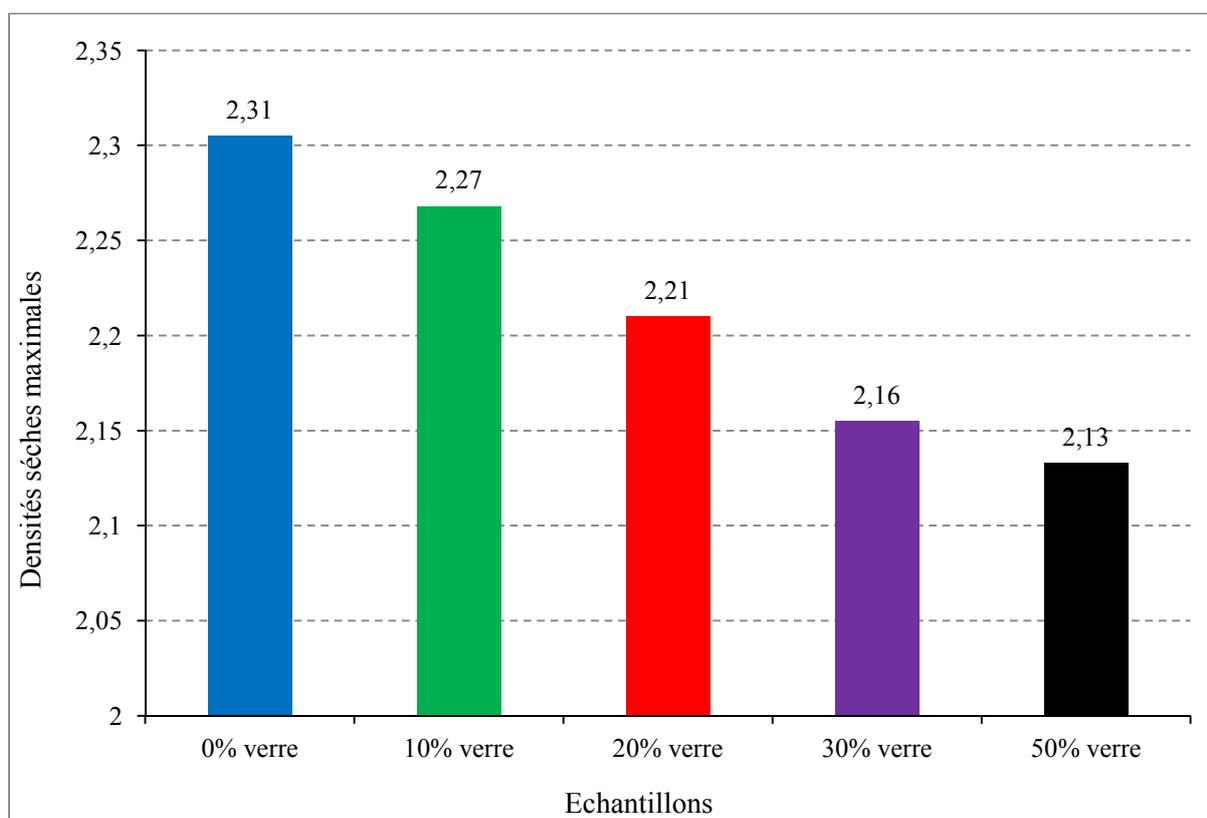


Figure IV.14 : Évolution des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de verre.

Au compactage des différents échantillons, les mélanges de schiste + verre présentent des densités sèches qui diminuent de plus en plus avec l'augmentation de leurs teneurs en verre. Ceci peut être dû à la structure feuilleté (schisteuse) des granulats de schiste et des débris de verre. De telles structures présentent généralement de faibles densités. Toutefois, ces densités sont supérieures à 2,10 ce qui qualifie les mélanges étudiés du point de vue compactage comme matériaux acceptables pour les corps de chaussée.

Les matériaux de chaussées utilisés par différentes entreprises, présentent généralement des densités variant de 1.9 à 2.6 en fonction du trafic supporté par la chaussée. Comme les différents mélanges présentent des densités sèches au compactage supérieur à 2, ces matériaux peuvent être ainsi proposés pour utilisation dans les couches de chaussées de moyen à fort trafic de classe inférieure à T3 (CETBP 1984).

2. Teneur en eau

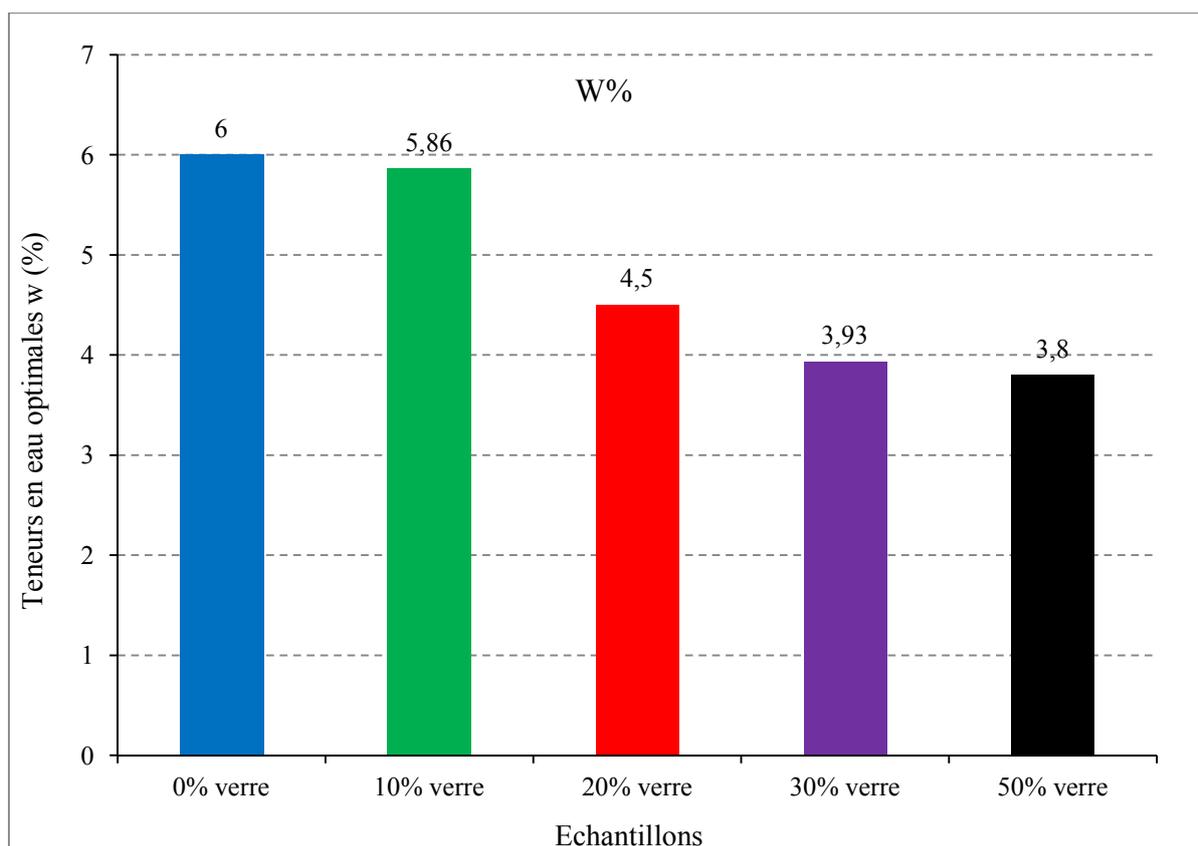


Figure IV.15 : Évolution des teneurs en eau optimales en fonction du pourcentage de verre.

La teneur en eau optimale obtenue au compactage du schiste seul est de 6 %. L'ajout du verre a influencé également la teneur en eau de compactage ; cette dernière a diminué avec l'augmentation de leurs teneurs en verre ; Ceci peut se traduire par une économie d'eau très importante, notamment dans le cas des régions où l'eau est une denrée rare.

PORTANCE DES MATÉRIAUX ÉTUDIÉS

La portance du sol est sa résistance à la rupture déterminée par l'essai CBR, le Californien Bearing Ratio (norme NF P 943078). Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport à un sol type de référence. Il permet d'observer le comportement du matériau vis à vis sa densification ainsi qu'une idée de sa résistance à l'eau.

IV.7. ESSAI DE PORTANCE CALIFORNIEN (CBR : California Bearing Ratio Test)

IV.7.1. Définition

On peut attribuer l'essai de C.B.R (California Bearing Ratio Test) à l'état californien. Qui est originalement un essai routier peu avant la 2^{ème} guerre mondiale. Le corps des ingénieurs de l'armée américaine adopta cette méthode pendant la guerre puis la développa et l'améliora. Après des années on peut dire que l'essai de C.B.R est reconnu à l'échelle mondiale.

IV.7.2. But de l'essai

Essai de CBR il sert à caractériser la portance du matériau c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre, mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée à une perméabilité amenée par une forte immersion en cas de fortes pluies. Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part et dans un matériau de référence.

IV.7.3. Principe de l'essai

Le matériau est compacté à la teneur en eau optimale suivant les procédures de l'essai Proctor modifié : moule CBR qui sera compacté de 55 coups par couche (5 couches). On poinçonne ensuite le moule avec un piston de 19,35cm de diamètre à une vitesse de 1,25 mm/min.

Les essais de CBR permettent de déterminer les indices, selon le but recherché et la fonction de ce sol la :

- 1) IPI indice portant immédiat : Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux ;
- 2) Indice portant CBR immédiat : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau ;

- 3) Indice portant CBR : après immersion: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique (présence de l'eau).

Le but de cette imbibition est de faire subir au sol (ou matériau en générale) les plus mauvaises conditions et cela en la présence de nappe phréatique.

L'indice CBR exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{(2.5)} = \text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN)} * 100 / 13.35 ; \\ I_{(5)} = \text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)} * 100 / 20. \end{array} \right.$$

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

$$G = \Delta h / H \times 100$$

Avec :

Δh : est la variation de hauteur mesurée (mm).

H : hauteur initiale de l'éprouvette.

IV.7.4. Matériel utilisé

1. Matériel de confection des éprouvettes :

Moule CBR, Dame Proctor modifiée, Disque d'espacement, Règle à araser, Bacs, Eprouvette graduée 150 ml environ, Balance, Etuve.

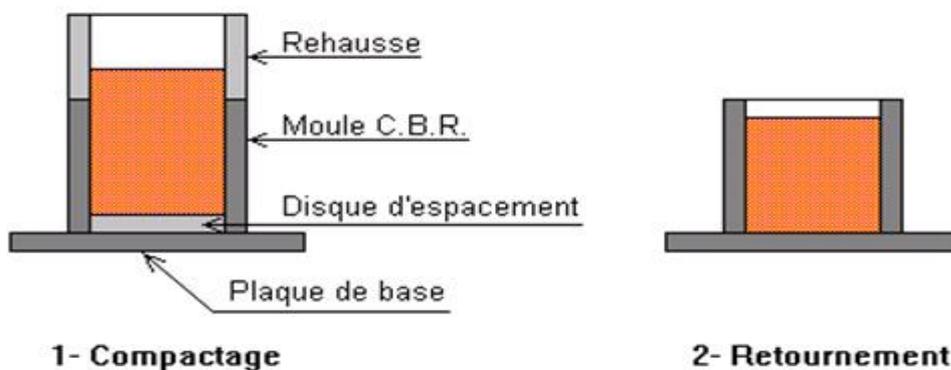


Figure IV.16 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

2. Matériel de poinçonnement :

Il comprend une presse de compression de 50 KN minimum et de 60 mm de course, équipée d'un poinçon cylindrique en acier de 19.35 cm² de section et de 20 cm de longueur.



Figure IV.17 : Presse CBR.

IV.7.5. Mode opératoire

Les essais CBR avant et après immersion, sont réalisés au laboratoire selon la norme française (NF P94-078).

Avant de versé le sol dans le moule il faut respecter les étapes suivantes :

- . Rejoignez la plaque de base et le moule CBR.
- . Placer une feuille de papier filtre au fond du moule.
- . Peser à vide l'ensemble « moule+ plaque de base».
- . Déterminer le volume qui sera occupé par l'éprouvette de sol une fois compactée.
- . Fixer la rehausse.

a) Détermination de l'IPI

- Placer l'ensemble sur la presse, en position centrée par rapport au piston. Procéder au poinçonnement de la manière suivante :
- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston jusqu'à ce qu'il vienne affleurer le matériau.
- 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 1,25 - 2 - 2,5 - 5 - 7,5 et 10 mm et arrêter le poinçonnement à cette valeur.
- L'éprouvette est alors démoulée, pesée et introduite dans l'étuve réglée à 75 °C pour déterminer sa teneur en eau.

b) Détermination de l'indice CBR après immersion

- 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.
- Effectuer la mise à zéro du comparateur.
- Après 4 jours d'immersion, mesurer la hauteur de gonflement Δh indiquée par le comparateur.
- Laisser égoutter quelques minutes et déposer le trépied, le comparateur, les surcharges et le disque de gonflement.
- Placer l'ensemble sur la presse, replacer les surcharges comme précédemment et procéder au poinçonnement.



Figure IV.18 : Détermination de l'indice CBRimm.

IV.7.6. Expression des résultats



Figure IV.19 : Eprouvettes après poinçonnement.

Les résultats obtenus au laboratoire sont présentés sous forme de tableaux et de courbes.

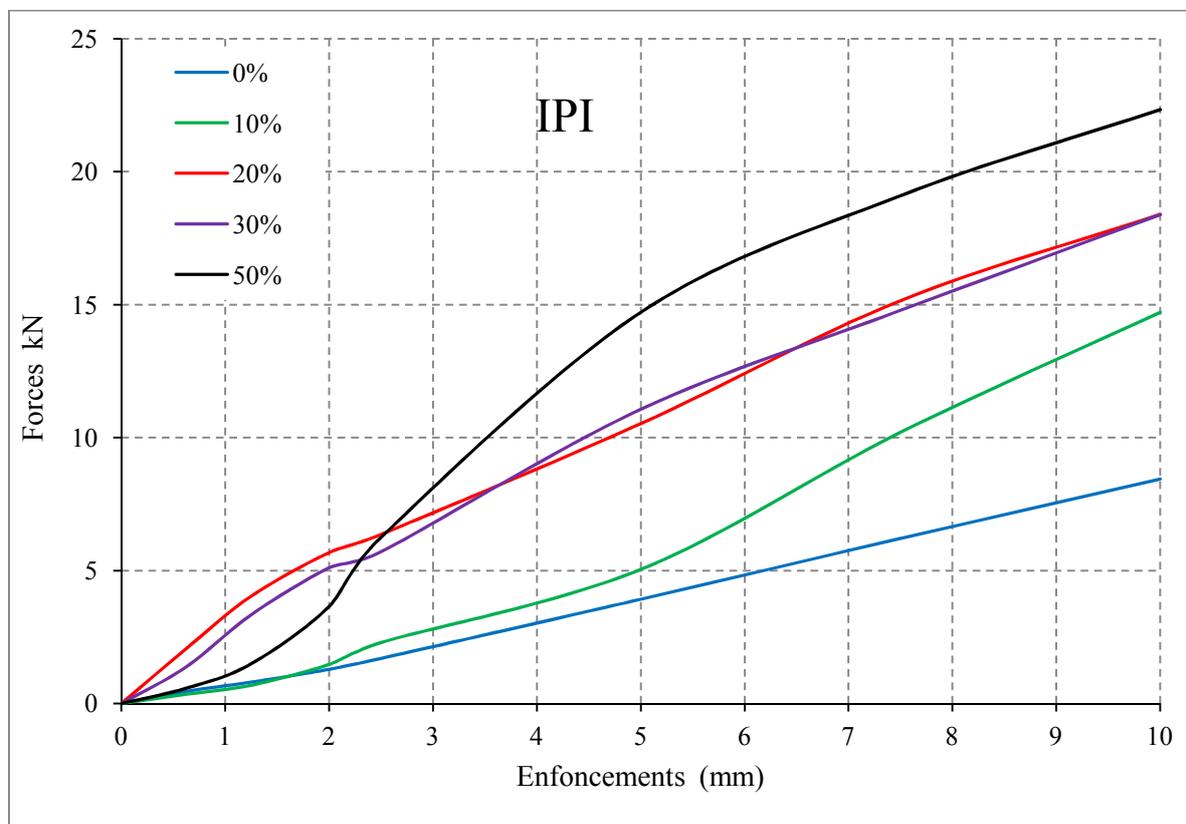


Figure IV.20 : Courbes effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement (cas des IPI).

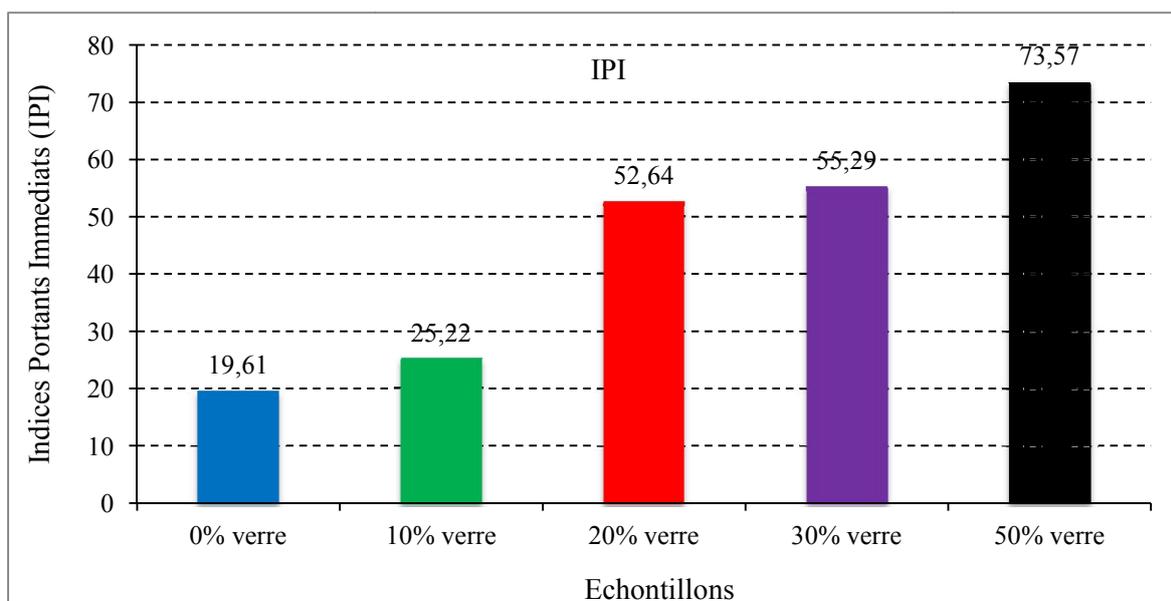


Figure IV.21 : Evolution des IPI en fonction du pourcentage de verre.

Les résultats de l'essai CBR après immersion sont présentés dans le tableau IV.7 et la figure IV.19.

Tableau IV.8 : Résultats d'essai CBRimm.

Echantillon	Gonflement%	W%	I _{2,5}	I ₅
0%	0	6,52	3,95	6,88
10%	0	6,46	3,09	14,7
20%	0	5,61	17,18	30,15
30%	0	6,7	12,88	55,95
50%	0	6,62	59,96	66,96

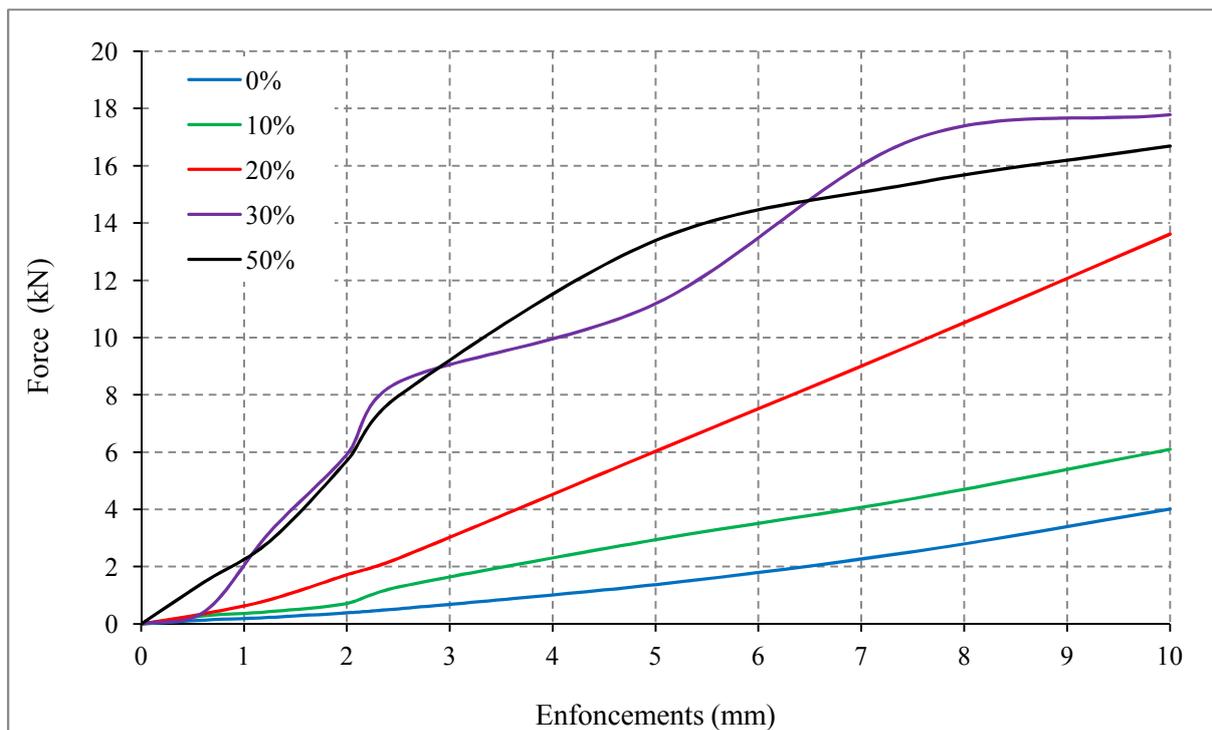


Figure IV.22 : Courbes effort de poinçonnement en fonction de l'enfoncement, (cas des CBRimm).

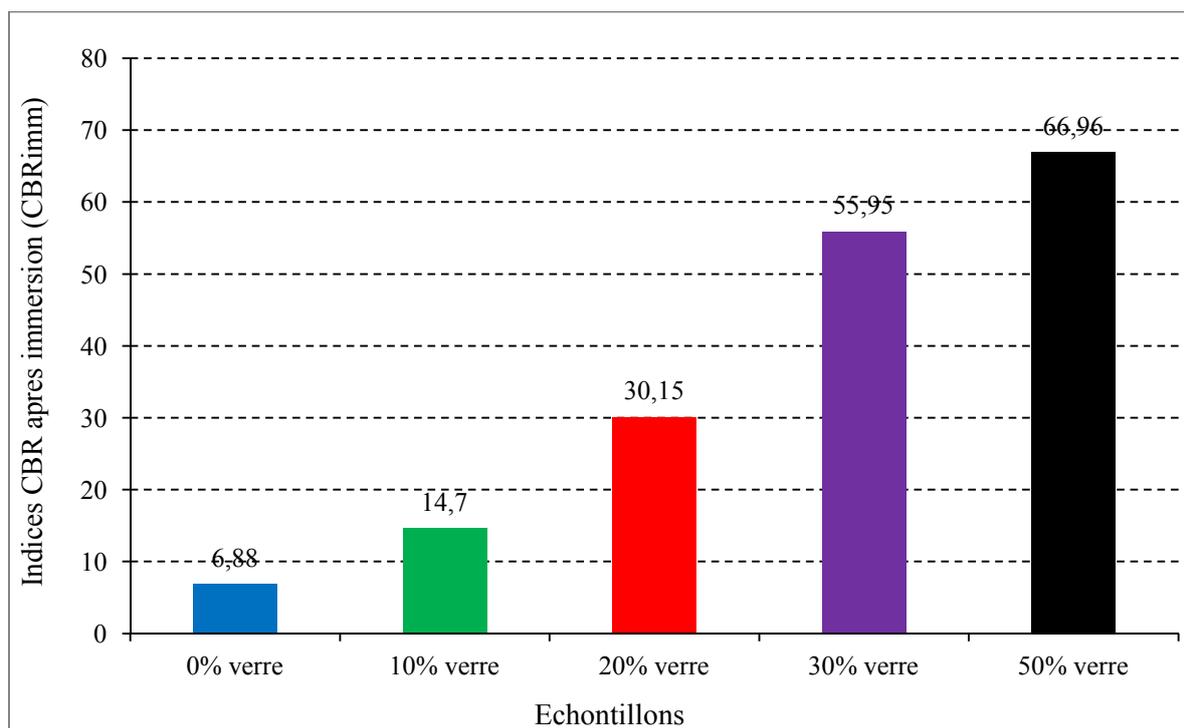


Figure IV.23 : Évolution des CBRimm en fonction du pourcentage du verre.

Tableau IV.9 : Résumé des résultats d'essai CBR (IPI et CBRimm).

Echantillon	IPI	CBR imm
Schiste + 0%verre	19,61	6,88
Schiste + 10%verre	25,29	14,7
Schiste + 20%verre	52,64	30,15
Schiste + 30%verre	55,29	55,95
Schiste + 50%verre	73,57	66,96

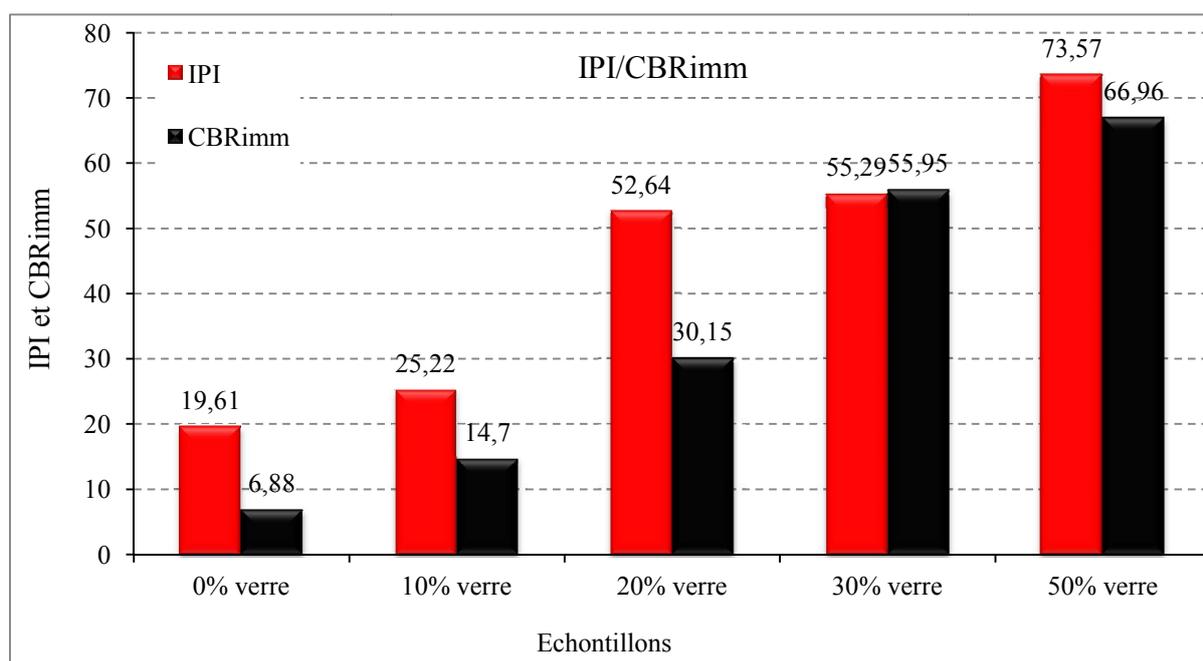


Figure IV.24 : Courbes comparatives d'indices CBRimm et IPI.

IV.7.7. Interprétation des résultats

Bien que l'ajout du verre a fait chuter la densité sèche du schiste aux essais de compactage, néanmoins, il améliore sensiblement sa portance. En effet, les deux indices CBR (IPI et CBR_{imm}) passent de (19,61 et 6,88) à (73,57 et 66,96) respectivement pour une teneur en verre de 50%.

Un écart important entre les deux indices CBR apparait sur les échantillons dont la teneur en verre est faible (inférieure ou égale à 20%). Au-delà de cette proportion de verre, les mélanges développent des portances très proches avant et après immersion.

Cependant, en se basant sur leur portance avant et après immersion, les granulats de schiste étudiés, se présentent respectivement comme matériaux déformables sans ornières à très déformables avec ornières importantes derrière l'essieu. Tandis qu'avec l'ajout de verre, les portances des mélanges avant et après immersion s'améliorent considérablement (IPI et $CBR_{imm} > 50$), leur permettant ainsi, de se classer selon Holcim dans la catégorie des sols non déformables, sans ornières sous essieux de 13 tonnes.

En termes de gonflement, les mélanges étudiés ne sont pas gonflants. L'indice de gonflement relatif G pour tous les mélanges est pratiquement nul (ne dépasse pas les 0,001%).

Les caractéristiques mécaniques obtenues aux essais Proctor et CBR sur les mélanges étudiés, sont satisfaisantes et vérifient les conditions exigées par les normes. Ceci permet de les proposer comme matériaux routiers à conditions de présenter des résultats satisfaisants sous d'autres essais routiers exerçant d'autres types de sollicitations.

AUTRES ESSAIS ROUTIERS

IV.8.ESSAI MICRO-DEVAL

IV.8.1.Définition

Mesure la résistance à l'usure d'un granulat, Il s'applique aux granulats naturels et artificiels utilisés dans le domaine routier, et le coefficient micro dévale (MDE) c'est un critère de classification des sols granulaires et matériaux rocheux.

Déterminer selon la norme P 18-572.

IV.8.2.Objectif de l'essai

Détermination du coefficient d'usure par attrition (frottements mutuels) des granulats en présence d'eau à l'aide de l'appareil MICRO DEVAL.

IV.8.3.Principe de l'essai

La prise d'essai, constituée par 500g d'une classe granulaire (4/6-6/10 ou 10/14mm), est placée, avec une charge constituée de billes d'acier de 10mm de diamètre, dans un cylindre métallique (La rotation du cylindre autour de son axe placé horizontalement entraîne une usure par frottement granulats-billes et la formation d'une proportion de fines d'autant plus grande que le matériau est plus tendre. Le pourcentage de ces éléments fins produits au cours de l'essai constitue le coefficient micro-Deval.

IV.8.4. Equipement nécessaire

- L'appareil Micro deval.
- Balance – tamis de 1.6 mm ; 8 mm ; 10 mm ; 12.5 mm et 14 mm
- Charge abrasive : billes sphériques de diamètre 10 mm±0.5 mm.

IV.8.5. Conduite de l'essai

- 1- Prendre une masse minimale de 2 Kg pour les granulats de la classe entre 10 mm et 14 mm de façon que 60% à 70% des granulats passent au travers le tamis de 12.5 mm.
- 2- Tamiser l'échantillon sur les tamis de 10 mm ; 12.5 mm et 14 mm pour constituer des fractions distinctes comprises entre 10 mm ; 12.5 mm et entre 12.5 mm et 14 mm , laver les fractions séparément à l'étuve jusqu'à masse constante.
- 3- Laisser refroidir puis mélanger les deux fractions afin d'obtenir un échantillon de laboratoire modifié d'une granularité comprise entre 10 mm et 14 mm.
- 4- faire l'essai sur deux éprouvettes chacune a une masse de granulats $M = 500g$, une charge de 5000 g avec 2.5 litres d'eau.
- 5- Mettre la machine en marche pendant 12000tr (environ 2 h à vitesse de 100tr/mn)
- 6- Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac.
- 7- Tamiser le matériau sur le tamis 1,6 mm, la Charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8mm.
- 8- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive.
- 9- Sécher le refus à 1.6 mm à l'étuve à 105 °C, puis le peser soit m,

$$MDE = 100 \times \frac{500 - m}{500} .$$

Avec

- MDE : Micro Deval en présence d'eau.
- m : Refus au tamis 1.6 mm.

Plus la valeur du MDE est élevée moins le matériau est résistant à l'usure par abrasion

MDE < 20 bon matériau conforme pour travaux routières.

MDE < 45 matériaux pour couche de forme.



Figure IV.25 : Mode opératoire d'essai micro deval.

IV.8.6.Résultats

$$\text{MDE} = 100 \times \frac{500 - 71,1}{500}$$

Tableau IV.10 : Calcul du coefficient micro-Deval.

M (g)	m (g)	MDE %
500	71,1	85,78

IV.9.ESSAI LOS ANGELES

IV.9.1.Définition

La mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats. Déterminer selon la norme P 18-573.

IV.9.2.Objectif de l'essai

Déterminer la résistance à l'abrasion (fragmentation par chocs plus usure par frottements réciproques) des granulats.

IV.9.3.Equipement nécessaire

- L'appareil Los Angeles.
- Un bac –balance - tamis.
- Des boulets sphériques de 47 mm ±1 mm de diamètre et pesant 420 à 445 g.

IV.9.4.Conduite de l'essai

1-Prendre une masse minimale de 15 Kg pour les granulats de la classe entre 10 mm et 14 mm de façon que 60% à 70%des granulats passent au travers le tamis de 12.5 mm.

2- Tamiser l'échantillon sur la classe granulaire choisie

Tableau IV.11 : Les classes granulaires utilisées.

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse de boulets (g)
4 – 8	8	3450 – 3540
6.3 – 10	9	3840 – 3980
8 – 12.5	10	4260 – 4420
10 – 14	11	4700 – 4860
12.5 – 16	12	5120 - 5300

- 3- laver le matériau tamisé et le sécher à l'étuve et prendre une masse 5000 g ± 5g.
- 4 -Introduire la charge de boulets correspondant à la classe granulaire de l'échantillon.
- 5- Mettre la machine en marche durant le nombre 500 rotations à une vitesse de 30à 33tr/min
- 6- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil.
- 7-Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis 1,6 mm, Laver le refus au tamis, égoutter et sécher à l'étuve à 105 °C, puis le peser, Soit m'le résultat de la pesée.



Figure IV.26 : Mise en place du granulat essai Los Angeles.

L'essai effectué sur un échantillon de classe granulaire 10/14 mm.

Le coefficient Los Angeles (LA) est déterminé par la formule suivante :

$$LA = \frac{5000-m}{5000} \times 100.$$

Avec : m le refus au tamis 1.6 mm.

Plus la valeur du coefficient Los Angeles est élevée plus le matériau est peu résistant aux chocs donc friable et fragile.

IV.9.5.Résultats



Figure IV.27 : Etat du granulat en fin d'essai.

Les résultats d'essai représenté sur le tableau IV.9.

Tableau IV.12 : Calcul du coefficient los Angeles.

M	m	LA (%)
5000	3133,3	37,334

$$MDE = 85,78 > 45$$

$$LA = 37,33 \leq 35$$

$$LA + MDE = 123.11 > 80$$

Tableau IV.13 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure.

Catégories	$L_A + M_{DE}$	L_A	M_{DE}
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

D'après le tableau IV.13 et les résultats des essais réalisés, nous pouvons dire que les granulats de schiste seuls sont de catégories E à F. Ce type de granulat présente de faibles résistances notamment à l'usure en présence d'eau.

Les essais MDE et LA ne peuvent être réalisés sur les mélanges contenant du verre à cause des moyens non appropriés au laboratoire pour contenir la poudre de verre (dangereuse). En principe, le verre peut améliorer le comportement du mélange à l'usure du fait qu'il est faiblement influencé par la présence d'eau, contrairement aux granulats de schiste.

IV.10. CONCLUSION

Les essais Proctor et CBR présentés dans ce travail ont permis de montrer l'aptitude des mélanges au compactage, ainsi que leur portance dans les plus mauvaises conditions hygrométriques. Les essais routiers (Los Angeles et micro-deval), permettent par contre, d'étudier la résistance à l'usure et aux chocs des matériaux présentés.

Cependant, pour mieux cerner le comportement du verre dans les corps des chaussées, il est soumis à d'autres types de sollicitations, à savoir les essais de cisaillement direct à la boîte qui feront l'objet du dernier chapitre suivant.

CHAPITRE V

ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE DE CASAGRANDE

V.1. INTRODUCTION

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondations, ouvrages de soutènement, remblais, talus etc.) et en particulier ceux des travaux routiers, il est nécessaire de connaître la résistance du sol afin de pouvoir dimensionner correctement les ouvrages. L'essai de cisaillement direct à la boîte est la plus vieille des méthodes de détermination des paramètres de la résistance au cisaillement des sols. Issu des expériences de Coulomb, il s'effectue à l'aide d'une boîte de cisaillement, dont la forme la plus récente a été élaborée par Arthur Casagrande. Cette boîte est constituée de deux parties se déplaçant l'une par rapport à l'autre dans un plan horizontal.

La résistance au cisaillement d'un sol est classiquement décrite par son critère de plasticité. Il exprime la relation existant à l'équilibre limite entre la contrainte tangentielle au plan de cisaillement τ et la contrainte σ normale à ce plan.

Dans ce chapitre, est traité aux essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande le comportement du schiste (mélange schiste et verre). La résistance au cisaillement de ces mélanges, leur variation de volume ainsi que l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques, tout en passant par quelques définitions et concepts concernant la notion de résistance au cisaillement, le but et le principe de l'essai, ses avantages et ses inconvénients...etc.

V.2. NOTION DE RESISTANCE AU CISAILLEMENT

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement. Ces contraintes de cisaillement entraînent des déformations du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle « surfaces de glissement » ou « surfaces de la rupture ».

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de la rupture, au moment de la rupture. Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage. (LCPC - 1987).

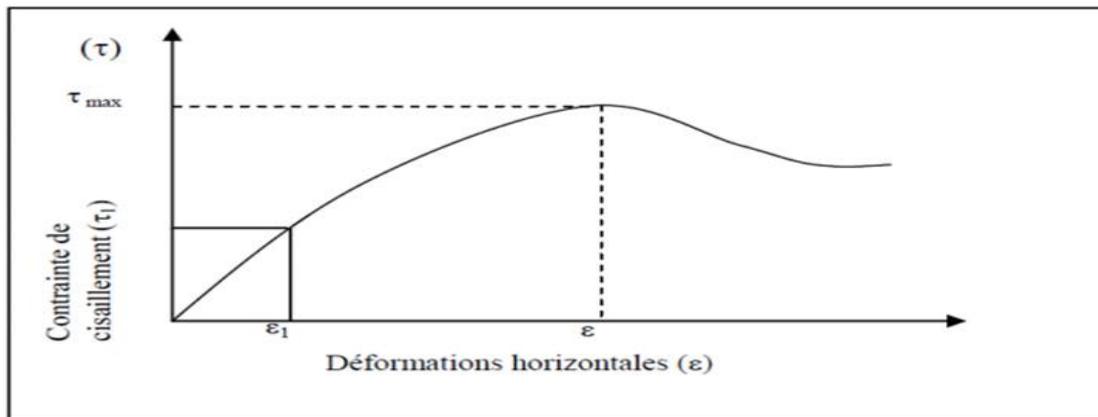


Figure V.1 : Courbe de contraintes-déformations.

Selon le (LCPC, 1987), la résistance au cisaillement peut être définie, sur ce graphique, comme étant :

- Le maximum de la contrainte de cisaillement τ_{max} ;
- La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation très grande ;
- La contrainte de cisaillement correspondant à une déformation plus ou moins arbitraire ϵ_1 .

Sauf dans des cas particuliers, on prendra comme résistance au cisaillement, la contrainte maximale de cisaillement.

V.3. BUT DE L'ESSAI

Les valeurs de la résistance au cisaillement ainsi définies sont portées sur graphique en fonction de la contrainte normale σ , s'appliquant sur le plan de rupture.

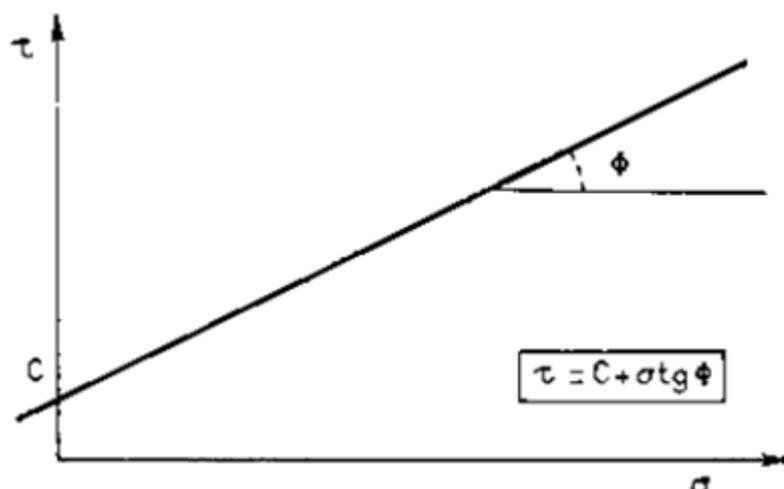


Figure V.2 : Droite intrinsèque.

La courbe obtenue est approximativement une droite appelée droite intrinsèque. L'angle que fait cette droite avec l'axe des abscisses est appelé l'angle de frottement φ , et l'ordonnée à l'origine de cette droite appelée la cohésion c .

L'équation de cette droite est donc $\sigma = c + \tau \operatorname{tg} \varphi$ Elle exprime « la loi de coulomb ».

Sols pulvérulents : la droite passe par l'origine des axes.

Sols cohérent : la droite ne passe pas par l'origine des axes. (Cordary, 1994).

V.4. APPAREILLAGE

Pour évaluer la résistance au cisaillement des sols, plusieurs appareils de laboratoire et in-situ sont développés. Le premier appareil de cisaillement direct a été construit par Alexandre Collin 1846 pour mesurer la résistance au cisaillement d'un sol argileux afin d'étudier la stabilité des talus. L'appareil de cisaillement direct par translation dans sa forme actuelle a été conçu par Casagrande en 1932. Ces autres en plus de Mohr ; Coulomb, Skempton,....ont tracé les notions et relations fondamentales de la résistance au cisaillement des sols. Par la suite, d'autres auteurs (De Bruyn et Thimus, 1996 ; Tinh , 2008 ; Dubois 2008 ;...) se sont intéressés au cisaillement des sols sous d'autres aspects plus pointus, à savoir l'effet de la température, du chargement-déchargement, de la minéralogie, de la dimension et de la forme des grains, du drainage, etc.

L'appareillage de cisaillement à la boîte de Casagrande permet de réaliser de cisaillement sur des échantillons de sol intacts, remaniés ou reconstitué, de forme cylindrique ou cubique. Ils permettent d'étudier la résistance au cisaillement des matériaux selon un plan horizontal imposé et déterminer les caractéristiques mécaniques de cisaillement (la cohésion C et l'angle φ).

L'appareil comprend :

- La boîte de cisaillement de section intérieure $A = L \times L = (60 \times 60) \text{ mm}^2$, elle est composée de deux demi-boîtes ;
- Un système mécanique permettant d'appliquer les contraintes verticales désirées ;
- Un système mécanique permettant de déplacer horizontalement la demi-boîte inférieure ;
- Un anneau dynamométrique indiquant les efforts de cisaillement ;
- Un comparateur au 1/1000 de millimètres indiquant les déformations horizontales ;

- Un comparateur au 1/100 de millimètres indiquant les déplacements verticaux ;
- Un chronomètre pour prendre les mesures chaque 15 secondes.

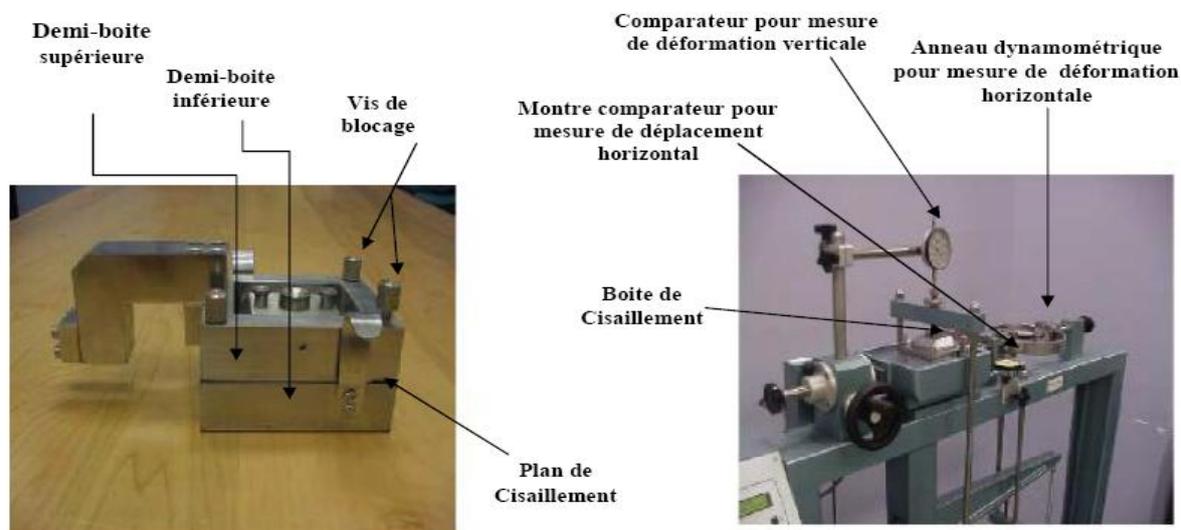


Figure V.3 : Appareillage de cisaillement.

V.5. PRINCIPE ET MODE OPERATOIR

V.5.1. Préparation des échantillons

Les essais sont réalisés selon la norme française (NF P94-071-1).

Echantillons de matériaux à l'état dense humide. Le matériau est réalisé avec la teneur en eau optimale déterminé après essais Proctor modifié.

V.5.2. Principe de l'essai

Le principe consiste à placer l'échantillon de sol à étudier entre deux demi-boîtes indépendantes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre dont le plan de séparation forme un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'échantillon. Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale déterminée.

La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement N est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. (Techouani, 1999).

Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon. L'échantillon subit donc un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel s'exerce une contrainte normale déterminée. (LCPC, 1987).

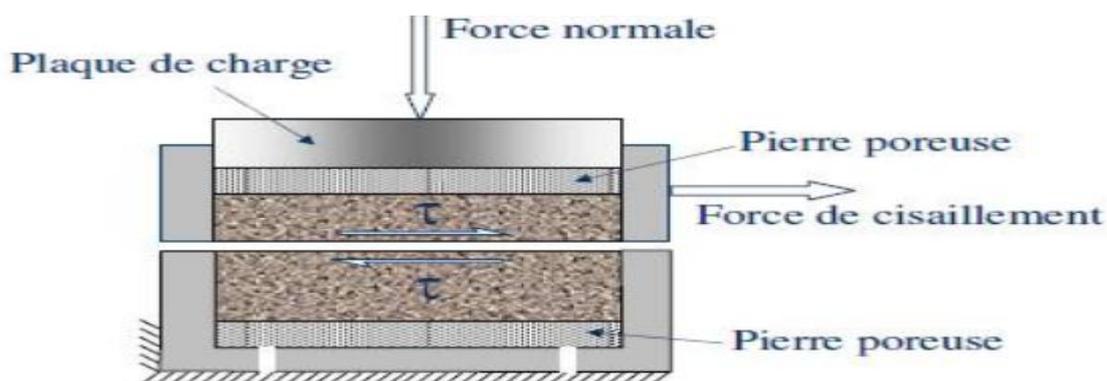


Figure V.4 : Principe de la boîte de cisaillement.

V.5.3. Mode opératoire

1. Densifier l'échantillon dans un anneau où son volume est connu et le mettre dans la boîte de cisaillement ;



Figure V.5 : Mode opératoire du cisaillement.

2. Mettre la plaque rainurée et la plaque poreuse à la base ; fixation des demi – boîtes.
3. Mettre la boîte sur le chariot et positionner les Compérateurs et capteurs pour Prendre des lectures (déplacement horizontal, déplacement vertical et force tangentielle).
4. Mettre tous les comparateurs à zéro ; démarrer la machine et régler la vitesse;
5. Appliquer sur la face supérieure un effort vertical N résultants des poids lacés sous l'appareil et représenté par une contrainte normale $\sigma = 100, 200, 300 \text{ kPa}$;
6. en imposent un déplacement horizontal relatif entre les deux demi – boîtes à vitesse constante (0.5 mm/min) ;
7. Indiquer les lectures des déformations horizontales et verticales indiqué par les trois comparateurs à des intervalles de temps réguliers ; toute les 15 secondes ;

8. La rupture est atteinte lorsqu'un pic ou un palier est obtenu du graphe $\tau = f(\Delta l)$, ce qui permet d'arrêter l'essai après quelques lectures décroissantes ou stabilisées, sinon on ira jusqu'à la fin de la course.



Figure V.6 : Echantillons (schiste + verre) après cisaillement.

V.5.4. Influence de la phase aqueuse

Les caractéristiques de cisaillement c et ϕ varient en fonction

- Du type de sol ;
- De sa compacité et de sa plasticité ;
- De la teneur en eau ;
- Du degré de saturation ;
- De la vitesse de mise en charge ;
- Des conditions de drainage.

V.5.5. Vitesse de mise en charge

La vitesse de cisaillement dépend du type d'essai à réaliser (drainé ou non drainé), pour un essai drainé, choisir la vitesse la plus lente possible (LCPC. 1987).

Par contre, dans le cas d'un essai non drainé, la vitesse de cisaillement est plus rapide, elle peut dépasser 1.5 mm/min, en fonction de la nature du sol.

V.5.6. Influence de la nature du sol sur la résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement d'un sol (matériau) est principalement assurée, soit par le frottement et l'enchevêtrement des grains, soit par la cohésion qui lie les grains. La manifestation de l'un de ces paramètres est fonction de la nature du sol.

a) Sols pulvérulents

Les sols pulvérulents regroupent le gravier, le sable et le silt. Ils sont constitués de particules volumineuses, leur résistance au cisaillement est assurée par le frottement et l'enchevêtrement des grains.

Le frottement résulte de la rugosité superficielle des grains qui entrent en contact les uns avec les autres. Quant à l'enchevêtrement, il est surtout causé par les arrêtes plus ou moins angulaires de certains grains, qui en s'emboîtant dans les interstices entre les autres grains, créent une résistance au mouvement. Lorsque la contrainte normale (σ) est nulle, la résistance au cisaillement des sols pulvérulents est presque nulle et les grains n'offrent pratiquement, aucune résistance au déplacement, (Robitaille et Tremblay, 1997).

L'angle de frottement interne dépend donc principalement de la compacité du sol, de la forme et de l'état de surface des grains solides. Dans le cas des sols pulvérulents, la droite de Coulomb passe par l'origine, c'est-à-dire que le terme (C) est nul. L'équation de Coulomb devient alors : $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$

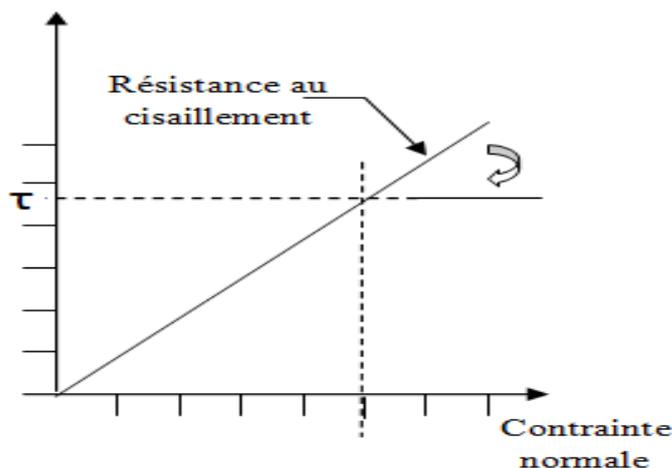


Figure V.7 : Droite intrinsèque dans le cas d'un sol pulvérulent.

b) Sols purement cohérents

Les sols cohérents sont constitués de particules d'argile en forme de feuillets, leur résistance au cisaillement provient peu du frottement et de l'enchevêtrement des particules, mais principalement de la cohésion entre les particules. Cette cohésion désigne l'ensemble des forces d'attraction qui unissent les particules d'argiles, leur conférant ainsi une résistance au cisaillement le long d'un plan de rupture même quand aucune contrainte normale n'est appliquée. Cette cohésion est liée à la présence de charges électriques à la surface des

particules d'argile, qui engendrent des forces d'attraction entre les particules par l'intermédiaire des impuretés contenues dans l'eau qui sature souvent les sols cohérents. Dans le cas des sols cohérents, la droite de Coulomb ne passe pas par l'origine, elle est généralement parallèle à l'axe des abscisses, c'est-à-dire que le terme ϕ est nul (Robitaille et Tremblay, 1997).

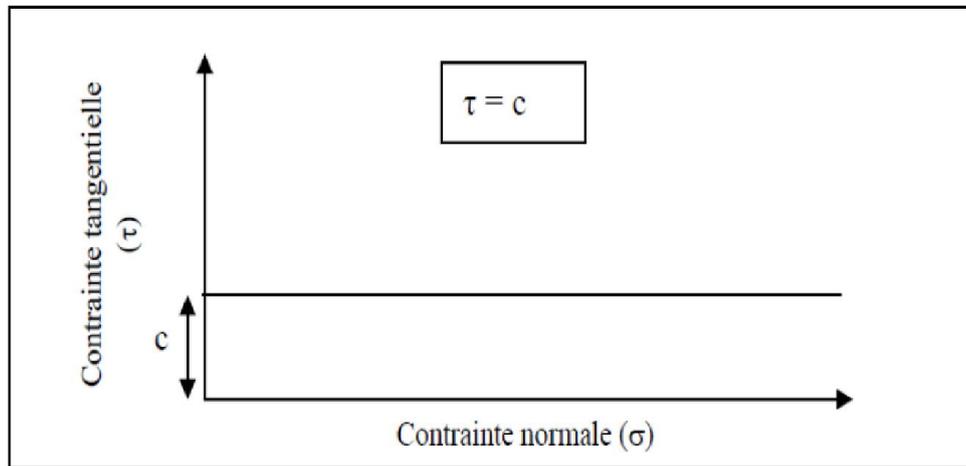


Fig V.4 : Droite intrinsèque dans le cas d'un sol purement cohérents.

c) Cas des sols cohérents et frottant

Dans ce cas la résistance au cisaillement du matériau est assurée à la fois par le frottement et la cohésion développés par les grains. La droite intrinsèque n'est pas parallèle à l'horizontale et ne passe pas par l'origine. Elle est par contre inclinée d'un angle ϕ (angle de frottement interne) par rapport à l'horizontale et coupe l'axe des ordonnées au point c (valeur de la cohésion).

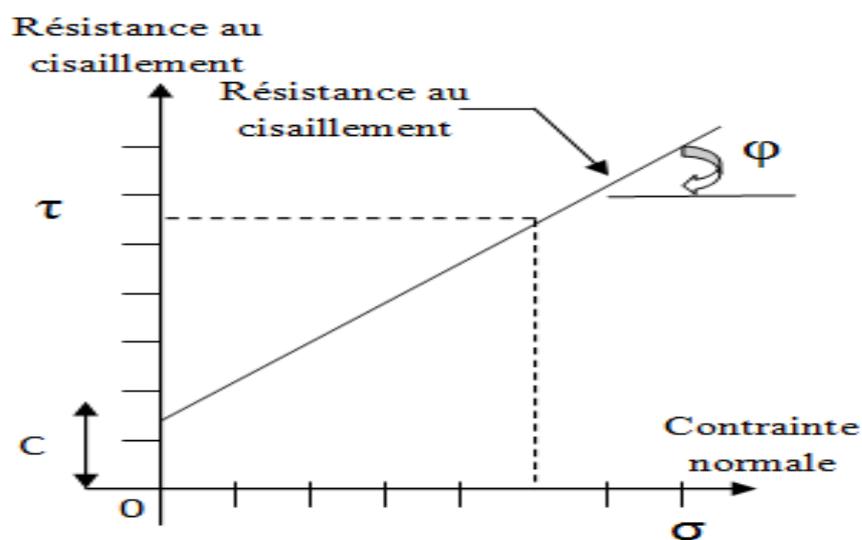


Figure V.8 : Droite intrinsèque dans le cas d'un sol cohérent et frottant.

V.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA BOITE DE CISAILLEMENT

1. Avantages

- La manipulation est facile (Simple);
- La durée d'exécution courte (Rapide);
- Le coût n'est pas cher (Économique).

2. 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.

V.7. EXPRESSION DES RESULTATS

Pour exprimer les résultats préciser pour chaque échantillon :

- La contrainte normale $\sigma = N/A = 100, 200, 300$ kPa.
- La contrainte tangentielle $\tau = T/ Sc$ en KPa où T est la force de cisaillement en (daN).

$$T = L_a \times K_{\text{anneau}}$$

T : force horizontale.

K_{anneau} : constante de l'anneau $k = 0.194$.

L_a : lecteur anneau

- la section corrigée $Sc = L (L - \Delta L)$ en mm^2 ;

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

ΔL : déplacement horizontale (mm).

- La variation de volume en pourcentage (%), $\epsilon_v = (\Delta V/V)$;

Avec ΔV : variation volumique en mm^3 .

V.8. PRESENTATION DES RESULTATS

Les résultats des essais de cisaillement direct à la boite sont représentés sous forme de courbes :

- Courbe contrainte déformation $\tau = f(\epsilon_h)$, $\epsilon_h = \Delta L/L$ étant la déformation horizontale ;
- Courbe de variation de volume $\epsilon_v = f(\epsilon_h)$, Droite intrinsèque $\tau = f(\sigma)$, σ étant la contrainte normale appliquée.
- Droites intrinsèques.

1. Schiste + 0% verre

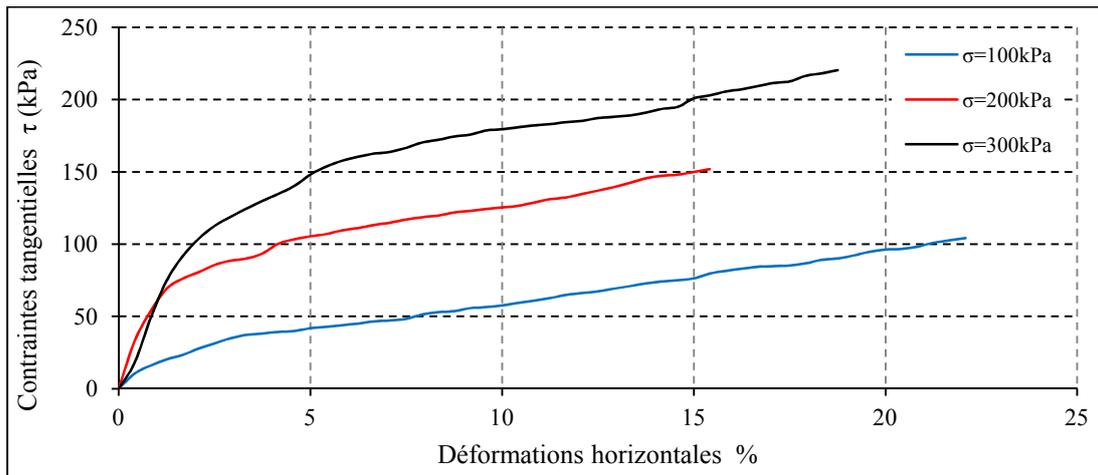


Figure V.9 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 0% de verre).

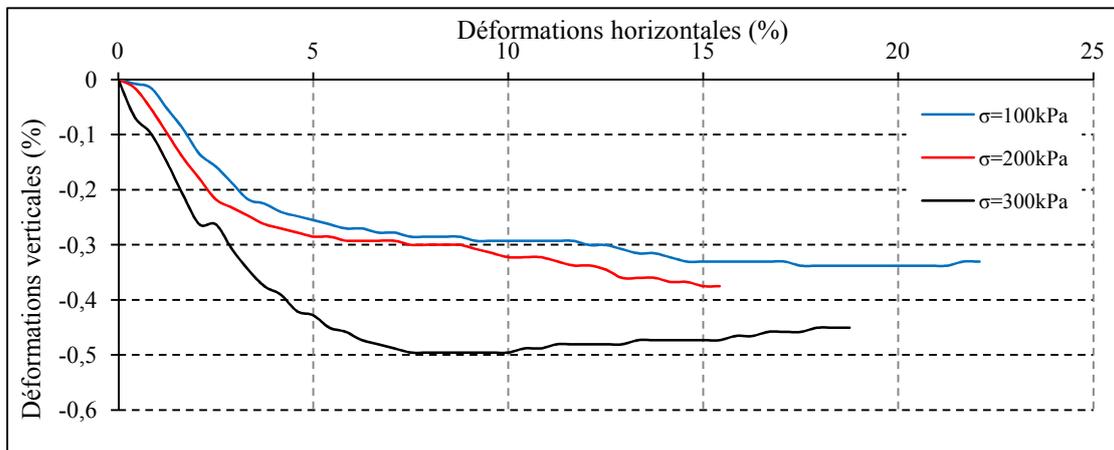


Figure V.10 : Courbes de variations de volume (schiste + 0% de verre).

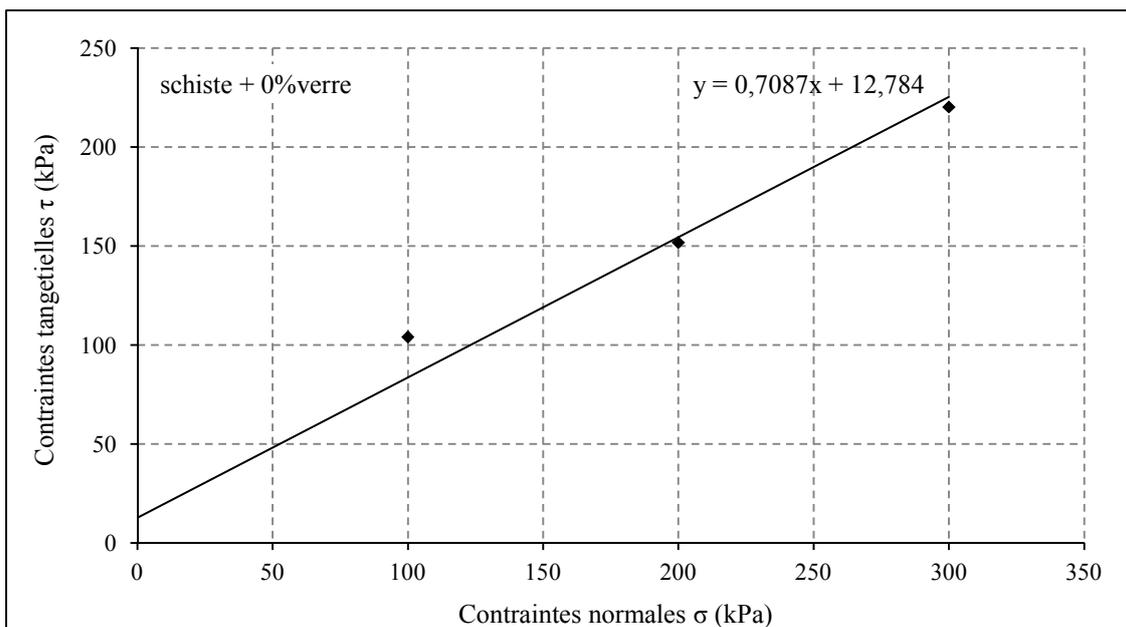


Figure V.11 : Droite intrinsèque (schiste + 0% de verre).

2. Schiste + 10% verre

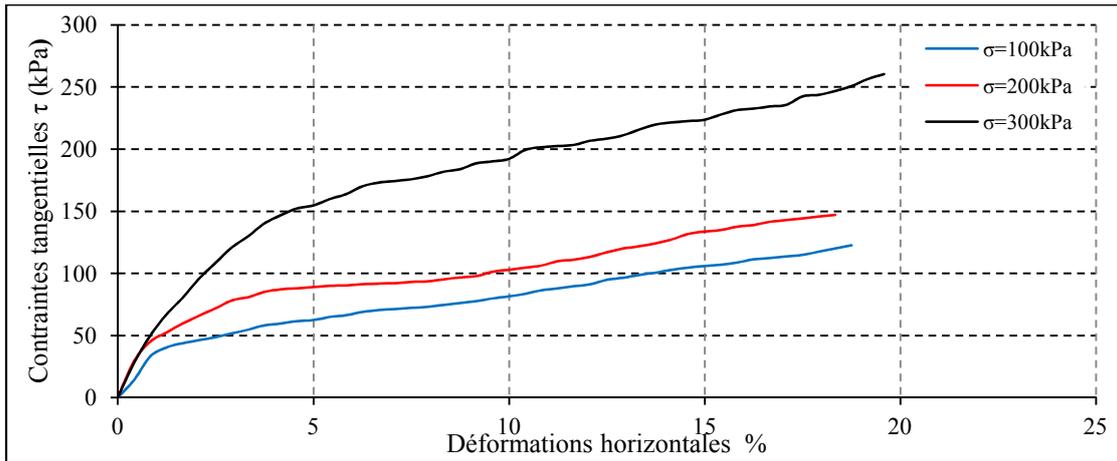


Figure V.12. : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 10% de verre).

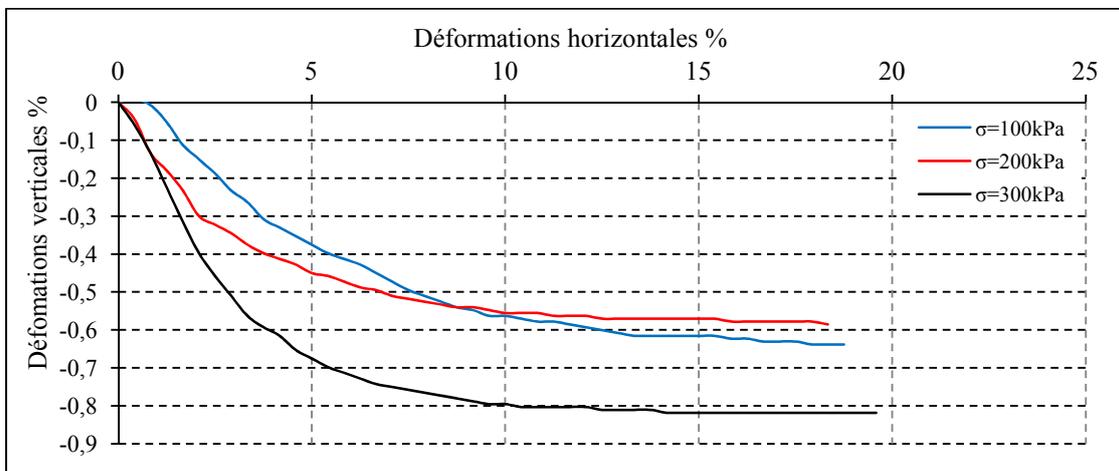


Figure V.13 : Courbes de variations de volume (schiste + 10% de verre)

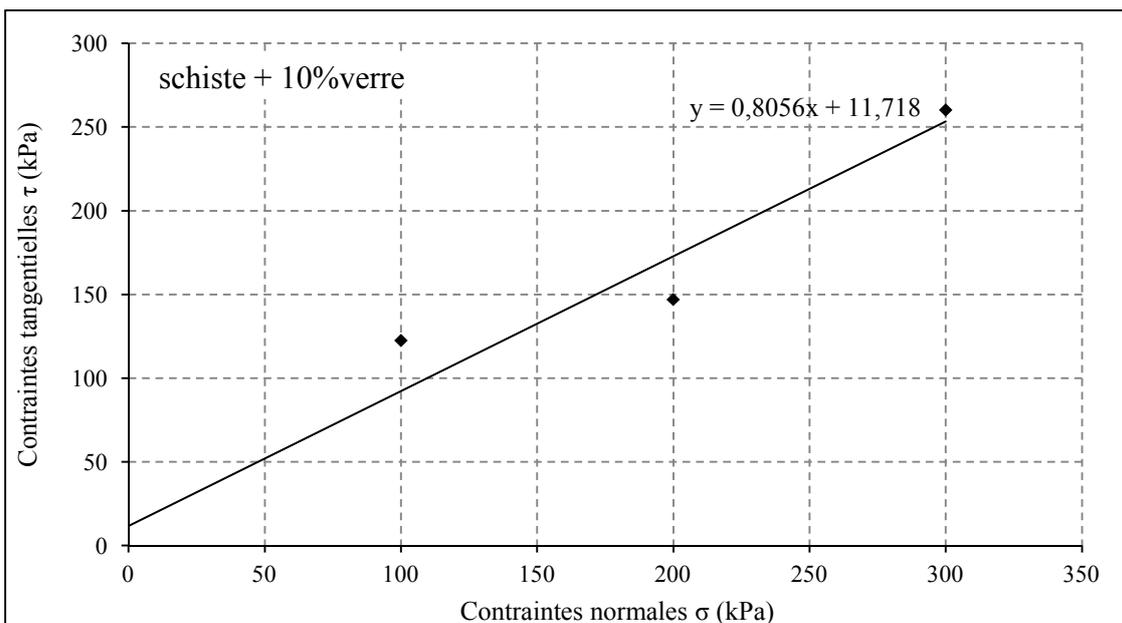


Figure V.14 : Droite intrinsèque (schiste + 10% de verre).

3. Schiste + 20% verre

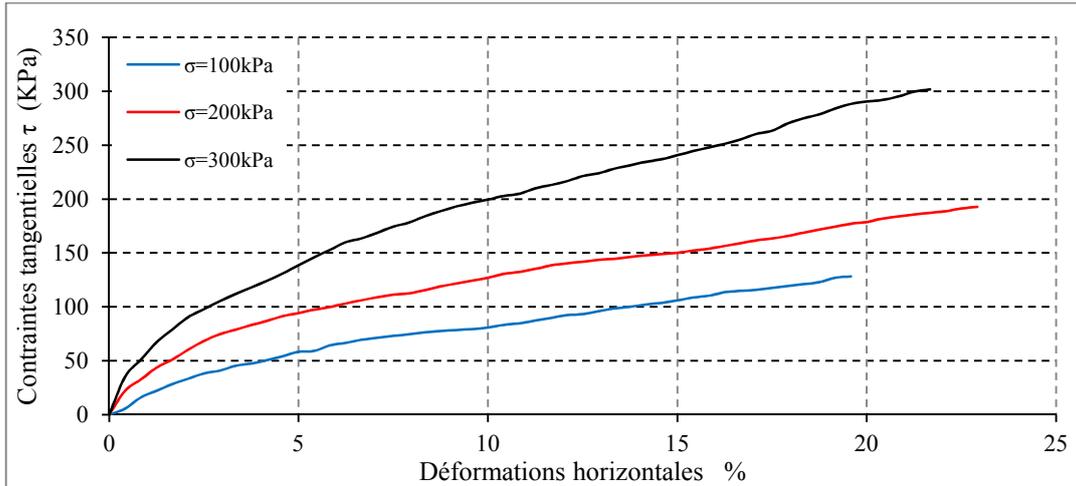


Figure V.15 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 20% de verre).

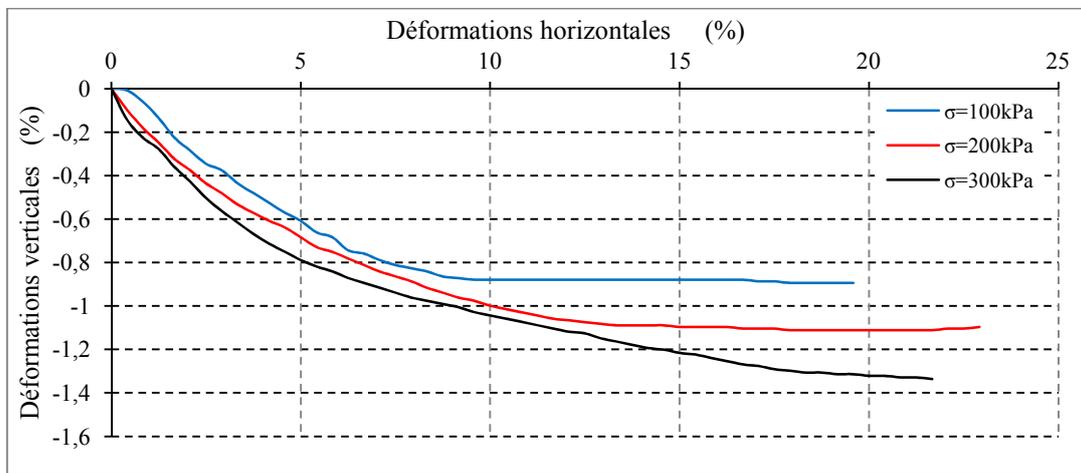


Figure V.16 : Courbes de variations de volume (schiste + 20% de verre).

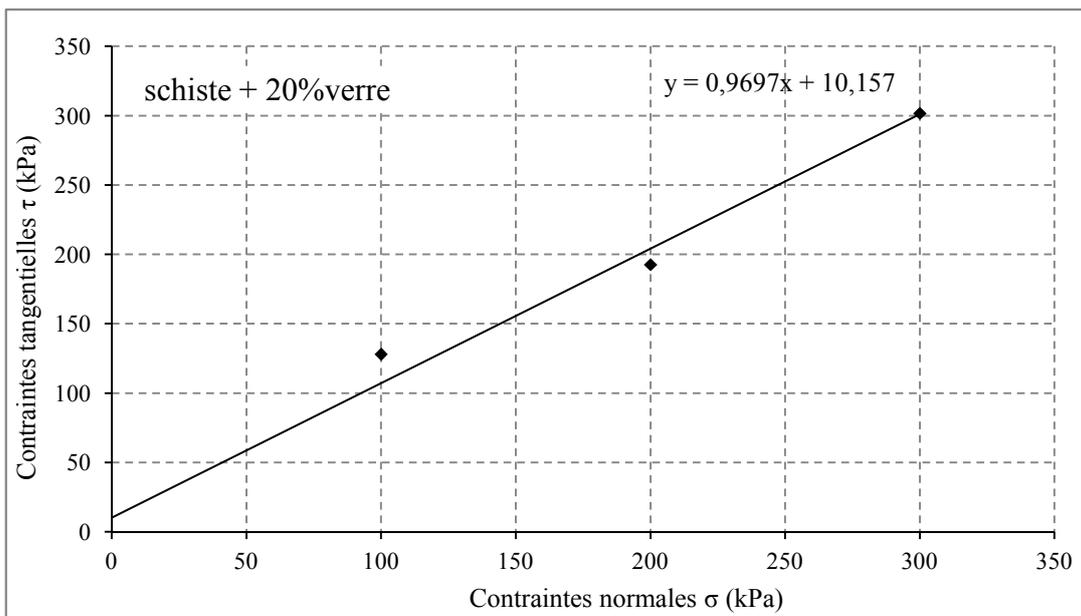


Figure V.17 : Droite intrinsèque (schiste + 20% de verre).

4. Schiste + 30% verre

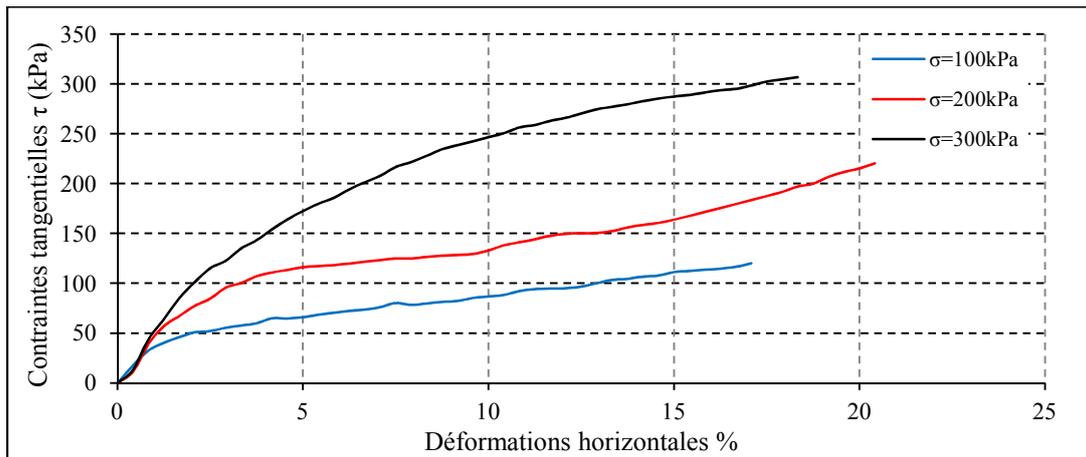


Figure V.18 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 30% de verre).

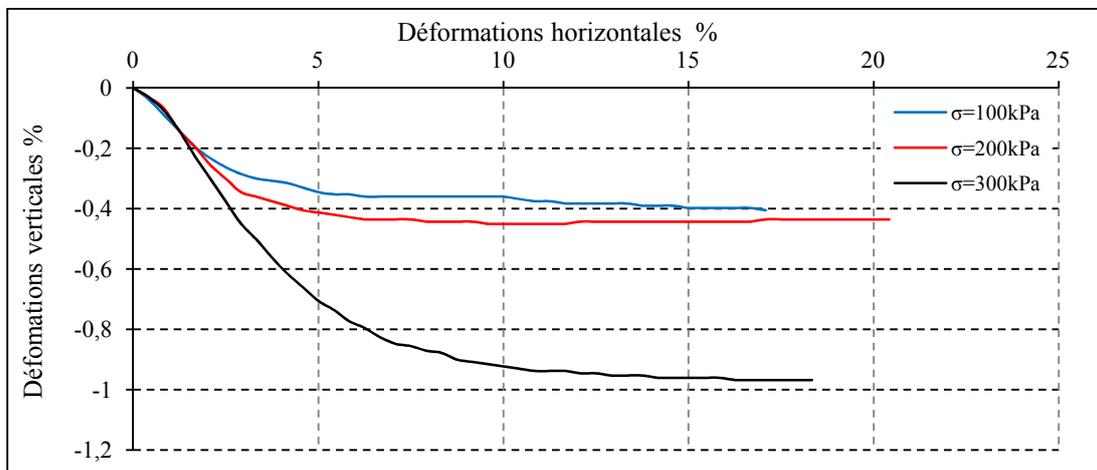


Figure V.19 : Courbes de variations de volume (schiste + 30% de verre).

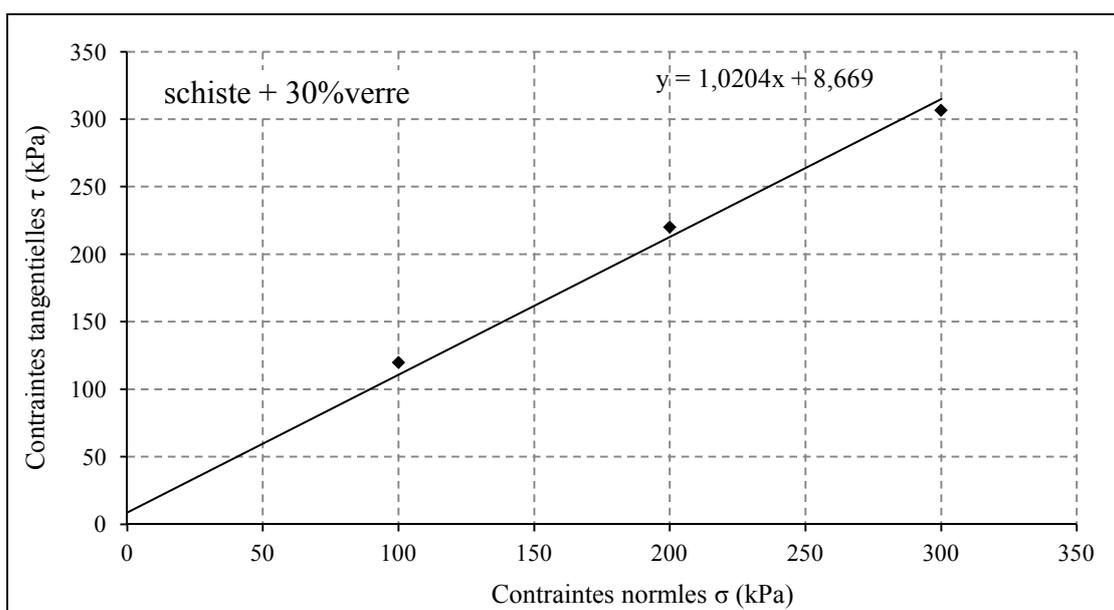


Figure V.20 : Droite intrinsèque (schiste + 30% de verre).

5. Schiste + 50% verre

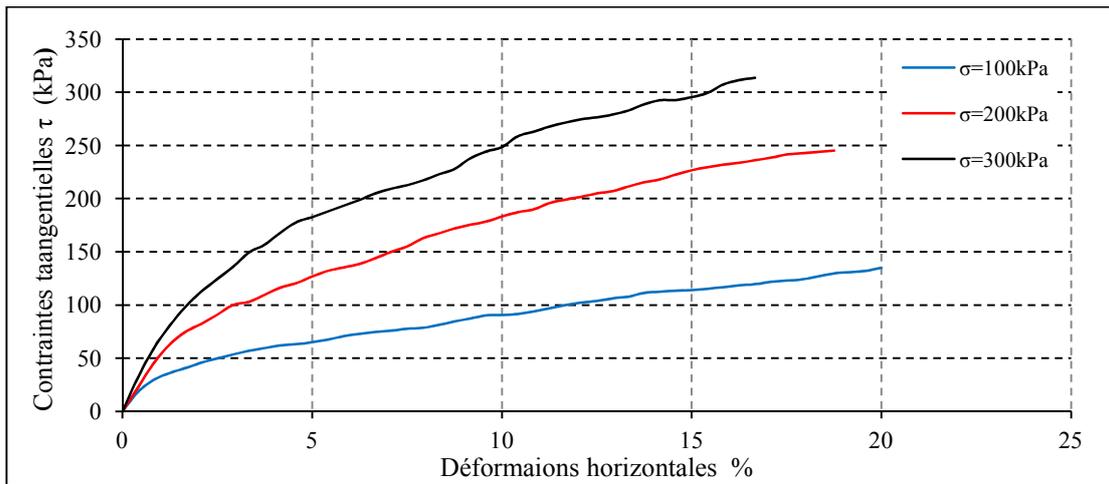


Figure V.21 : Courbes de contraintes-déformations (schiste + 50% de verre).

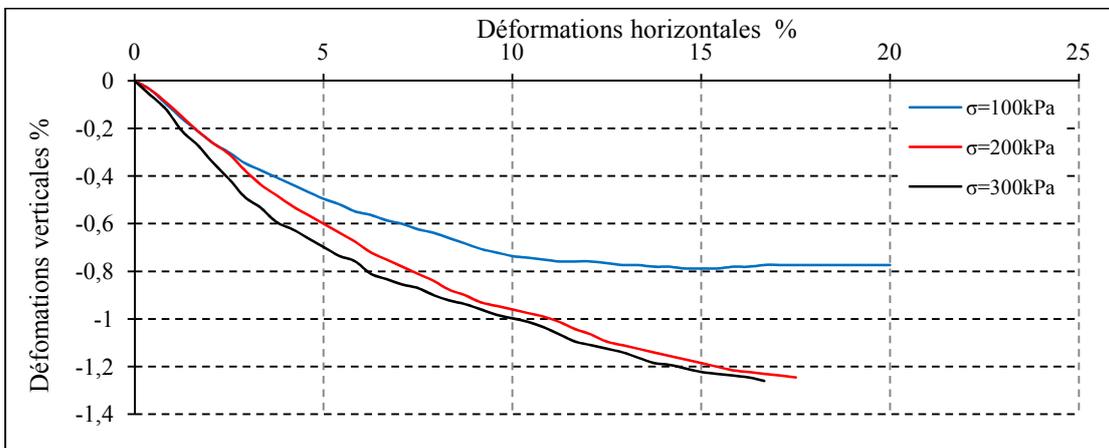


Figure V.22 : Courbes de variations de volume (schiste + 50% de verre).

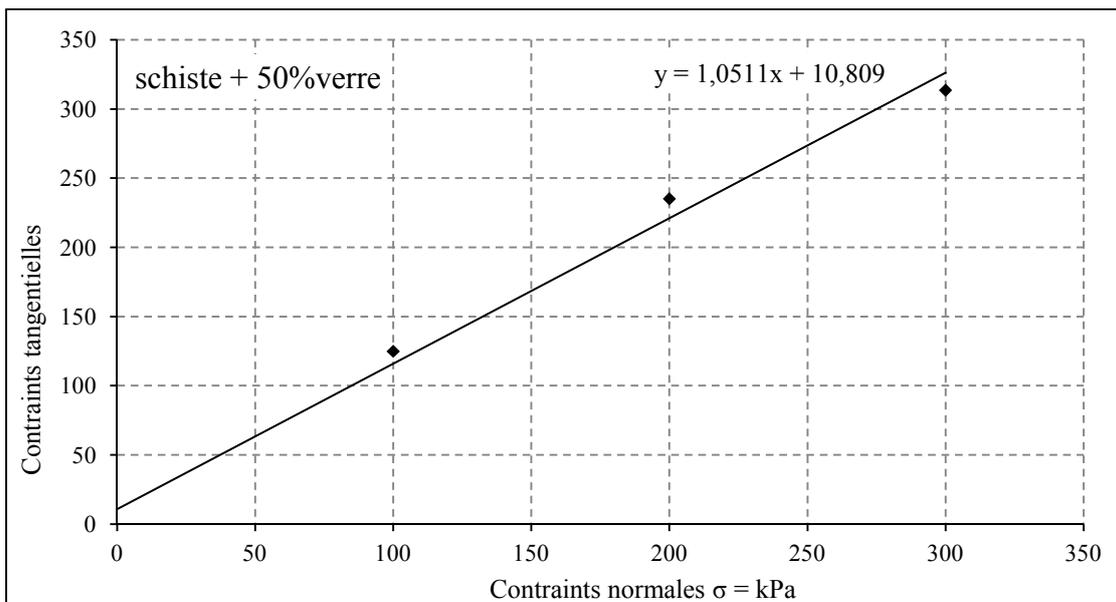
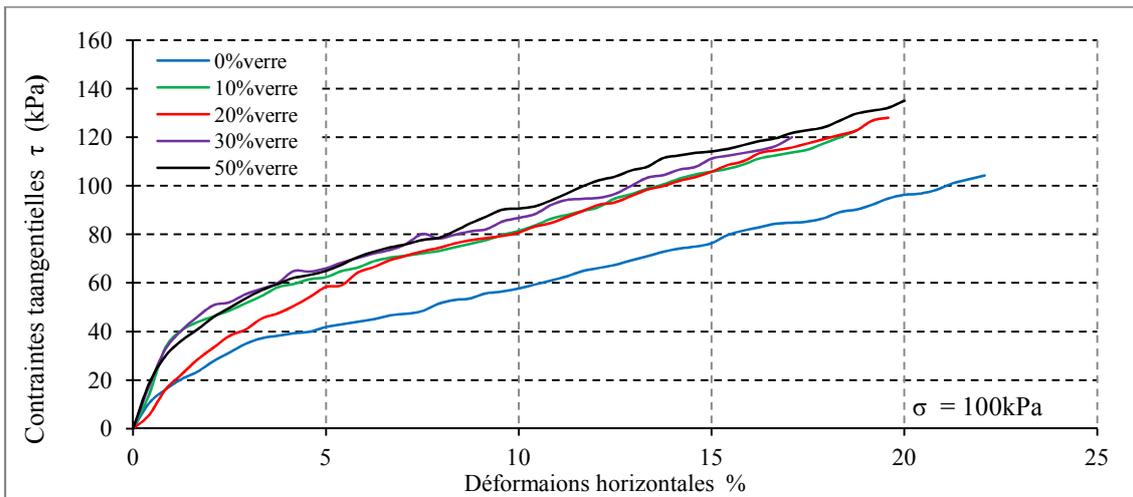
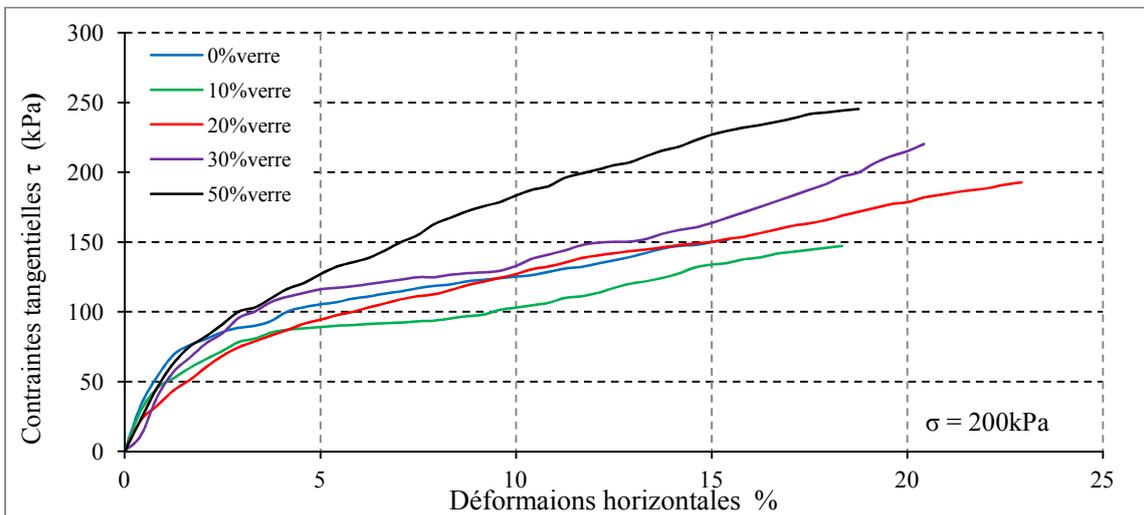
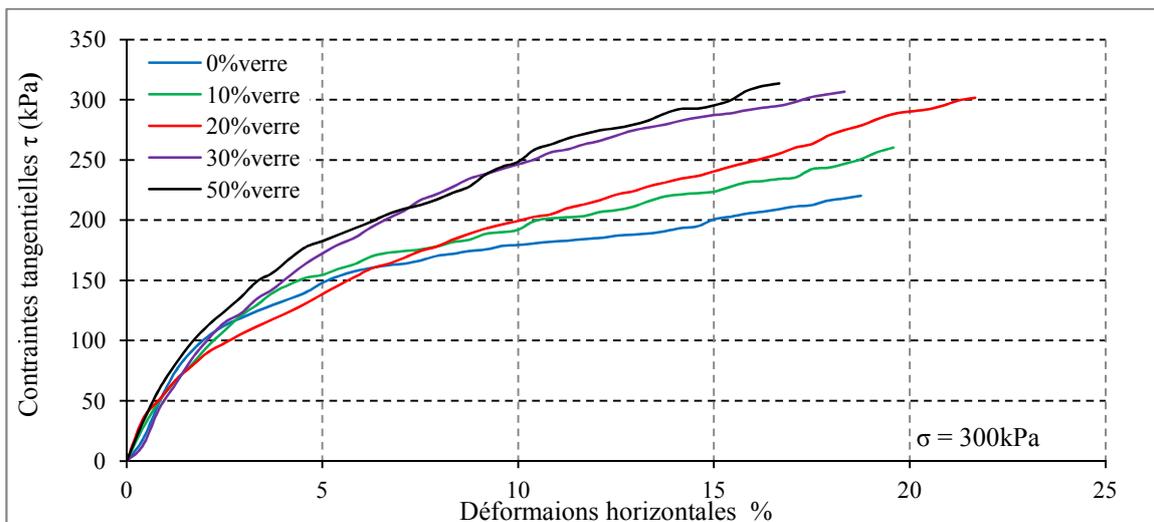
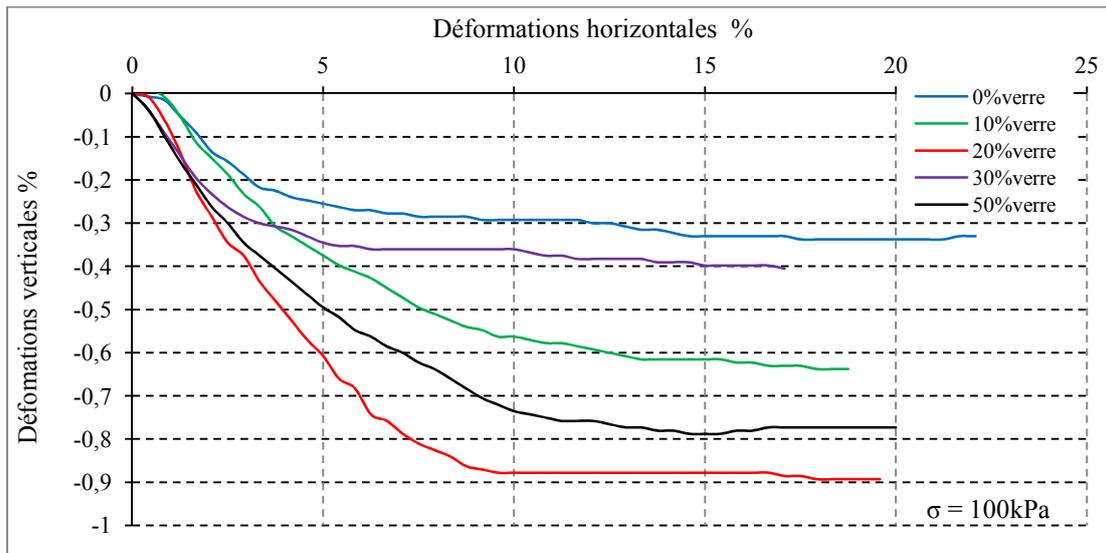
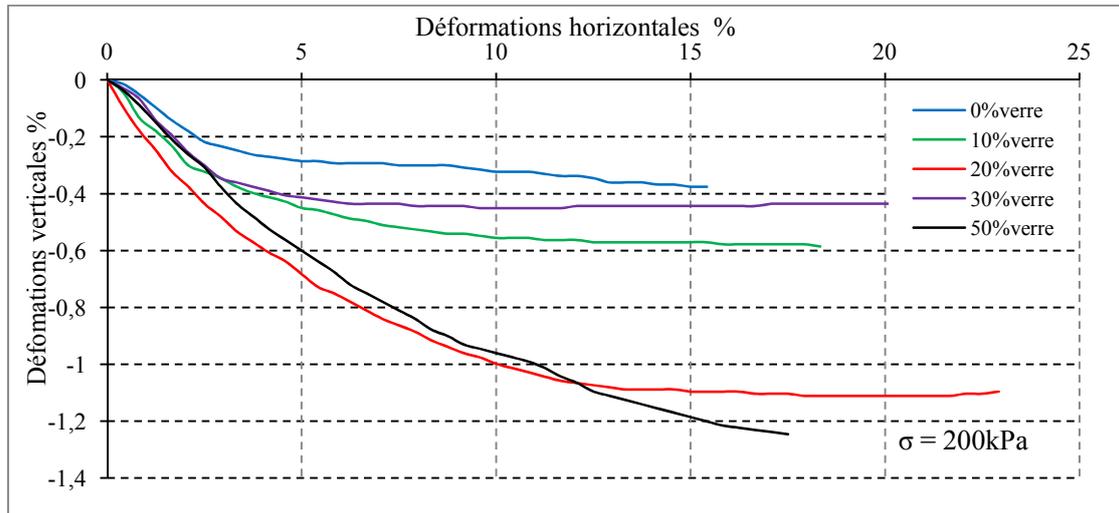
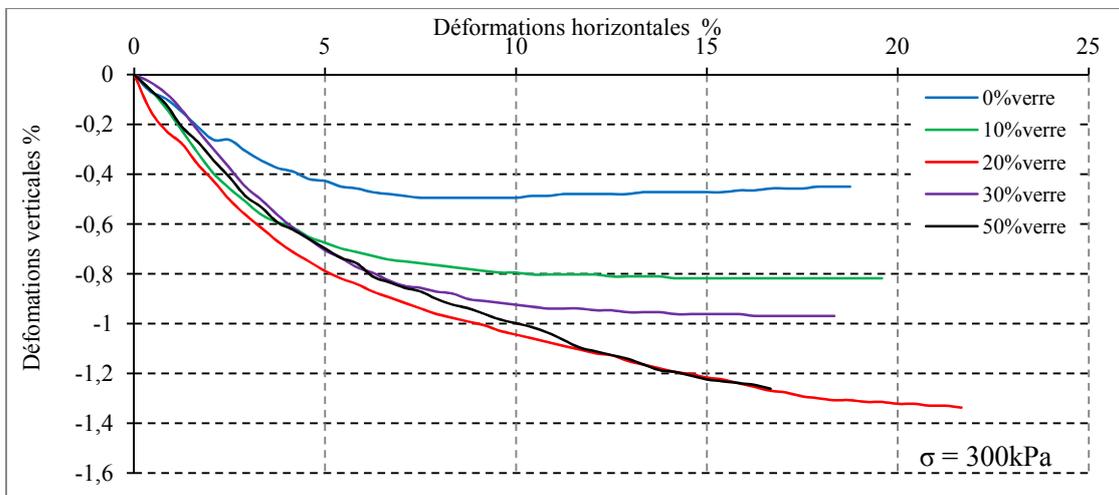


Figure V.23 : Droite intrinsèque (schiste + 50% de verre).

6. Courbes de contraintes-déformations en fonction de la teneur en verre.

Figure V.24 : Courbes de contraintes-déformations pour $\sigma = 100\text{kPa}$.Figure V.25 : Courbes de contraintes-déformations pour $\sigma = 200\text{kPa}$.Figure V.26 : Courbes de contraintes-déformations pour $\sigma = 300\text{kPa}$.

7. Courbes de variations de volume en fonction de la teneur en verre.

Figure V.27 : Courbes variations de volume pour $\sigma = 100\text{kPa}$.Figure V.28 : Courbes variations de volume pour $\sigma = 200\text{kPa}$.Figure V.29 : Courbes variations de volume pour $\sigma = 300\text{kPa}$.

8. Variation des angles de frottement φ et cohésions en fonction du pourcentage du verre

Tableau V.1 : Evaluation des angles de frottement et des cohésions en fonction du pourcentage du verre.

Echantillons	φ	c (kPa)
Schiste + 0%verre	35,30	12,78
Schiste + 10%verre	38,66	11,72
Schiste + 20%verre	43,83	10,15
Schiste + 30%verre	45,57	8,67
Schiste + 50%verre	46,40	10,81

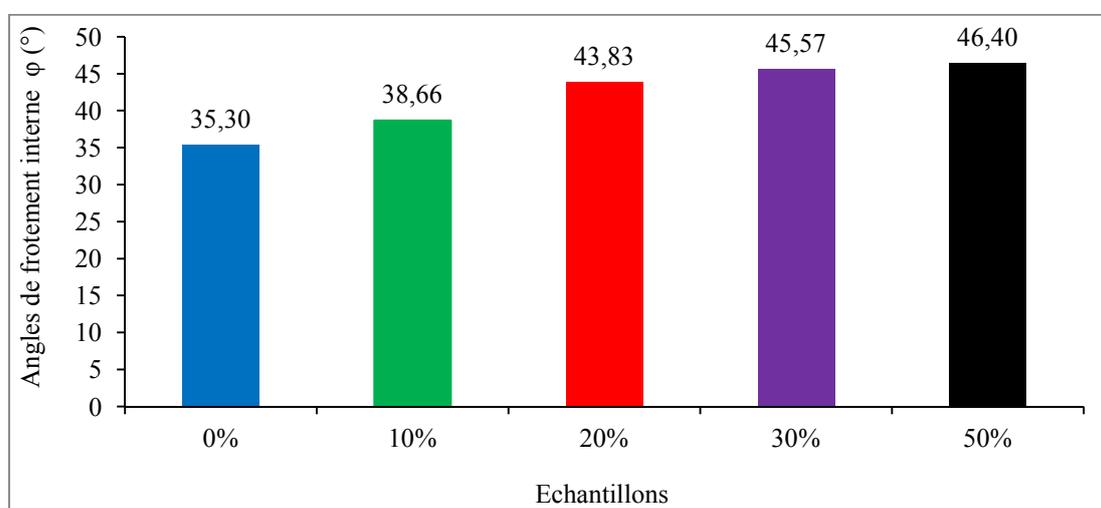


Figure V.30 : Evolution des angles de frottement interne en fonction du pourcentage du verre.

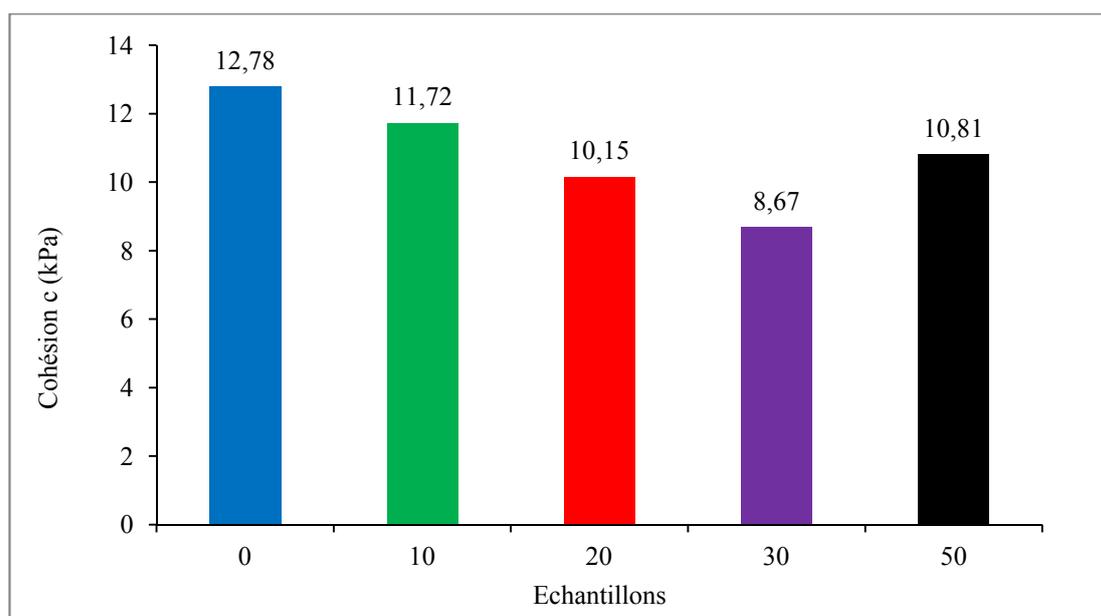


Figure V.31 : Evolution des cohésions en fonction du pourcentage du verre.

V.9. 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. 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.

En outre, la résistance au cisaillement est liée également à la teneur en verre dans le mélange. En effet, sous les différentes contraintes normales, les résultats obtenus montrent une amélioration continue de la résistance au cisaillement des mélanges en fonction de leur teneur en verre. Cette résistance est donc liée directement au frottement interne qui se manifeste entre les grains au cours du cisaillement.

En termes de variation de volume, les résultats obtenus sont légèrement dispersés et ne présentent pas une évolution complètement régulière en fonction de la proportion de verre contenu dans le mélange. Cependant, nous avons constaté que les différents mélanges présentent généralement un comportement contractant. Ce comportement peut être lié à l'état initial de densification de l'échantillon mis dans la boîte de cisaillement. Il traduit un comportement d'un matériau initialement lâche.

Les caractéristiques mécaniques de cisaillement obtenues (figures V.30 et V.31), montrent que l'angle de frottement interne s'améliore progressivement avec l'ajout de verre et se stabilisent pratiquement au-delà de 30% de verre. En effet, les débris de verre présentent des formes très anguleuses au cours de leur écrasement. Ceci peut générer des frottements très importants contribuant à développer une meilleure résistance au cisaillement des mélanges.

Par contre, les cohésions des mélanges sont faibles (la cohésion la plus importante est de 11.72 obtenues pour 10% du verre). La présence de ces cohésions bien qu'elles sont faibles, peuvent être liées aux particules fines humides produites au cours du frottement des débris de verre tranchants et de schiste plus tendres. L'augmentation et la diminution de cette cohésion est donc liée directement à la nature des schistes constituant le mélange du fait que les particules fines de verre restent toujours rugueuses quelque soient leurs tailles.

V.10. CONCLUSION

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement au cisaillement des mélanges (schiste + verre), à savoir leurs résistances au cisaillement, leurs variations de volume et la variation de leurs caractéristiques mécaniques.

L'ajout du verre présente des résultats très intéressants en cisaillement direct à la boîte. Le comportement des différents mélanges est sensiblement amélioré comparativement au schiste seul, bien que les résultats soient parfois dispersés en termes de variation de volume.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le manque en granulats dont souffrent plusieurs régions et l'amenuisement des sources naturelles habituelles de matériaux, notamment les gisements alluvionnaires surexploités par l'extraction abusive et anarchique surgissent sensiblement ces dernières années et se posent comme problèmes réels menaçant la continuité des projets de génie civil et des travaux publics en particulier.

L'exploitation de nouvelles sources de granulats et la recherche de nouveaux matériaux naturels qu'ils soient ou recyclés, devient indispensable et paraît comme une solution d'avenir assurant le développement durable des pays.

Cette étude expérimentale s'inscrit dans ce même contexte, elle a pour objectifs, l'exploitation et la valorisation de nouveau matériaux locaux, naturels (schiste) et recyclés (verre ménager) dans le but de leur utilisation, dans le domaine des travaux publics, particulièrement, dans les corps de chaussées (couches de fondations et couches de base).

Les matériaux sélectionnés (le schiste et les débris de verre) présentent plusieurs avantages tant sur le plan économique et environnemental, à savoir :

- Disponibilité ;
- Facilité d'extraction ou de collecte dans le cas du verre ;
- Facilité de préparation ;
- Economie de transport et de temps (matériaux locaux).

Le principe consiste, à préparer des mélanges à base de schiste et différentes proportions de débris de verre, les soumettre ensuite à des essais mécaniques au laboratoire (Proctor, CBR, micro deval, Los Angeles et cisaillement direct à la boîte de Casagrande) pour étudier leur réponse sous différents types de sollicitations en fonction de leur teneur en schiste et en verre.

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

- Bien que les mélanges développent des densités sèches réduites comparativement à celles développées par le schiste seul, néanmoins, elles restent assez importantes (supérieures à 2)

des mélanges qui restent satisfaisantes pour un matériau routier et vérifie les plages de densités exigées par les normes en vigueur.

- L'ajout du verre améliore sensiblement la portance des mélanges même en présence d'eau. Les mélanges présentent des indices CBR avant et après immersion variant entre 14.7 et 73.6. Ces résultats sont très intéressants et dépassent les comportements espérés pour ce type de matériaux. En outre, les matériaux étudiés présentent des gonflements pratiquement nuls en présence d'eau.

- Les mélanges présentent des résistances très intéressantes au cisaillement direct à la boîte, traduite particulièrement par des angles de frottement interne très importants.

- En ce qui concerne la résistance aux chocs et à l'usure, les résultats obtenus concernent le schiste seul. Il présente des résistances faibles à moyennes, comparativement aux matériaux modèles de référence.

Les mélanges étudiés (schiste + débris de verre) présentent ainsi des comportements et des propriétés mécaniques très intéressantes, notamment pour des teneurs en verre entre 30 et 50%. En outre, ils sont généralement assez perméables. Par conséquent, peu capillaires et donc peu susceptibles au gel (deux propriétés recherchées dans le cas d'un matériau de chaussées).

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

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 contribuer au développement de la filière de recyclage des matériaux qui est un domaine ouvert à l'innovation, en associant les universitaires et les entreprises pour élargir de plus en plus l'emploi de nouveaux matériaux dans d'autres domaines de génie civil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Alkama F, (2003). Etude du comportement mécanique du matériau Schiste en Géotechnique routière, Mémoire de magister en génie civil. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Bouddal O, (2007). Etude du comportement des matériaux recyclés au compactage, mémoire de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Bouddal O, (2013). Etude expérimentale du comportement mécanique des fines dans la stabilité des talus et des fondations, Thèse de Doctorat de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Berga A, (2003 / 2004) ; Eléments de Mécanique des Sols.

Brunel H, (2008) ; COURS DE ROUTE ; Université D'ORLEANS I.U.T. DE BOURGES.

Belkidar K, Construction à la notion d'adhérence sur les chaussées du réseau Algérien. Mémoire de Magister ; Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

Chbrek D, (2012). Etude du Phénomène de l'orniérage des chaussées bitumineuses (Cas d'une Route Nationale dans La Wilaya de Tizi-Ouzou), Mémoire de Magister ; Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

Carl M, Pascale P, et al, (2013). Détermination de la performance en laboratoire de matériaux recyclés utilisés en fondation routière ; Projet R672.1.

Callaoud M, (2004). Cours de mécanique des sols (propriétés des sols), Tome I.

Cordary D, (1995). Mécanique des sols.

Claude L, (2006), Projet pilote de valorisation du verre récupéré (non conforme pour le conditionnement) dans la construction de chaussées, Université de Sherbrooke.

Chikhi K, (2011); Etude expérimentale des matériaux non saturés au cisaillement et à l'odomètre ; Mémoire de magister ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

CEBTP, (1984) ; Centre expérimentale de recherches et études du bâtiment et des travaux publics. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. France.

Djemaci B, Recyclage des déchets à travers un système de consigne : Cas des bouteilles en plastique en Algérie, Université de Rouen, Centre d'analyse et de recherche en économie (CARE), France.

Dahoumane K, (2012). Détermination du taux d'écrasement des grains à partir des caractéristiques granulométriques. Mémoire de magister ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

David R, et al. (2006). Le recyclage des matériaux de Construction à Genève. Synthèse des travaux réalisés par le service cantonal de gestion des déchets.

François S,(1988).Eléments de Mécanique des sols. L'école nationale des ponts et chaussées.

Gunther Gidel M, (2001). Comportement et valorisation des graves non traitées calcaires utilisées pour les assises de chaussées souples, thèse doctorat, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur.

Jacques Méhu, Recyclage des matériaux et évaluation environnementale.

Jean Pierre Houdaer, Le recyclage du verre.

Khengaoui S, (2013). Valorisation du sable de dunes en couche de roulement Sable – bitume. Mémoire de Magister Université Kasdi Merbah d'Ouargla.

LCPC, (1987). Essai de cisaillement a la boite, Laboratoire centrale des ponts et chaussées.

Meftah K, (2008). Cours et exercices de mécanique des sols, Première version.

Michel D, (1997). Mécanique des sols, 3^{ème} édition.

Norme AFNOR analyse granulométrique par la sédimentométrie (NF P - 057).

Norme AFNOR C.B.R (NF P 94 – 078).

Norme AFNOR compactage de sol (NF P 94 - 093).

Norme AFNOR densité volumique des grains solides (NF P 94 - 054).

Norme AFNOR densité volumique humide (NF P 94 - 053).

Norme AFNOR densité volumique sèche (NF P 94 - 064).

Norme AFNOR la teneur en eau (NF P 94 – 050).

Norme AFNOR le cisaillement (NF P 94-71 - 1).

Norme AFNOR limite d'Atterberg (NF P 94-051).

Norme AFNOR teneur en carbonate (NF P 94 - 048).

Norme AFNOR teneur en sulfate NF EN 1744 - 1 (P 18 - 660 - 1) et (NF P 18 - 011).

Norme AFNOR essai los Angeles (NF P 18-573).

Norme AFNOR essai Micro-Deval (NFP 18-572).

Robitaille V, Tremblay D, (1997) ; Mécanique des sols (Théorie et pratique).Edition modulo.

Ykhlef B, (2012), Identification et analyse des caractéristiques Mécaniques des matériaux utilisés pour la Réalisation de l'autoroute est/ouest Tronçon Constantine-Annaba.

Zeroub H, (2012) ; Valorisation du verre dans l'élaboration de béton durable (Approche expérimentale), Mémoire de Magister ; Université M'hamed Bougra Bouerdas.