



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERRI DE TIZI-OUZOU (UMMTO)
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA)

MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème

**Étude du comportement d'un mélange de schiste,
des déchets plastiques et des débris de verre pour
une utilisation dans le domaine routier**

Présenté par : **M^{elle} YAHIA Celia**

Devant le jury composé de :

M ^r MELBOUCI B	Professeur à l'UMMTO	Président.
M ^{me} MEZIANI F	Maitre assistante "A" à l'UMMTO	Examinatrice.
M ^r BOUDLAL O	Maitre de conférences "A" à l'UMMTO	Promoteur.

Promotion : 2018/2019

Remerciements

J'exprime mes remerciements à :

Mr BOUDLAL Omar, Maitre de conférences à l'UMMTO pour avoir encadré et dirigé ce travail, pour sa grande disponibilité lors de mes différentes sollicitations et ses précieux conseils.

M^r MELBOUCI B, Professeur à l'UMMTO pour avoir accepté de présider le jury.

M^{me} MEZIANI F, Maitre assistante "A" à l'UMMTO pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Les responsables du laboratoire MDS de l'UMMTO, M^{me} Bouazzouni Fatima et Mr Khelifa Sid Ali, pour leurs soutiens, disponibilité surtout leur confiance.

Je tiens également à remercier ma famille, mes proches, tous mes amis, et toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Remerciements.

LISTE DES FIGURES.

LISTE DES TABLEAUX.

LISTE DES PRINCIPALES NOTIONS ET INDICES.

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1. Introduction	3
I.2. Définition d'une chaussée.....	3
I.3. Différentes couches d'une chaussée.....	3
I.3.1. Plateforme support de chaussée	4
I.3.1.1. Le sol support.....	4
I.3.1.2. La couche de forme	4
I.3.2. La couche d'assise.....	4
I.3.2.1. Couche de fondation	4
I.3.2.2. Couche de base.....	5
I.3.3. Couche de surface.....	5
I.3.3.1. La couche de liaison.....	5
I.3.3.2. La couche de roulement.....	5
I.4. Les différentes structures de chaussées	5
I.4.1. Les chaussées souples.....	5
I.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses.....	6
I.4.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	6
I.4.4. Les chaussées à structure inverse	6
I.4.5. Les chaussées à structure mixte	7
I.4.6. Les chaussées en béton de ciment	7
I.4.6.1. Chaussée à dalle non goujonnées avec fondation.....	7
I.4.6.2. Chaussée à dalles goujonnées avec fondation.....	7
I.4.6.3. Chaussée à dalles sans fondation.....	7
I.4.6.4. Chaussée en béton armé continu.....	8
I.5. Dimensionnement des chaussées	8
I.5.1. Le trafic.....	8
I.5.2. L'environnement.....	8
I.5.3. Le sol support.....	8
I.5.4. Les matériaux.....	8
I.6. Les matériaux routiers.....	9
I.6.1. Classification des matériaux.....	9
I.6.1.1. Les matériaux de carrière.....	9
I.6.1.2. Les matériaux roulés.....	9
I.6.2. Caractéristiques géométriques des granulats routiers.....	9

I.6.2.1. Etat de surface des granulats.....	9
I.6.2.2. Angularité des granulats.....	9
I.6.2.3. La forme des granulats.....	10
I.6.2.4. La granularité des granulats.....	10
I.6.3. Les matériaux utilisés dans les couches d'assise.....	10
I.6.3. 1. Les graves non traité.....	10
I.6.3. 2. Les graves et les sables traités aux liants hydrauliques(ou liants blancs).....	11
I.6.3. 3. Les graves et les sables traités aux liants hydrocarbonés(ou liants noirs).....	11
I.6.3.4. Bétons de ciment.....	12
I.7. Dégradation des chaussées.....	12
I.7.1. Types de dégradations des chaussées.....	12
I.7.1.1. Les déformations.....	12
I.7.1.2. Les fissurations.....	13
I.7.1.3. Les arrachements.....	15
I.7.1.4. Les remontées.....	16
I.7.2. Cause de dégradations des chaussées.....	17
I.7.2.1. Le trafic.....	17
I.7.2.2. Les conditions climatiques.....	17
I.7.2.3. Les malfaçons.....	17
I.7.2.4. les accidents et les incidents.....	17
I.8. Action des véhicules sur la chaussée.....	17
I.8.1. Action verticale	17
I.8.2. Action tangentielle	17
I.8.3. Action dynamique.....	18
I.8.4. Vibration	18
I.9. Conclusion.	18

CHAPITRE II : VALORISATION DES DECHETS

II.1. Introduction	19
II.2. Définition d'un déchet.....	19
II.3. Classification des déchets	19
II.3.1. Déchets ménagers et assimilés.....	19
II.3.2. Les déchets des collectivités locales.....	20
II.3.3. Les déchets industriels	20
II.3.4. Les déchets hospitaliers	20
II.3.5 : Les déchets inertes	20
II.4. Statistiques et composition des déchets de la commune de Tizi Ouzou	20
II.5. Traitement et Valorisation des déchets	21
II.5.1. Définition du traitement des déchets.....	22
II.5.2. Définition de la valorisation.....	22
II.5.3. Différents types de valorisation des déchets.....	22
II.5.3.1. Valorisation énergétique	22
II.5.3.2. Valorisation organique.....	22
II.5.3.3. Valorisation de la matière (Le recyclage).....	23

II.5.3.3.1. Les différentes filières du recyclage.....	23
II.6. Le plastique.....	25
II.6.1. Définition des matières plastiques.....	25
II.6.2. Les différents types de plastiques et leurs appellations.....	26
II.6.3. Valorisation des déchets plastique	26
II.6.3.1.La valorisation des déchets plastique dans le domaine routier et le génie civil ...	26
II.6.4. Propriétés des matières plastiques.....	28
II.7. Le verre	29
II.7.1. Définition du verre.....	29
II.7.2. Les différents types et composition de verre.....	29
II.7.3. La valorisation des déchets de verre dans le domaine routier et le génie civil.....	30
II.7.4. Propriétés physiques des débris de verre en géotechnique.....	32
II.8.Conclusion	34

CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1. Introduction	35
III.2. Matériaux utilisés.....	35
III.3. Les schistes.....	35
III.3.1. Définition des schistes	35
III.3.2. Les schistes de la Grande Kabylie	36
III.3.3. Les différents types de schiste	37
III.3.3.1. Schistes du métamorphisme général très faible	37
III.3.3.2. Schistes du métamorphisme général faible	37
III.3.3.3. Schistes du métamorphisme général plus fort	38
III.3.3.4. Schiste du métamorphisme de contact	38
III.4. Schiste étudié	38
III.4.1.Concassage et tamisage du schiste	39
III.5. Essais d'identification	40
III.5.1. Teneur en eau W (%).....	40
III.5.2. Les masses volumiques	40
III.5.2.1. La masse volumique sèche (ρ_d) par pesée hydrostatique	40
III.5.2.2. La masse volumique humide ρ_h (NF P 94-053).....	41
III.5.2.3. La masse volumique des particules solide ρ_s (pycnomètre)	42
III.5.3. Indice des vides, degré de saturation et porosité	42
III.5.4. Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051).....	44
III.5.4.1. Définition	44
III.5.4.2. But de l'essai.....	45
III.5.4.3. Appareillage d'usage courant	45
III.5.4.4. Détermination de la limite de liquidité WL	46
III.5.4.5. Détermination de la limite de plasticité Wp	46
III.5.4.5.1. Définition	46
III.5.4.5.2.L'indice de plasticité I_p	47
III.6.Analyse minéralogique par diffraction des rayons X.....	47
III.7. Débris de verre	49

III.7.1. Quelque propriété de verre	50
III.8. Déchets plastique	50
III.8.1. Quelque propriété de plastique.....	50
III.9. Préparation des échantillons	51
III.10. Conclusion.....	51

CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES

IV.1. Introduction	52
IV.2. Définition du compactage	52
IV.2.1. Objectif du compactage	52
IV.3. Les facteurs qui influencent le compactage.....	53
IV.3.1. L'influence de l'énergie de compactage	53
IV.3.2. L'influence de la teneur en eau	54
IV.3.3. L'influence de la nature du sol.....	54
IV.4. Les essais de compactages en laboratoire	55
IV.4.1. L'essai Proctor.....	55
IV.4.1.1. Essai Proctor normal	56
IV.4.1.2. Essai Proctor modifié	56
IV.5. L'essai Proctor modifié (PM)	57
IV.5.1. But de l'essai (NF P 94-093).....	57
IV.5.2. Principe de l'essai	57
IV.5.3. Matériel utilisé	57
IV.5.4. Essais réalisés	58
IV.5.5. Expression des résultats	58
IV.6. Essais de portance CBR (California Bearing Ratio) NF P 94-078.....	63
IV.6.1. Définition.....	63
IV.6.2. But de l'essai	64
IV.6.3. Principe de l'essai	64
IV.6.4. Matériel utilisé	65
IV.6.5. Mode opératoire	65
IV.6.5.1. Préparation des échantillons	65
IV.6.5.2. Détermination de l'IPI	66
IV.6.5.3. Détermination de l'indice CBR après immersion	66
IV.6.6. Expression des résultats	66
IV.6.6.1. Interprétation des résultats (CBR).....	67
IV.6.6.2. Interprétation des résultats (CBR _{imm}).....	68
IV.6.6.3. Interprétation des résultats (CBR et CBR _{imm}).....	69
IV.7. Conclusion	70

CHAPITRE V : ESSAIS MICRO DEVAL, LOS ANGELES, DEGRADABILITE ET FRAGMENTABILITE

V.1.Introduction	71
V.2.Essai micro Deval.....	71
V.2.1.Définition et But de l'essai (NF P18-572)	71
V.2.2 principe de l'essai	71
V.2.3 Matériaux utilisées	72
V.2.4 résultats de l'essai	73
V.3 Essai Los Angeles	73
V3.1 Définition et but de l'essai (NF P18 573)	73
V.3.2. Principe de l'essai	74
V.3.3.Matériaux utilisées	75
V.3.4.Résultats des essais	75
V.4.Essai de dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-056)	78
V.4.1 principe de l'essai	78
V.4.2.Exécution de l'essai	78
V.4.3.Matériaux utilisé	79
V.4.4. Résultats obtenus	79
V.5.Essai de fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066)	84
V.5.1.Principe de l'essai	84
V.5.2.Exécution de l'essai	84
V.5.3.Matériaux utilisés	84
V.5.4.Résultats des essais	85
V.6.Conclusion	89

CHAPITRE VI : RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX ETUDIES

VI.1. Introduction	90
VI.2. Notion de résistance au cisaillement	90
VI.3. But de l'essai	91
VI.4. Paramètres c et ϕ pour différents types de sols et différents types d'essais	91
VI.5. Type d'essais peuvent être réalisés à la boîte de cisaillement	93
VI.6. Facteurs influant sur les paramètres de résistance au cisaillement	94
VI.7. Avantages et inconvénients de la boîte de cisaillement	95
VI.8. Principe de l'essai de cisaillement à la boîte	95
VI.9. Mode opératoire	96
VI.10. Expression des résultats	97
VI.11. Essais réalisés	97
VI.12. Présentation des résultats	98
VI.13. Conclusion.....	105
CONCLUSIONS GENERALE.....	106
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	108

LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

w : Teneur en eau naturelle ;
 M_s : Masse des particules solide ;
 M_h : Masse de l'échantillon à l'état humide ;
 γ : Poids volumique total ;
 γ_w : Poids volumique de l'eau ;
 γ_s : Poids volumique des grains solides ;
 γ_h : Poids volumique humide ;
 γ_d : Poids volumique sec ;
 e : Indice des vides ;
 S_r : Degré saturation ;
 n : Porosité ;
 ρ : Masse volumique total ;
 ρ_w : Masse volumique de l'eau ;
 ρ_s : Masse volumique des grains solides ;
 ρ_h : Masse volumique humide ;
 ρ_d : Masse volumique sèche ;
 V_w : Volume de l'eau ;
 V_s : Volume des particules solides ;
 V_a : Volume de l'air ;
 V_v : Volume des vides ;
 V_t : Volume total ;
 w_L : Limite de liquidité ;
 w_p : Limite de plasticité ;
 I_p : Indice de plasticité ;
 w_{opt} : Teneur en eau optimale de l'essai Proctor ;
 $(\gamma_d/\gamma_w)_{opt}$: la densité sèche optimale ;
 CBR_{imd} : L'indice CBR immédiat ;
 CBR_{imm} : L'indice CBR après immersion ;
 G : Gonflement linéaire relatif ;
 MDE : Le coefficient micro Deval ;
 LA : Le coefficient Los Angeles ;
 D_{10} : Diamètre correspondant à 10% des tamis cumulé ;
 DG : Le coefficient de dégradabilité ;
 Fr : Le coefficient de fragmentabilité ;
 A : La section intérieure de la boîte de cisaillement ;
 $\frac{\Delta H}{H}$: Déformation horizontale ;
 σ : Contrainte normale totale ;
 σ' : Contrainte normale effective ;
 C' : Cohésion effective (drainée) ;
 ϕ' : Angle de frottement interne effectif ;

Cu : Cohésion apparente ;
 φ : Angle de frottement apparent ;
L : Longueur de la boîte de cisaillement ;
 ΔL : Déplacement horizontale ;
Sc : La section corrigée ;
 $\frac{\Delta V}{V}$: Variation de volume ;
 τ : Contrainte de cisaillement (tangentielle).

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

- Figure I.1 : Les différentes couches qui constituent une chaussée.
- Figure I.2 : Les couches de chaussées souples
- Figure I.3 : Les couches de bitumineuses épaisses
- Figure I.4 : Les couches de chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques
- Figure I.5. : Les couches de chaussées à structure mixte
- Figure I.6 : Armature filante d'une chaussée en béton armé
- Figure I.7 : Orniérage grand rayon
- Figure I.8 : Affaissement de rive
- Figure I.9 : Flache
- Figure I.10 : Fissures transversales
- Figure I.11 : Fissures longitudinales
- Figure I.12 : Faiénçage
- Figure I.13 : Nid de poule nécessitant un bouchage d'urgence
- Figure I.14 : Pelade sur enrobé de faible épaisseur
- Figure I.15 : Plumage généralisé
- Figure I.16 : Ressuage sur emploi partiels à l'émulsion

CHAPITRE II

- Figure II.1 : Décharges sauvages dans la commune de Tizi-Ouzou
- Figure II.2 : Illustration de la valorisation énergétique
- Figure II.3 : Déchets organiques
- Figure II.4 : Emblème du recyclage
- Figure II.5 : Déchets ménagers
- Figure II.6 : Les différentes filières du recyclage
- Figure II.7 : Matières plastiques
- Figure II.8. : Pavés fabriqués à partir de déchets plastiques

CHAPITRE III

- Figure III.1 : Matériaux utilisés les granulats de schiste, déchets plastique et débris de verre
- Figure III.2 : Coupe géologique du mont Belloua
- Figure III.3 : Schistes du métamorphisme général très faible
- Figure III.4 : Schistes du métamorphisme général faible
- Figure III.5 : Quelques exemples des micaschistes
- Figure III.6 : Schistes tachetés
- Figure III.7 : vue aérienne (Google earth) du site indiqué
- Figure III.8 : Site d'extraction du matériau naturel (schiste)
- Figure III.9 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-285
- Figure III.10 : Granulats de schiste après concassage et tamisage
- Figure III.11 : Mode opératoire

- Figure III.12 : Exécution de l'essai
 Figure III.13 : Les différents états du sol
 Figure III.14 : Différents états de consistances d'un sol
 Figure III.15 : appareillage d'usage courant
 Figure III.16 : Détermination de la limite de liquidité
 Figure III.17 : Etape de la limite de plasticité
 Figure III.18 : La prise de l'échantillon
 Figure III.19 : Un diffractomètre
 Figure III.20 : Diffractogramme du schiste étudié
 Figure III.21 : Débris verre broyé et tamisé
 Figure III.22 : Déchets plastiques broyés

CHAPITRE IV

- Figure IV.1 : Compactage des sols.
 Figure IV.2 : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor
 Figure IV.3 : Influence de la teneur en eau sur le compactage
 Figure IV.4 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor
 Figure IV.5 : Essai de compactage
 Figure IV.6 : Appareillage Proctor.
 Figure IV.7 : Courbe Proctor de schiste seul.
 Figure IV.8 : Courbe Proctor de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre.
 Figure IV.9 : Courbe Proctor de schiste + 10 % de déchet plastique et débris de verre.
 Figure IV.10 : Courbe Proctor de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre.
 Figure IV.11 : Courbe Proctor de schiste + 20 % de déchet plastique et débris de verre.
 Figure IV.12 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons
 Figure IV.13 : Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de déchet plastique et débris de verre
 Figure IV.14 : Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de déchet plastique et débris de verre
 Figure IV.15 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR
 Figure IV.16 : Presse CBR
 Figure IV.17 : Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement
 Figure IV.18 : Courbes enfoncements-forces (cas des CBR_{imd}).
 Figure IV.19 : Evolution des indices CBR immédiat en fonction des pourcentages de déchet plastique et de débris de verre
 Figure IV.20 : Courbes enfoncements-forces (cas des CBR_{imm})
 Figure IV.21 : Evolution des CBR_{imm} en fonction des pourcentages de déchet plastique et débris de verre
 Figure IV.22 : Courbes comparatives des CBR_{imd} et CBR_{imm} des différents mélanges.
 Figure IV.23 : Courbes comparatives des écarts entre CBR_{imd} et CBR_{imm} des différents mélanges.

CHAPITRE V

Figure V.1 : Machine Micro Deval.

Figure V.2 : Mode opératoire d'essai micro Deval.

Figure V.3 : Courbes comparatives des essais micro Deval .

Figure V.4 : Machine d'essai Los Angeles.

Figure V.5 : Mise en place des granulats pour l'essai Los Angeles.

Figure V.6 : Courbes comparatives des essais Los Angeles .

Figure V.7 : Courbes comparatives LA+MDE.

Figure V.8 : Différentes étapes de l'essai de dégradabilité.

Figure V.9 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste seul).

Figure V.10 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.11 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.12 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.13 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.14 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.15 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.16 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.17 : Courbes comparatives coefficient de dégradabilité.

Figure V.18 : Courbes granulométriques avant et après essais (Schiste seul).

Figure V.19 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.20 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.21 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.22 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.23 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.24 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.25 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre).

Figure V.26 : Courbes comparatives coefficient de fragmentabilité.

CHAPITRE VI

Figure VI.1 : Courbe de contraintes-déformations

Figure VI.2 : Droite intrinsèque

Figure VI.3 : Droite intrinsèque pour le cas des sols pulvérulents

Figure VI.4 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent

Figure VI.5 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent et frottant

Figure VI.6 : résistance au pic, résistance résiduelle

Figure VI.7 : Principe de la boîte de cisaillement

Figure VI.8 : Appareillage de l'essai de cisaillement à la boîte

Figure VI.9 : Échantillon après cisaillement

Figure VI.10 : Courbes contraintes-déformations (schiste seul)

Figure VI.11 : Droite intrinsèque (schiste seul)

Figure VI.12 : Courbes de variation du volume (schiste seul)

Figure VI.13 : Courbes contraintes-déformations (schiste + 5 % de déchet plastique et débris de verre)

Figure VI.14 : Droite intrinsèque (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

Figure VI.15 : Courbes de variation du volume (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre)

Figure VI.16 : Courbes contraintes-déformations (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

Figure VI.17 : Droite intrinsèque (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre)...105

Figure VI.18 : Courbes de variation du volume (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre)

Figure VI.19 : Courbes contraintes-déformations (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre)

Figure VI.20 : Droite intrinsèque (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre)

Figure VI.21 : Courbes de variation du volume (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre)

Figure VI.22 : La cohésion des différents mélanges.

Figure VI.23 : Angle de frottement des différents mélanges.

Figure VI.24 : Courbes comparatives à $\sigma = (100 \text{ KPa})$.

Figure VI.25 : Courbes comparatives à $\sigma = (200 \text{ kPa})$.

Figure VI.26 : Courbes comparatives à $\sigma = (300 \text{ kPa})$.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II

- Tableau II.1 : Constitution des déchets de la commune de Tizi Ouzou.
- Tableau II.2 : Quantité des déchets collectés par la commune de Tizi-Ouzou.
- Tableau II.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères.
- Tableau II.4. Composition chimique des débris de verre utilisés dans le ciment Portland
- Tableau II.5 : Résultats des tests physiques effectués sur les débris de verre

CHAPITRE III

- Tableau III.1 : Détermination de la teneur en eau
- Tableau III.2 : Résultats de la détermination de la masse volumique sèche
- Tableau III.3 : Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche
- Tableau III.4 : Résultats de la masse volumique des particules solides
- Tableau III.5 : Détermination du degré de saturation.
- Tableau III.6 : Résumés des résultats précédents
- Tableau III.7 : Détermination de la limite de liquidité
- Tableau III.8 : Classification selon l'indice de plasticité
- Tableau III.9 : Résultats des limites d'Atterberg
- Tableau III.10 : Résultat du diffractogramme pour le schiste
- Tableau III.11 : Récapitulatif de la composition et utilisation des différents types de plastiques
- Tableau III.12 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères.

CHAPITRE IV

- Tableau IV. 1 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié
- Tableau IV.2 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste seul
- Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre.
- Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 10 % de déchet plastique et débris de verre.
- Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 15 % de déchet plastique et débris de verre.
- Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 20 % de déchet plastique et débris de verre.
- Tableau IV.7 : Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales
- Tableau IV.8 : Résultats des essais CBR immédiat.
- Tableau IV.9 : Résultats des essais CBR après immersion.
- Tableau IV.10 : Résumé des résultats d'essai CBR (CBR_{imd} et CBR_{imm}).
- Tableau IV.11 : Classes de portance des sols par ordre croissant de S4 à S0.

CHAPITRE V

Tableau V.1 : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.

Tableau V.2 : Résultats des essais Micro Deval.

Tableau V.3 : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.

Tableau V.4 : Résultats des essais Los Angeles.

Tableau V.5 : Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

Tableau V.6 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure.

Tableau V.7 : Classification des matériaux rocheux.

Tableau V.8 : Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR.

CHAPITRE VI

Tableau VI.1 : Récapitulatif des résultats des essais de cisaillement.

INTRODUCTION GENERALE

La construction des remblais et des couches de forme du domaine routier requiert des volumes importants pour réaliser un ouvrage d'une certaine ampleur (en moyenne 100000 m³/km dans le cas des autoroutes).

Le marché des matériaux en Algérie vit une attention assez aiguë soit par rapport à la limitation ou l'épuisement des ressources naturelles.

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour ouvrir de nouvelles carrières imposent de chercher de nouvelles sources d'approvisionnement et d'autre part des millions de tonnes de déchets de différentes natures et sources sont produits suite aux différentes activités de l'homme notamment dans les pays en voie de développement tel que l'Algérie.

Pour un futur plus sain et rassurant, les contraintes d'ordre économique et écologique de ces dernières années ont rendu nécessaires de trouver d'autres alternatives. Le recyclage et la valorisation de ces déchets sont aujourd'hui considérées comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

Le travail proposé rentre dans cette perspective ; il consiste à étudier le comportement mécanique d'un mélange de granulats de schiste, de déchets plastiques et de débris de verre pour une éventuelle utilisation dans la construction routière. Il peut constituer une contribution précieuse (solution durable) présentant une alternative propre.

Après avoir identifié les matériaux sélectionnés, les mélanges (schiste +déchets plastique et débris de 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, les différents essais routiers (Los Angeles, Micro Deval, fragmentabilité et dégradabilité) et les essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les résultats obtenus sur les différents échantillons, sont comparés ensuite aux exigences des normes en vigueur.

Pour présenter le travail réalisé, nous avons opté de scinder ce manuscrit en six chapitres :

Le chapitre I est consacré aux généralités sur les chaussées et les matériaux routiers. Il traite principalement, les définitions des différentes couches constituant une chaussée, les différents types de chaussées, leur dimensionnement, la définition des granulats et les types employés en constructions routières...

Le chapitre II cerne la valorisation des déchets à savoir, la classification et l'inventaire des déchets de la commune de Tizi Ouzou, Il s'intéresse principalement à la valorisation des déchets plastiques et débris de verre dans le domaine du génie civil.

Le chapitre III introduit la partie expérimentale de cette étude, il est consacré à la préparation des différents échantillons à étudier et à leurs identifications en laboratoire.

Dans le chapitre IV est présentée la première série d'essais mécaniques réalisés au laboratoire. Le comportement des échantillons au compactage sera étudié en l'occurrence à l'essai de compactage Proctor et la portance des mélanges sous les plus mauvaises conditions hygrométrique à l'essai de portance CBR. Sont présentés ainsi, les différents modes opératoires, les résultats d'essais et les différentes comparaisons effectuées sous forme de tableaux et de courbes avec les interprétations correspondantes.

Le chapitre V porte sur d'autres essais routiers, à savoir l'essai Los Angeles, l'essai Micro-Deval, l'essai de dégradabilité et de fragmentabilité. Il présente ainsi les différents résultats obtenus comparés aux références des normes en vigueur.

Le chapitre VI 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 en cisaillement, à savoir l'angle de frottement interne et la cohésion. Sont ainsi présentés, le but et le principe de l'essai, l'appareillage, le mode opératoire, et enfin, les principaux résultats obtenus et les interprétations correspondantes.

Enfin, le présent travail sera terminé par des conclusions synthétisant les principaux résultats obtenus et quelques diagnostics et perspectives pour de futures recherches.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1. Introduction

La chaussée est la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules. Au Moyen Âge, les routes importantes étaient recouvertes de cailloux et pierre liés à la chaux, terme qui a donné le mot chaussée.

Elle assure les déplacements des usagers et le transport des marchandises, quelles que soient les conditions météorologiques, dans des conditions de sécurité et de confort adapté au type d'itinéraire. D'un point de vue mécanique, son rôle est de répartir les charges mécaniques sur le sol support, quelles que soient les conditions environnantes.

L'histoire de la chaussée couvre une période qui commence avec la sédentarisation de l'homme, il y a 10 000 ans, jusqu'à l'Époque contemporaine.

Avec le développement des engins lourds au début du XX^{ème} siècle, les premiers problèmes ont surgi :

- Apparition de nids de poule,
- Poinçonnement du hérisson et effondrement de la chaussée aux premières pluies.

La structure de la chaussée était donc mal adaptée. Une mutation s'imposait pour aboutir à une route moderne. Elle a été initiée par l'emploi des matériaux à granulométrie continue et de calibre déterminé et puis avec l'émergence des matériaux traités au ciment.

Au niveau de ce chapitre, nous parlerons des généralités sur les chaussées modernes, des différentes couches constitutives, des principaux types de chaussées, des paramètres pris en compte pour leur dimensionnement ainsi que des déformations des chaussées souples.

I.2. Définition d'une chaussée

Une chaussée est une structure qui est constituée de plusieurs couches de matériaux mises en œuvre sur un sol terrassé appelé sol support. [17].

La chaussée moderne a été définie également comme étant « un espace correctement aménagé, pour recevoir un ou plusieurs courants de circulation construite dans le respect des règles de l'art. Son rôle est de supporter les sollicitations du trafic (les actions mécaniques des véhicules) et à les reporter sur le terrain de fondations sous-jacent, sans que se produisent des déformations permanentes, ni dans ce terrain, ni dans la chaussée elle-même. [5].

I.3. Différentes couches d'une chaussée

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini comme le montre la figure.1 [17]. Tout d'abord le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d'une couche de forme. L'ensemble sol couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise. Enfin, la couche de surface se

compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise.

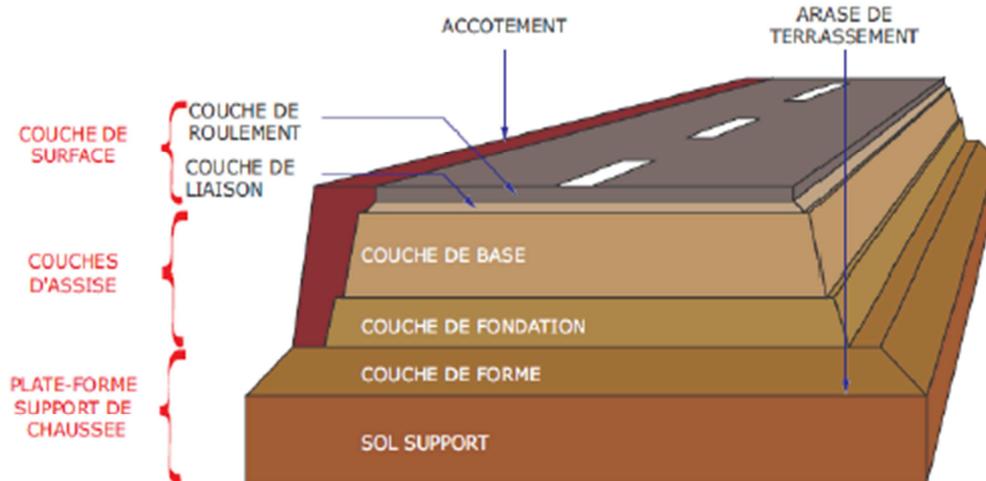


Figure I.1 : Les différentes couches qui constituent une chaussée [17].

I.3.1. Plateforme support de chaussée

C'est un ensemble constitué du sol support et d'une couche de forme.

I.3.1.1. Le sol support

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

I.3.1.2. La couche de forme

Cette couche, qui ne fait pas partie intégrante de la chaussée, a plusieurs fonctions. Pendant les travaux, elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier d'une part, et d'autre part, elle permet de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol terrassé et de protéger ce dernier du gel.

I.3.2. La couche d'assise

L'assise de chaussée son but est d'augmenter la stabilité et la rigidité de la fondation. Elle est généralement constituée de deux couches ; Une couche de fondation, surmontée d'une couche de base :

I.3.2.1 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.

I.3.2.2. 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 transmise à la couche de fondation.

I.3.3. Couche de surface

Cette couche est constituée à son tour de deux sous-couches appelées, couches de liaison et couche de roulement.

I.3.3.1. La couche de liaison

Elle permet la transition entre la couche de base ou les fondations et la couche de roulement, elle doit fournir un support rigide et uniforme à la couche de roulement et aider la chaussée à bien se comporter, le mélange doit contenir de 50 à 70 % de pierres concassées et de 3 à 8 % de vides. Elle contribue à l'amélioration de l'uni de la chaussée et renforce la protection mécanique, thermique et hydraulique de l'assise par imperméabilisation. Elle supporte principalement les efforts tangentiels et assure un rôle primordial contre la formation d'ornières.

I.3.3.2. La couche de liaison

C'est la couche supérieure de la chaussée sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées du trafic et du climat, elle doit offrir à l'utilisateur le confort, donc une surface sans rugosité, et la sécurité, donc une surface antidérapante, cette couche doit être imperméable et posséder une grande résistance à la fissuration, elle mesure de 3,75 à 6,25 cm d'épaisseur. Son mélange contient de 30 à 50% de pierres concassées d'une grosseur maximale de 1,25 cm, il est conseillé d'avoir un pourcentage de vides inférieur à 5 % pour éviter une infiltration d'eau, et supérieur à 2 % pour éviter la désagrégation du mélange.

I.4. Les différentes structures de chaussées

I.4.1. Les chaussées souples

Pour les trafics faibles à moyens, ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15 cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

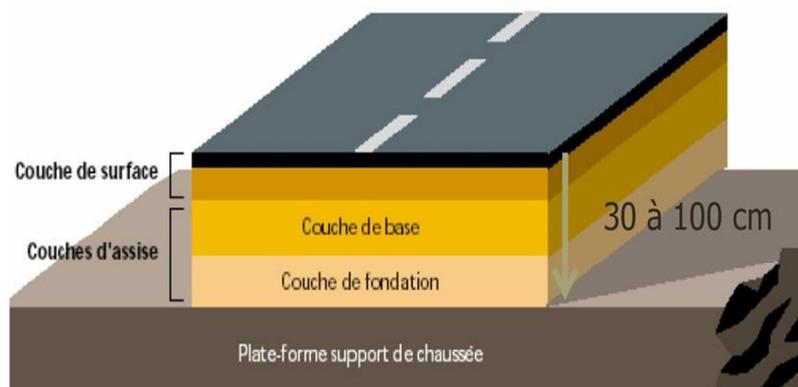


Figure I.2 : Les couches de chaussées souples [45].

I.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

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

Les sollicitations répétées de flexion alternés dans la couverture bitumineuse entraînent une détérioration par fatigue, sous forme de fissures d'abord isolées, puis évoluant peu à peu à vers le faïençage.

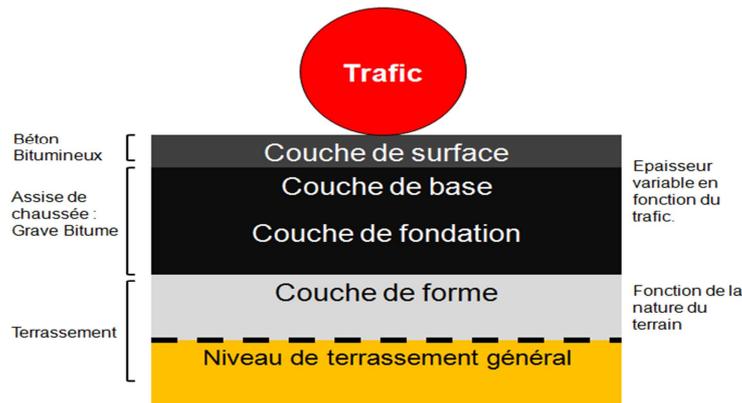


Figure I.3 : Les couches de bitumineuses épaisses [51].

I.4.3. Les chaussées à assise traitée 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, disposés en une ou deux couches. L'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm

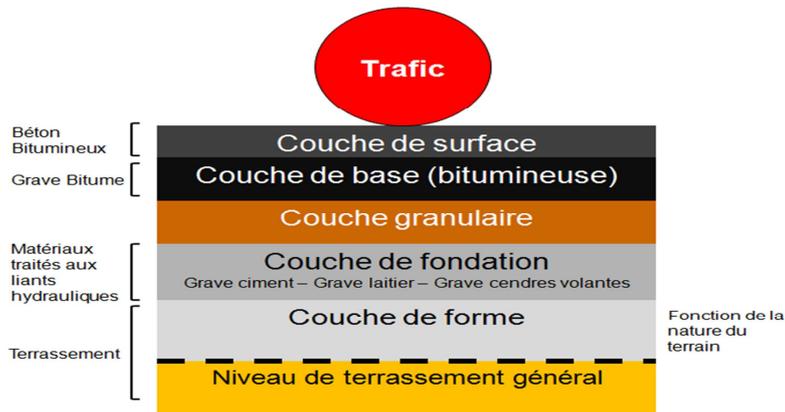


Figure I.4 : Les couches de chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques [51].

I.4.4. Les chaussées à structure inverse

Par rapport aux structures mixtes, ces structures comportent entre la couche de fondation traitée aux liants hydrauliques et les couches supérieures bitumineuses, une couche supplémentaire de matériaux granulaires ayant pour fonction d'éviter la remontée des fissures de la couche de fondation.

I.4.5. Les chaussées à structure mixte

Elles comportent une couche de surface et une couche de base (10 à 20 cm) en matériaux bitumineux (en général du grave bitume), sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm).

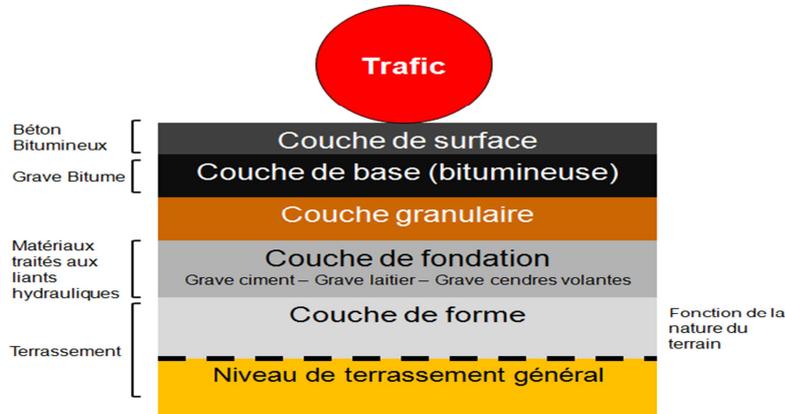


Figure I.5. : Les couches de chaussées à structure mixte [51].

I.4.6. Les chaussées en béton de ciment

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

La couche de béton peut surmonter :

- une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment.
- une couche drainante en matériaux non traités
- une couche bitumineuse qui repose sur une 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 joint.

I.4.6.1 Chaussée à dalle non goujonnées avec fondation

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 20 à 28 cm sans armature, reposant sur une fondation en béton maigre (12 à 18 cm), ou en matériaux traités au liant hydraulique (15 à 20 cm).

I.4.6.2. Chaussée à dalles goujonnées avec fondation

Elles sont constituées de dalles béton de ciment de 17 à 23 cm (avec armatures de liaison entre les dalles), reposant sur une fondation en béton maigre (14 à 22 cm).

I.4.6.3. Chaussée à dalles sans fondation

Elles sont constituées de dalles de béton de ciment de 28 à 39 cm qui reposent sur une couche drainante en matériaux granulaires ou sur un géotextile.

I.4.6.4. Chaussée en béton armé continu

Type A : Dalle de béton de ciment (16 à 24 cm), reposant sur une fondation en béton maigre de 12 à 14 cm.

Type B : Dalle de béton de ciment (18 à 24 cm) reposant sur une assise en matériaux bitumineux de 5cm et une fondation en sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm).

Le comportement : Ces structures rigides absorbent les efforts et en transmettent peu au sol. Le principal inconvénient est "l'effet de poutre" du béton, dont la partie basse soumise à des efforts de traction peut être fragilisée, sauf si ces efforts sont compensés par des armatures métalliques. La dilatation du béton peut également provoquer des fissures, si le phénomène n'est pas maîtrisé par la mise en place de joints de dilatation ou de pré fissuration.



Figure I.6 : Armature filante d'une chaussée en béton armé.

I.5. Dimensionnement des chaussées

I.5.1. Le trafic

C'est le premier paramètre qui entre en jeu pour le dimensionnement d'une chaussée, car le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux est directement lié au poids auxquels sera confrontée la chaussée.

I.5.2. L'environnement

Le comportement des structures est influencé directement ou indirectement par les conditions climatiques. La température affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux (module élastique et tenue en fatigue). Elle génère aussi des cycles d'ouverture/fermeture des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques.

I.5.3. Le sol support

Les structures des chaussées reposant sur un ensemble "plate-forme support de chaussée" constitué du sol naturel terrassé, éventuellement traité, surmonté en cas de besoin d'une couche de forme.

I.5.3. Les matériaux

Il est nécessaire que les matériaux utilisés résistent aux sollicitations répétées dues au passage continu des véhicules lourds.

I.6. Les matériaux routiers

I.6.1. Classification des matériaux

Il est possible de classer les matériaux suivant la granulométrie, la masse volumique, l'origine et le mode de préparation du matériau, ... selon l'origine, nous pouvons avoir deux groupes.

I.6.1.1. Les matériaux de carrière

Ce sont des matériaux issus de l'exploitation des carrières. On en distinguera

- les matériaux tout-venant de concassage.
- Les matériaux concassés à granulométrie continue

I.6.1.2. Les matériaux de roulés

Ce sont des mélanges de sables et de graviers provenant de lits de rivières, de terrasse alluviales et en règle générale de dépôt après érosion et transport naturel.

I.6.2. Caractéristiques géométriques des granulats routiers

Les matériaux constituant les différentes couches d'une chaussée peuvent être des matériaux concassés ou roulés. Cependant, afin de disposer d'un angle de frottement le plus fort possible, il est nécessaire d'exiger un indice de concassage d'autant plus élevé que le trafic est plus important et la charge légale à l'essieu plus lourde.

Les caractéristiques géométriques principales des granulats routiers sont : l'état de surface, l'angularité, la forme et la granularité

I.6.2.1. Etat de surface des granulats

Dans le cas des roches poly cristallines ($\emptyset > 1$ mm), la rugosité dépend de la structure de la roche. Si le grain est monominéral ($\emptyset < 1$ mm), la surface est généralement lisse.

Pour les roches poly cristallines, la rugosité dépend de la dimension « d » des cristaux. Plus une roche a un « grain fin », plus sa cassure n'est lisse. Par contre, les roches à « gros grain » ont toujours des surfaces rugueuses.

L'état de surface des grains joue un rôle au niveau de la maniabilité des matériaux, de la stabilité des assises non traitées et de la microrugosité des couches de surface. Cependant, l'action du trafic tend à polir la surface des grains, mais il est admis qu'une bonne microrugosité assure généralement une bonne adhérence à faible vitesse.

I.6.2.2. Angularité des granulats

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement, en améliorant l'adhérence, et pour ceux des assises de chaussées, dont elle améliore la stabilité.

- Pour un granulats concassé de roche massive, elle est égale à 100 %.
- Pour un granulats d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :
 - L'indice de concassage IC, proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulats élaboré.
 - Le rapport de concassage RC, rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulats obtenu.

Pour les assises de chaussées non traitées, l'angularité favorise les propriétés mécaniques en augmentant l'angle de frottement interne : celui-ci augmente d'environ 12° dans un essai triaxial quand on passe des billes de verre entièrement roulées aux billes de verre concassées. Pour les couches de roulement, ce facteur favorise l'adhérence pneumatique, la rupture du film d'eau et le drainage.

La maniabilité et la compactibilité sont également liées à l'angularité : le déplacement relatif des grains et leur mise en place sont facilités lorsqu'ils sont arrondis.

I.6.2.3. La forme des granulats

Elle joue un rôle important à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats ou allongés réduisant la compacité et la stabilité.

Elle a aussi une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux (Los Angeles, Micro-Deval, fragmentation dynamique).

I.6.2.4. La granularité des granulats

Elle caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. La granularité a une importance primordiale car elle permet d'obtenir une compacité maximale et d'éviter la ségrégation au moment de la mise en œuvre.

La granularité que l'on peut maîtriser et optimiser pour tous les matériaux, apparaît comme le recours le plus général pour corriger les autres caractéristiques géométriques des granulats et dans une certaine mesure une résistance mécanique déficiente.

I.6.3. Les matériaux utilisés dans les couches d'assise

Il existe 4 matériaux différents grâce auxquels on peut former le corps de chaussée :

- Les graves non traitées
- Les graves et les sables traités aux liants hydrauliques
- Les graves et les sables traités aux liants hydrocarbonés
- Les bétons de ciment

I.6.3.1. Les graves non traités

C'est le plus ancien des matériaux modernes. Depuis les années 50, elle n'a pas cessé d'être améliorée afin de convenir à la demande actuelle. C'est un mélange à granularité continue de cailloux, de graviers et de sables, avec généralement une certaine proportion de particules plus fines. On les obtient en concassant soit des pierres naturelles, ou alors des matériaux de récupération. Le grave non traité doit, évidemment, répondre à un certain nombre de conditions, pour jouer parfaitement son rôle dans la chaussée.

- **Granularité** : Elle est très importante, en effet, le comportement des grains lors du compactage dépend d'elle. Une compacité élevée assure une bonne stabilité et une bonne résistance à l'apparition des ornières, elle augmente aussi le module d'élasticité E et assure un meilleur étalement des charges sur le sol de fondation. C'est en fait la distribution dimensionnelle des grains du granulat. Elle est déterminée à la fabrication des granulats.

- **Angularité** : Plus cette caractéristique est élevée, plus la stabilité de la chaussée sera bonne. C'est la proportion de granulats à arêtes vives. Elle est définie lors de la fabrication des granulats.
- **Forme** : Elle résulte de la manière de fabrication des granulats et est définie par la grosseur et l'épaisseur.
- **Propreté** : C'est un élément essentiel de la stabilité par temps humide. En effet, il représente le comportement du sol par rapport à l'eau. Cette 'propreté' est appréciée par l'essai d'équivalent de sable. C'est la proportion de fines (granulat de très petites dimensions) présentes dans et sur les granulats.
- **Dureté** : Puisque rien ne lie les granulats, des efforts plus importants sont appliqués sur eux, ce qui fait que pour ne pas s'effondrer à la première charge trop grande, il leur faut certaines caractéristiques de dureté. Ce qui assure une bonne qualité de l'assise, même s'il y a beaucoup de trafic.

Qualité de la roche de départ : En effet, on ne peut pas prendre n'importe quelle roche pour fabriquer de la grave, car certaines caractéristiques de celle-ci (gélivité, résistance au polissage) dépendent directement de la roche. Donc, on doit bien faire attention lors du choix de la roche à concasser pour avoir les caractéristiques recherchées.

I.6.3.2. Les graves et les sables traités aux liants hydrauliques(Ou liants blancs)

Le liant permet de rigidifier la structure du grave et donc de lui assurer de meilleures caractéristiques. Lors des premières utilisations de cette méthode, on a utilisé le ciment comme liants, puis on a sans cesse amélioré les liants permettant d'accroître leur efficacité.

Pour avoir un corps de chaussée valable qui résistera au trafic, de nombreux critères sont à prendre en compte :

- **Connaître précisément la composition des liants utilisés** : Pour respecter cela, les liants sont fabriqués en centrale, où ils sont composés avec beaucoup de soin pour qu'ils respectent toujours les mêmes caractéristiques.
- **Ne pas mettre trop de liants dans la fabrication du matériau** : Pour cela, il existe des normes qui permettent de fixer le pourcentage de liants de chaque sorte à utiliser.
- **Avoir un grave possédant les caractéristiques requises** : En effet, il faut savoir que le liant poursuit son travail même quand la route est en circulation, c'est pourquoi le grave doit avoir certaines caractéristiques qui empêchent les problèmes dus à la prise du liant de se produire. Pour les déterminer, il existe une fois encore des normes qui permettent de déterminer quelles graves utilisées.

I.6.3.3. Les graves et les sables traités aux liants Hydrocarbonés (Ou liants noirs)

On utilise ici, comme liant du bitume soit sous forme de bitume pur ou sous forme d'émulsion.

- **Graves-bitume** : C'est donc un mélange de graves et de bitume pur. Comme pour ce que nous avons vu précédemment, le grave et le bitume doivent avoir certaines caractéristiques. Par exemple, les granulats doivent avoir une certaine dimension (comprise dans une fourchette) pour obtenir les caractéristiques recherchées.

- **Sables-bitume** : Ici, aussi certaines caractéristiques du sable et du bitume sont requises pour obtenir le mélange que l'on veut. On améliore les caractéristiques du sable en lui additionnant certains autres éléments, comme de la chaux, du ciment, ou même du sable broyé.
- **Graves-émulsion** : Lorsqu'il est en émulsion, le bitume se fixe sur les éléments fins en constituant un mastic qui enchâsse les gros grains et les scelle entre eux. Le mélange sortant du malaxeur est très maniable et le reste jusqu'à la fin du compactage. Ce matériau est souvent utilisé pour les reprofilages car elle peut être mise en œuvre en faible épaisseur et même se raccorder à zéro sur une chaussée déformée. On l'utilise également en renforcement et en couche de base. Il est bon de noter que c'est une technique peu coûteuse en énergie.

I.6.3.4 Bétons de ciment

Ce sont des mélanges, fabriqués en centrale, de granulats, de ciment et d'eau. Les bétons ont la propriété d'être maniables pendant un certain temps après leur fabrication, puis de durcir progressivement jusqu'à atteindre des résistances très élevées. Les particularités des bétons routiers ne sont pas différentes de celles des bétons utilisés dans d'autres applications.

I.7. Dégradation des chaussées

I.7.1. Types de dégradations des chaussées

Les dégradations des chaussées, selon le catalogue des dégradations de surface des chaussées du [18], peuvent être divisées en quatre familles : les arrachements et les mouvements de matériaux, les dégradations de déformations, les fissures.

Les deux premières familles reflètent la qualité de la couche de surface. Les deux dernières familles concernent la détérioration

I.7.1.1. Les déformations

- **L'orniérage à grand rayon** : Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80 cm de large.



Figure I.7 : Orniérage grand rayon [46].

- **Causes** : sous-dimensionnement de l'assise/réduction de portance du support dû à un mauvais drainage ou l'action du dégel.
- **Évolution** : faiénçage dans l'ornière.

- **L'affaissement de rive** : Enfoncement prononcé localisé à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive.



Figure I.8 : Affaissement de rive [47].

- **Causes** : sous-dimensionnement de l'assise ou sol support ou épaulement/drainage défectueux/retrait hydrique du sol (climat-végétation). Dégradation aggravée par la présence d'eau qui reste stockée dans le bas-côté.
 - **Évolution** : faïençage au droit de l'affaissement.
- **L'affaissement hors rive (flashe)** : Enfoncement ponctuel, flache quand l'affaissement a une forme circulaire.

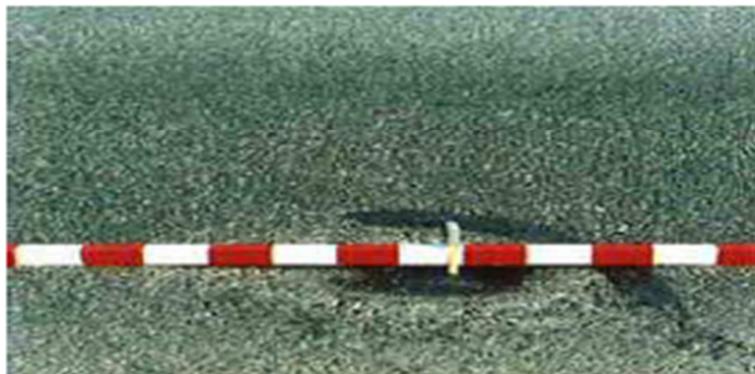


Figure I.9 : Flache [47].

- **Causes** : sous-dimensionnement localisé de l'assise ou du sol support/ présence d'eau provenant des couches supérieures (défaut de portance).
- **Évolution** : faïençage puis départ de matériaux

I.7.1.2. Les fissurations

- **La fissuration transversale**

La fissuration transversale Fissuration sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée, isolée ou périodique d'espacement variable sur tout ou partie de la largeur de chaussée.

- **Causes** : remontée en surface d'une fissure de prise ou de retrait thermique ou remontée d'un joint transversal de mise en œuvre de l'assise traitée ou joint de reprise d'un tapis d'enrobé.

- **Évolution** : ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faïençage puis départ de matériaux.

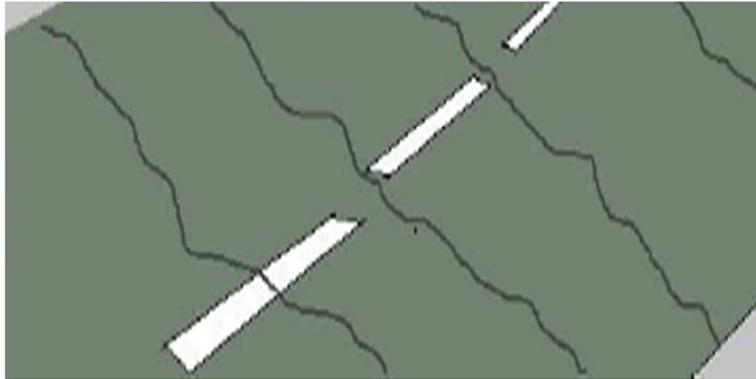


Figure I.10 : Fissures transversales.

- **La fissuration longitudinale en bande de roulement**

Fissuration sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée, apparaissant exclusivement dans une bande de roulement.



Figure I.11 : Fissures longitudinales [49].

- **Causes** : fatigue de la structure par excès de contrainte de la ou des couches traitées sous dimensionnement ou décollement. Défauts de construction (mouvement de sols, retrait sol argileux).
- **Évolution** : ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faïençage puis départ de matériaux.

- **Le faïençage dans les bandes de roulement**

Ensemble de fissures entrelacées ou maillées.



Figure I.12 : Faïençage [49].

- **Causes** : Fissures de fatigue dédoublées, décollement de la couche de roulement, portance insuffisante.
- **Évolution** : Ouverture progressive des fissures jusqu'au départ des matériaux.

I.7.1.3. Les arrachements

- **Nid de poule** : Trou apparaissant à la surface de la chaussée ou stade final d'un faïençage ou bien d'une flache.



Figure I.13 : Nid de poule nécessitant un bouchage d'urgence

- **Causes** : Désagrégation et départ de matériaux dus à une mauvaise qualité de la chaussée, à une pollution par remontée d'argile dans le corps de la chaussée, à une forte perméabilité de la couche de roulement.
- **Evolution**
 - Augmentation en nombre et taille des trous ;
 - Ruine totale de la chaussée.
- **Pelade** : Etat d'un enduit présentant des manques par plaques



Figure I.14 : Pelade sur enrobé de faible épaisseur [44].

- **Cause** : trop faible épaisseur de la couche de roulement (1 à 2 cm) avec collage défectueux (absence ou insuffisance de la couche d'accrochage) qui, sous l'action des efforts horizontaux dus au trafic, se décolle du support.
- **Evolution** : arrachement progressif de la couche de surface.
- **Plumage** : Etat d'un enduit dont la mosaïque est rendue non jointif par départ de granulats.



Figure I.15 : Plumage généralisé [44].

- **Cause**
 - Sous dosage en liant d'un enduit superficiel.
 - Mise en œuvre dans des conditions atmosphériques défavorables (température trop basse, pluie...).
 - Utilisation de gravillons sales.
 - Compactage insuffisant.
 - Épandages de liant inadapté.
 - Remise trop rapide sous circulation. Cette dégradation se rencontre souvent dans les zones humides ou ombragées. (Surdosage en liant nécessaire).
- **Evolution** : arrachement progressif de la totalité des gravillons.

I.7.1.4. Les remontées

- **Le ressuage** : Etat d'un enduit caractérisé par la remontée de liant en plaque recouvrant la mosaïque.



Figure I.16 : Ressuage sur emploi partiels à l'émulsion [44].

- **Cause**

Surdosage de bitume sur des emplois partiels à l'émulsion ou sur des enduits.
Enfoncement des granulats dans un support bitumineux trop «mou» ou trop «gras» (enrobé trop riche en mastic).
Délai insuffisant entre les réparations localisées à l'émulsion et la réalisation de l'enduit.
- **Evolution** : Ces phénomènes sont aggravés par forte chaleur Sous circulation, l'ensemble de la couche de roulement peut être arraché par les véhicules par collage aux pneumatiques. [39]

I.7.2. Cause de dégradations des chaussées

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

I.7.2.1. Le trafic

Au passage d'un véhicule la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue les poids lourds sont particulièrement agressifs : le passage d'un essieu de 13 tonnes a autant d'effet sur la structure de la chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme. La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée qui présente alors des dégradations. Le frottement des pneumatiques en mouvement sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement. Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées de giratoire peuvent donner lieu à des dégradations de la chaussée.

I.7.2.2. 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.

I.7.2.3. 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.

I.7.2.4. Les accidents et les incidents

Des dégradations ponctuelles peuvent être causées suite à des accidents de circulation Ou des utilisations anormales du domaine public. [39].

I.8. Action des véhicules sur la chaussée

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, [4], [5].

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

En plus du trafic et de son taux d'accroissement ; la vitesse de circulation et le poids des véhicules exigent de plus en plus, que soit améliorée la construction des chaussées modernes, ainsi le concepteur doit prendre certaines précautions lors du choix des matériaux constituant les différentes couches afin de permettre aux usagers de se déplacer, rapidement, sûrement et sans usure exagérée du matériel et du matériau.

Dans cette étude, nous avons tenté de remplacer les granulats naturels généralement utilisés dans le domaine du génie civil (en particulier dans le domaine routier), par des granulats mélangés avec des débris de verre et des déchets plastiques (matériaux de recyclage).

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

CHAPITRE II

VALORISATION DES DECHETS

II.1.Introduction :

La gestion des déchets est synonyme de gestion des risques et des ressources, c'est une gestion du cycle de vie du déchet depuis sa génération jusqu'au traitement final.

Le danger que représente un déchet est déterminé par sa capacité à se dégrader dans la nature et dans le temps. En effet, les déchets plastiques dont la durée de vie peuvent atteindre plusieurs siècles, envahissent aujourd'hui notre quotidien.

L'engouement pour le plastique s'est justifié par son coût peu élevé, du fait qu'il soit facilement transformable et peut épouser toutes les formes dans différentes couleurs, ce qui n'est pas le cas pour les matériaux basiques tels que le bois, le verre, le métal et le papier.

Dès lors, on a peu à peu assisté à une substitution des matériaux précités par le plastique vue son coût économique attractif, aussi bien pour l'industrie que pour les populations.

Le plastique représente une pollution visuelle des plus agressives, disséminées dans la nature, ou en dépotoirs sauvages, les conséquences directes de ce produit largement incriminé sont nombreuses et se traduisent par la menace de notre cadre de vie, de notre santé et de notre environnement.

La valorisation des déchets n'est pas seulement une solution écologique, mais surtout une activité économique viable.

Dans ce chapitre, nous exposerons les différents types de déchets, les méthodes de leurs traitements et leurs valorisations ainsi que la prise en charge des déchets plastiques dans le secteur du génie civil comme perspective d'un développement durable.

II.2. Définition des déchets

Le déchet est défini comme étant tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.

En Algérie, la gestion, le contrôle et l'élimination des déchets est régie par la loi 01-19 du 12 décembre 2001.

II.3. Classification des déchets

Les déchets sont divers et se distinguent par leurs origines, leurs toxicités, et leurs dégradations, on distingue :

II.3.1. Les déchets ménagers et assimilés : ce sont les déchets issus des ménages, des activités industrielles, des activités commerciales et artisanales.

II.3.2. Les déchets des collectivités locales : ce sont les résidus du nettoyage des rues, des papiers divers issus des administrations et déchets d'espaces verts.

II.3.3. Les déchets industriels : on distingue trois catégories de déchets industriels :

- **Les déchets industriels toxiques** qui doivent être manipulés et traités avec précautions ;
- **Les déchets industriels banals ou non dangereux** tel que les déchets résultant des industries et des activités commerciales ;
- **Les déchets industriels spéciaux** qui regroupent tous déchets dangereux et nocifs susceptible de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement.

II.3.4. Les déchets hospitaliers : ce sont les déchets issus du domaine médical humain et vétérinaire classé comme étant dangereux.

II.3.5. Les déchets inertes : tout déchet provenant notamment de l'exploitation des carrières des mines, des travaux de démolition de construction, ou de rénovation qui ne subissent aucune modification chimique ou biologique lors de leur mise en décharge.

II.4. Statistiques et composition des déchets de la commune de Tizi Ouzou

Le tableau suivant résume la composition des déchets de la commune de Tizi-Ouzou :

Tableau II.1 : Constitution des déchets de la commune de Tizi Ouzou [1].

Catégorie	Sous catégories	Pourcentage (%)	Total (%)
Putrescibles	> 30 mm	49.51	53.24
	< 30 mm	3.73	
Plastique	Film plastique	13.20	19.25
	PEHD	3.02	
	PET	2.88	
	PVC	0.15	
Carton papier	Carton	8.36	9.5
	Papier	1.14	
Textile	Tissus et sanitaire	2.77	11.67
	Couches enfants	8.90	
Aluminium	Emballage	0.30	2.05
	Canette	1.75	
Emballage	Tétra-Pack	0.48	0.48
Métaux	Aérosol	0.43	0.53
	Fer	0.10	
Verre	Verre	0.98	0.98
Déchets spéciaux	/	0.53	0.53
Autres	CNC	1.05	1.77
	INC	0.72	

Ces statistiques sur la composition des déchets de la commune de Tizi-Ouzou montrent qu'au-delà des déchets putrescibles ou organiques qui représentent 53.24% des déchets, à la propriété biodégradable, le plastique constitue le pourcentage le plus élevé des déchets générés inertes avec une valeur de 19.25% des déchets totaux.

Inventaire des quantités de déchets ménagers et assimilés de la commune de Tizi-Ouzou de 2010 à 2013 :

Tableau II.2 : Quantité des déchets collectés par la commune de Tizi-Ouzou [46].

	2010	2011	2012	2013
Janvier	2916	2870	2760	3004
Février	2624	2700	2865	2912
Mars	3476	2903	2582	3710
Avril	2532	2553	3322	3115
Mai	3030	4837	2938	5610
Juin	2974	3388	2720	3783
Juillet	2802	2843	2700	3139
Aout	2863	2720	2868	3179
Septembre	2732	3361	4708	3080
Octobre	2883	2931	4453	3696
Novembre	2974	2911	2522	5782
Décembre	2666	2910	2963	3176

L'accroissement de la population local a multiplié les déchets générés. Il faut savoir, que la commune de Tizi Ouzou souffre d'une collecte insuffisante des déchets, des enquêtes de terrain recensent **533** dépotoirs sur le territoire communal, soit **4 000** tonnes de déchets abandonnées dans la nature, un chiffre très élevé est excessivement inquiétant.



Figure II.1 : Décharges sauvages dans la commune de Tizi-Ouzou.

II.5. Traitement et Valorisation des déchets

Les déchets représentent des risques majeurs pour la santé publique et l'environnement, en effet les dépôts sauvages entraînent une pollution visuelle mais surtout des sols et des eaux souterraines (nappe phréatique) via l'infiltration de substances polluantes, il est donc nécessaire de les traiter et de les valoriser.

II.5.1. Définition du traitement des déchets

Selon la loi 01-19 du 12 décembre 2001, le traitement des déchets est toute mesure pratique permettant d'assurer la valorisation, le stockage et l'élimination des déchets d'une manière garantissant la protection de la santé publique et/ou de l'environnement contre les effets nuisibles que peuvent avoir ces déchets.

II.5.2. Définition de la valorisation

La loi 01-19 définit aussi la valorisation des déchets comme étant toutes les opérations de réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets.

La gestion des déchets générés suit un processus de collecte de tri, puis de traitement écologique rationnel, ce sont des mesures pratiques permettant d'assurer la valorisation de ces déchets par le recyclage, le compostage et la réutilisation.

II.5.3. Différents types de valorisation des déchets

II.5.3.1. Valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste en l'incinération des déchets dans des incinérateurs techniques, dans lesquels les déchets bruts sont portés à une température très élevée. Ce procédé aboutit à la création de chaleur par récupération de l'énergie interne des résidus combustibles, pouvant alimenter les systèmes de chauffages et d'électricités.

Ce procédé est actuellement en développement dans notre pays, d'après les renseignements recueillis auprès du service de l'environnement de la wilaya de Tizi-Ouzou, un avis d'appel d'offre a été lancé en 2015 pour l'acquisition d'un incinérateur à Oued Fali, et une entreprise Française a été retenue pour la réalisation du dit projet dans le cadre du développement durable.

Un autre procédé est apparu, appelé pyrolyse, il s'agit d'une réaction thermique entre 400 et 600°C permettant une décomposition des déchets organiques qui seront transformés en combustibles solides, liquides ou gazeux. La pyrolyse n'est utilisée que dans les pays de haute technologie.



Figure II.2 : Illustration de la valorisation énergétique

II.5.3.2. Valorisation organique

La valorisation organique est un procédé naturel, et porte sur toutes les matières d'origine animale ou végétale dites communément « biodégradable ».

Le compostage est une méthode ancienne pratiquée dans la fabrication du compost utilisé pour la régénération des sols.

La modernisation et l'évolution des technologies a développé les procédés de fermentations,

pour la création de méthane utilisé pour les mêmes applications que le gaz naturel. Dans notre pays, la fabrication du compost ne concerne que les régions rurales, quant à la création du méthane elle demeure anodine, voire inexistante.



Figure II.3 : Déchets organiques.

II.5.3.3. Valorisation de la matière (Le recyclage)



Figure II.4 : Emblème du recyclage.

Le recyclage est un procédé de réintroduction de la matière première issue de nos déchets dans notre quotidien, il offre une nouvelle vie aux déchets et permet de mieux préserver l'environnement en limitant la pollution. Cette filière aide aussi au développement puisqu'elle contribue à l'économie des ressources naturelles et à la création d'emplois.



Figure II.5 : Déchets ménagers.

II.5.3.3.1. Les différentes filières du recyclage

On recense dans le monde onze filières de recyclage, chacune est définie par un type de déchets bien précis, elles servent à maîtriser l'ensemble des déchets et le flux à traiter. Ces filières sont :

- **Le verre** : le verre à la particularité d'être recyclable à l'infini, le processus ne modifie

pas ses caractéristiques et il est sans danger pour la santé. Son recyclage permet d'économiser environ 100 Kg de fuel pour une tonne de verre.

- **Le papier carton** : le vieux papier est transformé en pâte à papier pour en faire des journaux, des emballages, des papiers hygiéniques... La fabrication de 90 000 tonnes de pâte recyclée nécessite 105 000 tonnes de papier récupéré, soit suffisamment pour sauver 420 000 tonnes de bois de forêt.
- **L'aluminium et le fer** : ces deux matières premières sont récupérées après recyclage des boîtes de conserves usagées et des emballages en tôle d'acier....
- **L'électronique** : la récupération et la valorisation des déchets de type téléviseurs ou ordinateurs est très importante, de par cette filière on obtient des matières premières tel que le fer, l'aluminium et le cuivre, mais aussi des métaux plus nobles comme l'argent, l'or, le nickel et le platine.
- **Les métaux** : cette filière récolte les métaux en vrac dans les déchets, elle englobe les métaux ferreux qui proviennent des objets métalliques de fin de vie, et les métaux non ferreux tel que le zinc et le plomb.
- **Déchets verts et bois** : Ce sont les matières ou résidus organiques d'origine végétale, ces déchets sont générés par plusieurs activités telle que le jardinage ou encore l'entretien des espaces verts, ils sont alors dans ce cas transformés en composte ou incinérés. En plus de ces déchets de verdure, les déchets ménagers de type épluchures de fruits et légumes permettent de produire du biogaz, puisqu'elles se composent de la matière première nécessaire à cette production 'la biomasse'. Le bois quant à lui est valorisé en énergie renouvelable tel que l'électricité et la chaleur.
- **Gravats** : issus de la démolition des constructions, cette filière englobe les déchets de béton, des déblais graveleux et d'enrobés bitumineux. Après triage, les déchets sont concassés, lavés puis séparés pour en fabriquer des granulats recyclés. Cette opération permet de préserver la matière première des carrières.
- **Déchets de chantiers** : comme précédemment ces déchets sont issus des démolitions des constructions et des routes, hormis les déchets de type gravat cette filière valorise toutes les autres matières, un tri est effectué pour isoler les matériaux qui seront redirigés vers leurs filières respectives.
- **Déchets spéciaux** : Selon l'OFEV (l'Office fédéral de l'environnement), « la part des déchets spéciaux, dans l'ensemble des déchets, est d'environ 6% ». Ce sont les déchets de compositions chimiques présentant un danger pour la santé publique et l'environnement, il existe 3 familles de déchets spéciaux :
 - Les déchets domestiques dangereux : piles, solvants, pneus...
 - Les appareils électroniques : appareils photos, téléphones, électroménagers...
 - Les déchets industriels toxiques et d'activités de soins : mâchefer, produits phytosanitaires, déchets hospitaliers.Ces déchets sont entreposés dans des sites désinfectés et protégés ou ils subissent plusieurs traitements pour en réduire la toxicité et les risques de contamination.
- **Les PET (plastique de bouteilles transparentes)** : après recyclage le PET est réutilisé

comme matière secondaire, avec ces derniers on fabrique de nouveaux des emballages divers et des vêtements en laine polaire.

- **Le plastique** : étant non biodégradables il est essentiel de trouver une seconde vie aux déchets plastiques, on les réutilise en bouteilles, en emballages... Réutiliser 1 tonne de plastique permet d'économiser 800 kg de pétrole brut.



Figure II.6 : Les différentes filières du recyclage.

II.6. Le plastique

II.6.1 Définition des matières plastiques

Les matières plastiques sont des polymères d'origine naturels ou de synthèse, ils s'introduisent presque partout dans nos vies quotidiennes, dans les emballages des produits alimentaires, dans les textiles, produit médicaux, matelas, pneus, circuits électroniques, produits cosmétiques... Les polymères sont obtenus par une synthèse chimique du pétrole, du charbon, du gaz naturel et à partir d'autres substances végétales.



Figure II.7 : Matières plastiques.

II.6.2. Les différents types de plastiques et leurs appellations

Pour distinguer les différents types de matières plastiques, la société de l'industrie plastique a mis au point en 1988 un système de marquage sous forme de code d'identification :

- Le **PET** ou **PETE** : sous l'appellation chimique de poly téréphtalate d'éthylène, ce sont les plastiques utilisés pour les bouteilles d'eau, de jus, et tous les sodas commercialisés.
- **HDPE** ou **PEHD** : ce sont les polyéthylènes à hautes densités, utilisés pour les flacons, les emballages semi-rigides...
- **V** ou **PVC** : ce sont les polychlorures de vinyle, ils servent à la fabrication des canalisations (tubes), revêtement de sol, bouteilles de détergents...
- **LDPE** ou **PEBD** : polyéthylène basse densité, notamment utilisé dans les bâches, sacs poubelles....
- **PP** : polypropylène, conçu pour la fabrication des équipements automobiles tels que les pare-chocs, aussi dans les jouets et dans les emballages alimentaires.
- **PS** : ou plus communément appelé le polystyrène, utilisé dans l'isolation pour bâtiment, gobelets jetables, stylos...
- **OTHER** ou **O** : ce sont les plastiques potentiellement toxiques qui n'entre pas dans les catégories précédentes.

II.6.3. Valorisation des déchets plastique

Le recyclage du plastique présente de nombreuses difficultés, en dépit des efforts accomplis par les industriels. Ces matières peuvent paraître semblables, mais il en existe en fait plus d'un millier de types qui réclament des traitements très différents. Aussi seulement 2 à 3 % soit 23 million de tonne par an sont réutilisés, 133 000 tonne sont valorisés en énergie et seulement 7 000 tonne ne sont effectivement recyclés.

II.6.3.1. La valorisation des déchets plastique dans le domaine routier et le génie civil

La réutilisation des déchets plastiques dans les corps de chaussées a déjà été abordée dans plusieurs pays étrangers tels que les Etats-Unis, l'Allemagne ou encore la France, mais aussi en Afrique.

-En Allemagne : Mise au point d'un revêtement routier à base de granulats concassés et d'un liant thermoplastique constitué de 80% de déchets plastiques et de 20% de bitume. La technique consiste à fabriquer des plaques appelées Plasphalt pouvant être posées directement sur les assises de chaussées [36].

-Aux États-Unis : fabrication de dalles de 6cm d'épaisseur à base de granulats de bitume et de plastique provenant de pots de lait (polyéthylène) [36].

-En France : deux recherches sont effectuées par la Recherche Routière [36] :

- L'incorporation sous forme de poudre de déchets industriels issus de la polymérisation du PVC dans du brai de houille (chapitre 1 Matériaux routiers) en proportion suivante : 25% de poudre de déchets plastiques 0/14mm, 75% de brai de houille.
- L'incorporation de lanières de déchets plastiques ménagers de type polyéthylène, PVC, polystyrène, dans les enrobés à base de bitume avec une constitution de 3% de déchets plastiques.

Selon les ingénieurs de la recherche en technique routière, [36] ; les essais de laboratoire et des planches expérimentales ont montré que les performances mécaniques étaient multipliées par trois, dans le cas d'utilisation du brai, et par deux dans le cas d'emploi du bitume. Par

ailleurs la compacité et la tenue à l'eau étaient améliorées. Dans le deuxième cas (emploi de lanières de matières plastiques) les fibres peuvent apporter un effet d'armatures conduisant à la fabrication d'enrobés armés. Cette technique d'incorporation permet d'utiliser tous déchets plastiques ménagers sans triage ni nettoyage suivant des procédés de fabrication et de mise en œuvre des enrobés tout à fait classiques.

Nous citerons également la valorisation, hors technique routière, des déchets textiles plastiques réemployés bruts en renforcement des sols, murs de soutènement, remblais allégés, talus... ; on appelle ces procédés Plasterre et plasbloc.

-A Nancy (France), a été mis au point en Mai 1987 des enrobés bitumineux renforcés par addition de déchets plastiques.

D'après Bense [2] du laboratoire régional de l'équipement de Nancy, l'ajout de déchets plastiques solides, lors du malaxage d'un enrobé bitumineux procure à ce dernier des propriétés particulières qui le rendent à la fois plus rigide et nettement moins susceptible à la température. Ces propriétés permettent des emplois spécifiques, parmi lesquels on notera particulièrement les couches de roulement anti-orniérage et les enrobés à haut pouvoir de renforcement. Ce procédé présente par ailleurs quatre autres qualités :

- La simplicité (déversement d'un déchet solide livré en doses prêtes à l'emploi-pas de changement de liant) ;
- La facilité d'emploi (fabrication totalement « à la demande » y compris par petites quantités ;
- L'efficacité (action puissante à faible dosage) ;
- Le faible prix (10 à 15 % d'augmentation de prix par rapport à un enrobé classique).

(Ministère de l'équipement du logement du territoire et des transports DR-DSCR, 1987).

-Au Cameroun, deux jeunes hommes du nom d'Elvis et Robert [19] mettent au point un pavé constitué de 100% de déchets plastiques. Le laboratoire de génie civil camerounais affirme que ces pavés sont trois fois plus résistants que ceux fabriqués à base de ciment, la charge maximale supportée est de 50,5 tonnes au lieu de 12 tonnes pour le pavé traditionnel.



Figure II.8. : Pavés fabriqués à partir de déchets plastiques [46].

-Au Bénin, est effectué au laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA) l'étude de l'incorporation du fondu de déchets de sachets plastiques sur la consistance du bitume et la stabilité du béton bitumineux.

Les ingénieurs affirment que pour 2 à 20% en masse d'incorporation de poudre de sachets plastiques dans le bitume, les différentes valeurs enregistrées ont révélé que la pénétrabilité, mesurée suivant la norme EN1426, diminue quand la teneur en poudre de sachets augmente donnant naissance à des liants bitumineux appartenant aux classes respectives 50/70, 40/60, 35/50, 30/45 et 20/30 alors que le point de ramollissement augmente. L'adhésivité est positivement améliorée avec l'accroissement de la teneur en sachet plastique au même titre que la stabilité Marshall du béton bitumineux décaoulant [14]

-En Algérie, des travaux ont été réalisés par Boukhari, Kebaili et Boucherba [3] de l'Université Kasdi Merbah de Ouargla, qui a pour but d'évaluer l'importance et les conséquences d'utilisation des déchets plastiques broyés de polyéthylène à haute densité (PEHD) comme un polymère dans le béton bitumineux. Le polyéthylène à haute densité PEHD est la matière la plus utilisée dans la fabrication des produits en plastiques, les sacs, les bouteilles et d'autres produits, le PEHD est disponible en abondance, avec plusieurs bonnes caractéristiques, qui les rendent aptes à la construction des routes bitumineuses. L'utilisation de polyéthylène à haute densité PEHD va améliorer certaines propriétés de l'enrobé et également résoudre les problèmes environnementaux. Les résultats obtenus sont satisfaisants et confirment que l'utilisation en PEHD en béton bitumineux peut améliorer certaines caractéristiques.

II.6.4. Propriétés des matières plastiques

Les matières plastiques présentent de nombreuses propriétés intéressantes, elles se caractérisent par une protection physique et chimique telles que l'imperméabilité, la résistance chimique aux solvants. Elles ont la propriété d'avoir une faible masse volumique et donc une forte légèreté. Le plastique est aussi connu pour sa résistance au choc, son excellente ténacité, et enfin aucun phénomène d'oxydation d'où sa très grande durée de vie pouvant atteindre les 450 ans.

Le tableau suivant englobe les caractéristiques de chaque type de matière plastique :

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères [10].

Type	Légèreté	Dureté	Tenue au choc	Résistance au froid	Résistance à la chaleur	Résistance aux solvants organiques	Module d'élasticité E (GPa)	Densité
PEHD	Très bon	Médiocre à assez bon	Très bon	Bon	Assez bon	Très bon	0.8-1.2	0.95
PVC	Assez bon	Assez bon	Faible à très bon	Médiocre	Faible	Faible à bon	2.4	1.38
PEBD	Très bon	Faible à médiocre	Médiocre à très bon	Bon	Médiocre	Très bon	0.12-0.3	0.92
PP	Très bon	Médiocre	Faible à assez bon	Médiocre	Assez bon à bon	Bon	1.3	0.91
PS	Bon	Assez bon à bon	Médiocre	Bon	Assez bon	Faible à bon	3.2	1.05

II.7. Le verre

II.7.1. Définition du verre

On peut distinguer deux définitions du verre :

- un matériau dur, fragile (cassant) et transparent, à base de silicium et de fondants.

Cette définition est celle du sens commun et c'était aussi celle des scientifiques jusqu'au XIXe siècle. Avant le XXe siècle en effet les verres silicatés (verres sodocalciques) étaient pratiquement les seuls matériaux transparents que l'on savait produire industriellement, et encore aujourd'hui ce sont les verres produits en plus grande quantité (vitrages, vaisselle et verrerie de laboratoire, notamment). Cette définition est porteuse de toute la symbolique établie de la transparence présentée par le verre ;

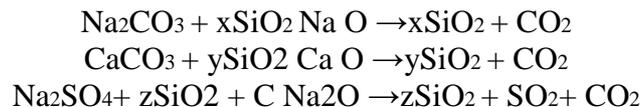
- un solide non cristallin présentant un phénomène de transition vitreuse.

Cette définition proposée par Jerzy Zarzycki [13], est celle qui fait aujourd'hui consensus au sein de la communauté scientifique.

II.7.2. Les différents types et composition de verre

Le verre est une substance amorphe (non cristalline) composée principalement de silice fondue à haute température, à laquelle on ajoute des silicates et d'autres éléments (Na₂CO₃, Na₂SO₄, CaCO₃, CaF₂, aluminosilicates sodiques, potassiques ou calciques, dolomite)

En général transparent, le verre peut également être translucide ou opaque. Sa couleur varie selon sa composition.



Selon le corps qu'on ajoute à la silice, on obtient un type de verre donné selon l'usage qu'on veut en faire.

Pour modifier les conditions d'élaboration ou la teinte du verre, certains constituants sont ajoutés en très faibles quantités (<1%). Par exemple :

- As₂O₃ et Sb₂O₃ sont utilisés pour faciliter l'affinage.
- Des oxydes colorants sont ajoutés pour obtenir des teintes spéciales.

Plusieurs types de verre existent, on distingue :

- **les ampoules appartiennent**, la même famille que les bouteilles d'emballage, mais leurs compositions chimiques sont différentes.
- **-Les verres sodocalciques**, autrement dit les ampoules électriques, les verres plats et creux et certains verres d'emballages.
- **-Les verres borosilicates**, c'est-à-dire les ustensiles de cuisine (plats allant au four par exemple), la fibre de verre.
- **-Les vitrocéramiques** que l'on retrouve dans la verrerie culinaire, les miroirs de télescope.

Le verre peut subir des modifications pour le renforcer et le sécuriser :

- Verre trempé :
 - Trempe thermique : des traitements thermiques permettent d'améliorer la résistance des pièces : les vitres latérales et arrières des automobiles comme certaines pièces d'ameublement sont trempées par un refroidissement rapide et contrôlé, le plus souvent par de l'air.
 - Trempe chimique : ce type de trempe à lieu en remplaçant par diffusion une partie des

ions alcalins par d'autres ions alcalins de plus gros rayon ionique. Par exemple le sodium ou le lithium du verre par des ions potassium.

- Verre feuilleté : composé de couches verre-plastique-verre ou plus. Les pare-brises des automobiles et les vitres blindées sont en verre feuilleté. Ainsi, lors d'un choc, le pare-brise se casse, mais reste en place. Les passagers risquent moins d'être blessés par des bris. Le verre blindé ayant huit couches de plastique peut résister à 70 coups de hache avant d'être traversé.

II.7.3. La valorisation des déchets de verre dans le domaine routier et le génie civil

-Utilisation du verre dans le ciment Portland : 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 granulats 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 [8] sur le comportement des débris de verre dans le ciment Portland, les résidus de verre affichaient la composition chimique décrite dans le tableau II.4 :

Tableau II.4. 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 ₃	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

D'après ces études, on peut conclure que les résidus de verre (réduits en particules fines) pourraient être utilisés, en combinaison avec le ciment Portland, comme liant.

-Utilisation des résidus de verre dans les enrobés bitumineux : 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. Cette étude a permis d'identifier certains comportements et particularités liés à l'utilisation du verre dans les enrobés bitumineux, à savoir :

- Le manque d'adhésion entre les granulats de verre et le bitume, faible densité, brisure de morceau de verre et endommagement des pneus. Ainsi, le Glasphalt utilisé en couche de base procurait un meilleur résultat, puisque l'on ne retrouvait plus le problème d'endommagement des pneus ;
- La grosseur des grains de verre devrait être limitée à 10 mm ;
- Dans des conditions idéales, le Glasphalt coûtait environ 15 % plus cher que le mélange bitumineux conventionnel.

-Utilisation des résidus de verre dans la structure des chaussées : Plusieurs études et/ou projets ont été menés visant l'utilisation des débris 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.

En 1995, l'Université Technique du Texas a réalisé une étude sur l'utilisation des résidus de verre comme matériau de construction dans la structure et l'infrastructure des chaussées. Ce projet était mené conjointement par le département fédéral des transports et la commission de la préservation des ressources naturelles du Texas. Ces deux organismes désiraient trouver des projets dans lesquels l'utilisation des résidus de verre pourrait être testée, et ce, dans le but de diminuer les montagnes de déchets solides dans la municipalité.

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 [38] 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.

La comparaison des coûts de construction [38] entre les matériaux « mélangés » à base de résidus de verre et ceux composés de matériaux naturels démontra que les matériaux « mélangés » coûtent relativement plus cher que les matériaux naturels. Une partie de ces coûts a été attribuée aux conditions de traitements additionnels (tri et concassage) du verre et au procédé de mélange du verre et des granulats naturels.

À la lumière des conclusions de ce projet, la ville de Devine a bénéficié de 4000 pieds de route de bonne qualité et constituée d'une fondation en débris de verre. Ce projet démontra également que le débris de verre s'est avéré une excellente solution de rechange dans la construction et que l'on pourrait poursuivre l'utilisation des débris de verre dans le futur comme matériau de construction. Il n'a pas été nécessaire de prendre des précautions extraordinaires relativement à la conception et à la réalisation de ce projet. Celui-ci démontra que l'on pouvait aussi utiliser les débris de verre comme matériau de remblai.

Le potentiel de réduction des coûts réalisée par l'utilisation des résidus de verre provient surtout des économies reliées à leurs coûts de disposition.

Une autre étude menée en laboratoire à l'Université de l'Alaska [35] 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 %.

La susceptibilité au gel du verre brisé a été étudiée par [12]. Ses essais réalisés sur un verre brisé, contenant environ 1 % de passant au tamis de 80 microns, ont démontré que celui-ci affiche une susceptibilité au gel allant de négligeable à très faible. De l'ensemble des essais réalisés dans ce projet, on peut tirer les valeurs suivantes de certaines propriétés :

Densité : $D = 2,49$ à $2,52$

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

Masse volumique obtenue du Proctor modifié = 1780 à 1890 kg/m³

Angle de friction avec 100 % de verre brisé $\phi = 51,2^\circ$

CBR avec 50 % de pierre-concassé et 50 % de verre brisé = 42 à 115 %

Plusieurs projets ont été réalisés avec utilisation d'un pourcentage de verre concassé mélangé avec de la pierre concassée ou d'autres types de sols. Dans certains cas, le verre est mélangé au granulat pendant son concassage, alors que dans d'autres cas [34] il est mélangé sur le terrain en effectuant le malaxage à l'aide d'une niveleuse par formation d'andains après avoir épandu le verre sur le granulat [34].

Une dernière expérience forte intéressante a été réalisée en Idaho [42]. 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.

II.7.4. Propriétés physiques des débris de verre en géotechnique

L'université de Philadelphie [41] 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.

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 ci-dessous :

Tableau II.5 : Résultats des tests physiques effectués sur les débris de verre.

Test	Test standard	Échantillon N° 1		Échantillon N° 2	
		Sans modification	Après compaction	Sans modification	Après compaction
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 D50 (mm)		2.24	1.6	3	2.5
Coefficient d'uniformité Cu	-	6.2	6.5	7.2	7.8
% sable (0,075-4,75mm)	-	91.3	87	70	76
Particules fines (<0,075mm) (%)	-	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	-

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 [40] concluent 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 pourront servir à l'industrie de la construction et du génie civil qui sont les premiers intéressés par ces rebuts.

II.8.Conclusion

L'Algérie comme plusieurs pays en voie de développement croulent sous les déchets, particulièrement, les déchets plastiques ainsi que les déchets de verre. Malheureusement, ces milliers de tonnes de déchets issus des différentes activités industrielles sont souvent abandonnés et jetés dans des décharges inappropriées et anarchiques (sauvages). Ainsi, ils présentent des risques majeurs pour la santé publique (pollution de l'environnement). En effet, les dépôts sauvages entraînent une pollution visuelle, mais surtout une pollution des sols et des eaux souterraines (nappe phréatique) via l'infiltration de substances polluantes. Jusqu'à présent, peu de solutions fiables sont mises en avant sur le terrain, alors qu'il est vraiment nécessaire de traiter ces déchets et de préférence les valoriser et les réutiliser dans d'autres secteurs de construction, tels que le génie civil et particulièrement les travaux publics. Ceci permet d'une part de se débarrasser de ces déchets avec un minimum d'énergie (à moindre coût) et d'autre part de compenser le manque en granulats qui menace l'approvisionnement des projets.

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1.Introduction :

L'identification d'un sol est obtenue en effectuant un certain nombre d'essais, appelés «essais d'identification» qui nous permettent de classer et de calculer le divers paramètre de sol. Parmi ces essais nous citerons :

- 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 ;
- Analyse minéralogique.

Dans ce chapitre sont identifiés et présentés les différents matériaux utilisés.

III.2. Matériaux utilisés :

Dans le travail réalisé, Nous étudierons le comportement du mélange de granulats naturels (schiste) et matériaux industriels (déchets plastiques et débris de verre) sous plusieurs séries d'essais de laboratoire pour une éventuelle utilisation dans les corps des chaussées.



Figure III.1 : Matériaux utilisés les granulats de schiste, déchets plastique et débris de verre.

III.3. Les schistes

III.3.1. Définition des schistes

Le schiste est un terme utilisé pour désigner toute roche de composition diverse ayant acquis une schistosité sous l'action de contraintes tectoniques, se traduisant par un débit en feuillets d'épaisseur variable. Ce débit est dû soit à une fracturation (schistosité de fracture), soit à une orientation des minéraux de la roche occasionné par un métamorphisme (schistosité de flux). Les schistes peuvent être localement utilisés en couverture sous l'appellation d'ardoises ou de lauzes. Ils sont dénommés plus précisément en fonction de leur nature pétrographique : schistes lustrés, schistes ardoisiers, ardoises, micaschistes, calcschistes, etc. Cependant, toute

III.3.3. Les différents types de schiste

III.3.3.1. 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.

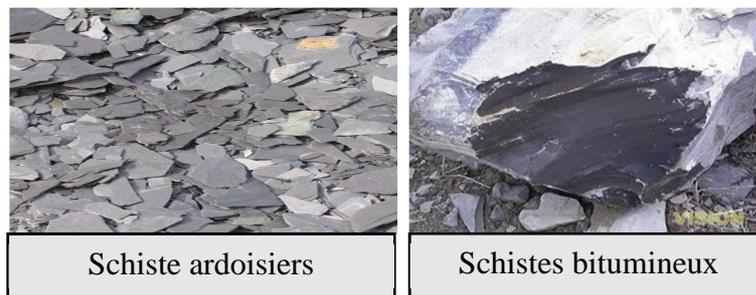


Figure III.3 : Schistes du métamorphisme général très faible [48].

III.3.3.2. 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 nacréées ou satinées dues à la présence de feuilletés de séricite.
- **Schistes talqueux** : Schistes contenant du talc, accompagné de micas et de quartz, formé lors du métamorphisme de roches ultrabasiques.
- **Schistes chloriteux** : Schiste du métamorphisme général de couleur verdâtre, riche en chlorite, contenant fréquemment des amphiboles vert pâle (trémolite, actinote) et de l'épidote.
- **Schistes lustrés** : Roches métamorphiques cristallines et foliées, composées principalement de calcschistes verts ou des schistes bleus.

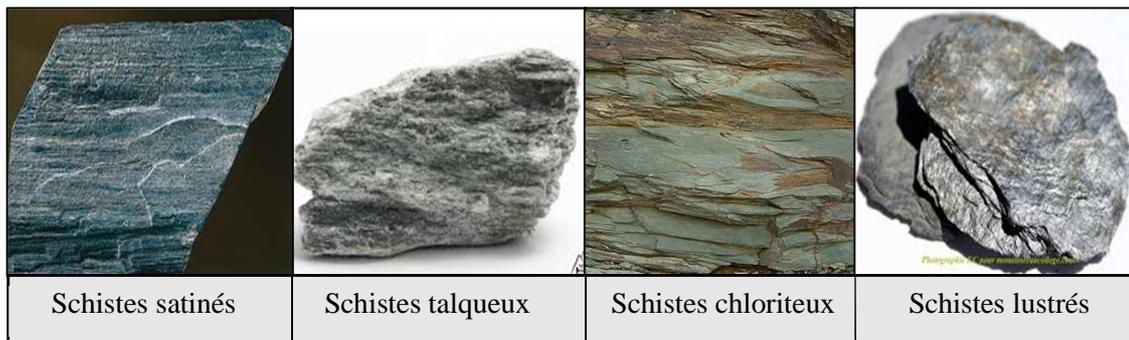


Figure III.4 : Schistes du métamorphisme général faible [48].

III.3.3.3. 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.

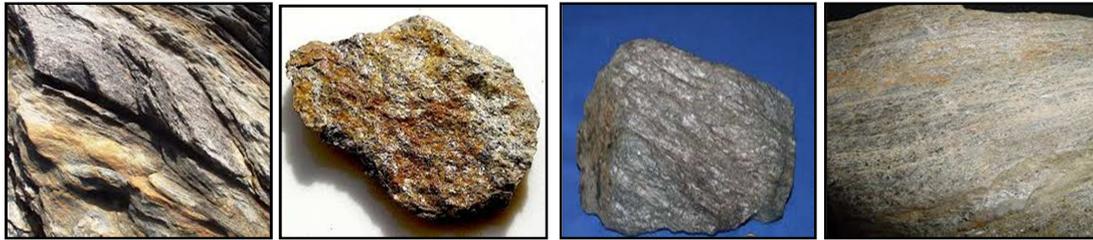


Figure III.5 : Quelques exemples des micaschistes.

III.3.3.4. 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 [20].



Figure III.6 : Schistes tachetés [48].

III.4. Schiste étudié :

Le schiste étudié est extrait au niveau de La commune de Sidi Naman située au nord-ouest de la wilaya de Tizi Ouzou, comme indiqué sur la carte si dessous :



Figure III.7 : vue aérienne (Google earth) du site indiqué.



Figure III.8 : Site d'extraction du matériau naturel (schiste).

III.4.1. Concassage et tamisage du schiste

Le schiste utilisé est ramené dans des sacs, au laboratoire pédagogique de mécanique des sols de l'université de mouloud Mammeri Tizi Ouzou, sous formes de blocs de différentes tailles. Ensuite séché et concassé selon la granulométrie désirée de telle sorte à former une courbe granulométrique de classe 0/20 mm, délimitée par un fuseau bien précis relatif aux corps de chaussée prescrit par la norme NF EN 13-285 [31].

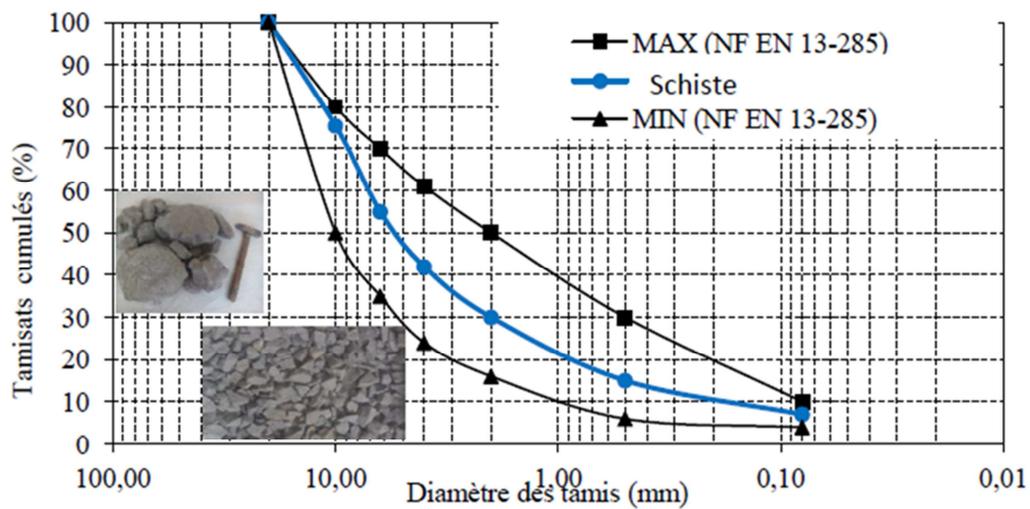


Figure III.9 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-285.



Figure III.10 : Granulats de schiste après concassage et tamisage.

III.5. Essais d'identification :

Après concassage des blocs. Une étude d'identification a été réalisée au laboratoire pour déterminer ses caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques.

III.5.1. Teneur en eau naturelle (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, [26] ; (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 : Détermination de la teneur en eau.

Matériau	W (%)
Matériau schiste	2.57

Teneur en eau moyenne $w = 2.57 \%$.

Les résultats présentés dans le tableau III.1, montrent que, la teneur en eau naturelle du schiste utilisé dans ce travail est 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.5.2. Les masses volumiques

III.5.2.1. La masse volumique sèche (ρ_d) par pesée hydrostatique

La masse volumique humide d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064 [29]. L'essai consiste à peser l'échantillon à l'air libre, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage, et enfin, repeser le tout plongé dans l'eau.



Figure III.11 : Mode opératoire.

On détermine alors la masse volumique par l'équation suivante :

$$\rho_d = \frac{Mr}{\frac{Mrp - M'rp}{\rho_w} - \frac{Mrp - Mr}{\rho_p}}$$

Avec :

Mr : Masse de la roche ;

Mrp : Masse de la roche paraffinée à l'air libre ;

M'rp : Masse de la roche paraffinée dans l'eau ;

pp : Masse volumique de la paraffine =0,88 g/cm³ ;

pw : Masse volumique de l'eau =1g/cm³.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.2 :

Tableau III.2 : Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.

Paramètre	Échantillons		
	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai
Masse de la roche (Mr)	236.3	156.5	114.9
Masse de la roche paraffinée à l'air libre (Mrp)	263.2	171.3	125.3
Masse de la roche paraffinée dans l'eau (M'rp)	121.2	78.1	60.5
Masse volumique sèche (ρ_d)	2.12	2.04	2.16
Moyenne	$\rho_d = 2.12 \text{ g/cm}^3$		

Le tableau ci-dessous qui présente la classification des matériaux selon la masse volumique sèche permet de classer le matériau utilisé.

Tableau III.3 : Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 – 1.8	moyenne
> 1.8	Dense

En se référant au tableau III.3, on constate que le schiste utilisé est un schiste dense.

II.5.2.2.La masse volumique humide ρ_h (NF P 94-053) [30]

La masse volumique humide est calculée selon la loi suivante :

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

Avec :

W : Teneur en eau du matériau ;

ρ_d : Masse volumique sèche.

L'application numérique donne : $\rho_h = 2.12 \times (1 + 0.0257)$

$$\rho_h = 2.17 \text{ g/cm}^3$$

III.5.2.3. 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 [28]; 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.



Figure III.12 : Exécution de l'essai.

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

$$\rho_s = \frac{\rho_w(M_2 - M_1)}{(M_4 - M_1 + M_2 - M_3)}$$

Les résultats obtenus pour l'essai réalisé sont présentés dans le tableau III.4 :

Tableau III.4 : Résultats de la masse volumique des particules solides.

Paramètre	valeur
Masse du pycnomètre vide + bouchon (M_1)	206 g
Masse du pycnomètre + particule solide + bouchon(M_2)	256 g
Masse du pycnomètre + particule solide + eau + bouchon(M_3)	798.7 g
Masse du pycnomètres + eau + bouchon(M_4)	778.3 g
Masse volumique de l'eau (ρ_w)	1 g/cm ³
Masse volumique des particules solides (ρ_s)	2.68 g/cm ³

III.5.3. Indice des vides, degré de saturation et porosité

- **Indice des vides (e)**

L'indice des vides est un indicateur caractérisant un sol car il définit la proportion de vide contenue dans celui-ci, il est égal au rapport du volume des vides au volume des grains solides comme le décrit l'équation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (\text{L'indice des vides peut être supérieur à 1}).$$

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

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

L'application numérique donne : $e = \frac{2.68}{2.12} - 1$

Après calcul on obtient un indice des vides égal à 0.26

- **Degré de saturation Sr**

Le degré de saturation définit le volume d'eau contenue dans un échantillon de sol, il est égal au rapport du volume de l'eau au volume des vides d'un sol. Il s'exprime en pourcentage. Le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100% (sol saturé). Il peut aussi être défini par la formule suivante :

$$Sr = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \cdot \left(\frac{w}{e}\right)$$

Avec

w : Teneur en eau ;

e : indice des vides ;

ρ_s : Masse volumique sèche ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau.

Après calcul on obtient : $Sr=26.49\%$

Tableau III.5 : Détermination du degré de saturation. (D'après TERZAGHI).

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

D'après le tableau III.5 le schiste étudié est donc dans un état légèrement humide.

- **Porosité n**

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

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

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

$$n = \frac{e}{(e + 1)}$$

Ce qui nous donne une porosité de 20.63%

Les résultats des essais d'identification sont résumés dans le tableau III.6

Tableau III.6 : Résumés des résultats précédents.

Caractéristique déterminées	Moyenne
Teneur en eau naturelle : w (%)	2.57
La masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)	2.12
La masse volumique humide ρ_h (g/cm ³)	2.17
La masse volumique des particules solide ρ_s (g/cm ³)	2.68
Indice des vides (e)	0.26
Degré de saturation S_r (%)	26.49
Porosité n (%)	20.63

A partir de ces résultats nous constatons que le schiste étudié est un schiste dense d'une teneur en eau, un degré de saturation, et un indice des vides faibles.

III.5.4.Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051)

III.5.4.1. Définition

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau correspondant à des états hydriques bien définis d'un matériau. Quand la quantité d'eau d'un sol varie, la consistance de ce sol peut varier dans des limites parfois importantes.

Selon son contenu en eau, le sol pourra être mou, boueux, souple, pâteux ou dur. Par convention trois états de sol sont définis :

- Etat liquide : est caractérisé par une consistance très faible, il tend à s'écouler et à se niveler suivant l'horizontale. Les grains sont indépendants les uns des autres, il a donc l'aspect d'un fluide.
- Etat plastique : Le sol à une consistance plus importante il ne tend plus à se niveler, mais lorsqu'il est soumis à un chargement faible il se déforme sans se rompre, les grains se rapprochent et mettent en commun leurs couches adsorbées.
- Etat solide :
 - Etat solide avec retrait : Lors d'un état solide avec retrait la déformabilité d'un sol est beaucoup plus faible, conséquence de la perte d'une partie de son eau interstitielle.
 - Etat solide sans retrait : La déformabilité du sol diminue encore et il ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue, les grains sont encore plus près les uns des autres et arrivent au contact en quelques points.

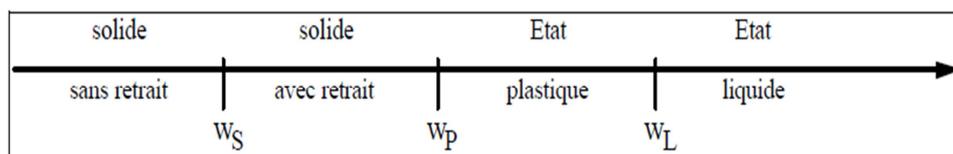


Figure III.13 : Les différents états du sol.

Les limites d'Atterberg sont :

- Limite de liquidité **WL** : teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique. La relation qui permet de trouver la limite de liquidité est :

$$W_L = \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

W : teneur en eau au moment de l'essai donnant N coups

- Limite de plasticité **Wp** : c'est la teneur en eau d'un sol caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide (sol durcit).
- Limites de retrait **Ws** : Le passage à l'état solide d'un sol s'effectue au départ avec réduction du volume ou retrait, puis à volume constant donc sans retrait.

À partir des limites de plasticité et de liquidité, on détermine 2 paramètres :

- Indice de plasticité **Ip** : cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité

$$I_p = W_L - W_p$$

- Indice de consistance **Ic** : cet indice prend en compte la teneur en eau W du sol pour la fraction inférieure à 400µm.

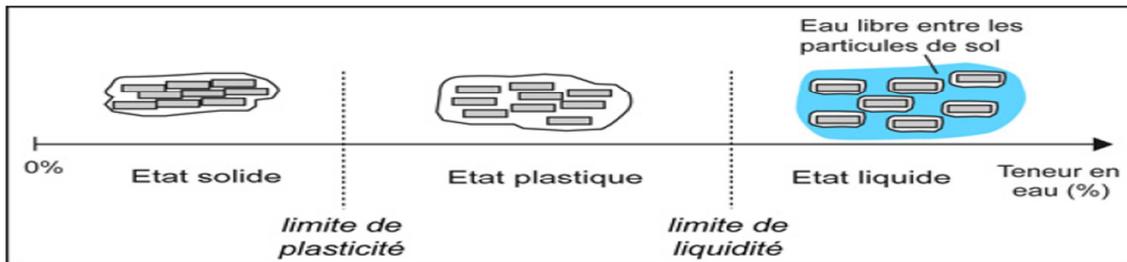


Figure III.14 : Différents états de consistances d'un sol.

III.5.4.2. But de l'essai

L'essai a pour but la détermination des teneurs en eau caractérisant la limite de liquidité **WL** et la limite de plasticité **Wp**.

III.5.4.3. Appareillage d'usage courant

- Spatule, truelle et un marbre pour le malaxage du mortier ;
- Une pissette ;
- Une balance de précision de préférence automatique ;
- Une étuve avec thermostat permettant de la régler à 105 C° ;
- Un tamis d'ouverture 400µm.



Figure III.15 : appareillage d'usage courant

III.5.4.4. Détermination de la limite de liquidité WL

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans lequel on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. On imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte.



Figure III.16 : Détermination de la limite de liquidité.

Les résultats obtenus sur l'échantillon étudié sont présentés dans le tableau III.7 :

Tableau III.7 : Détermination de la limite de liquidité.

N° de l'essai	1	2	3	4
Nombre de coups	19	24	30	33
Teneur en eau (%)	24.23	22.51	20.27	16.07
limite de liquidité (W_L)	23.43	22.39	20.72	17.18
Moyenne	20.93			

III.5.4.5. Détermination de la limite de plasticité W_p

III.5.4.5.1. Définition

La limite de plasticité W_p est la teneur en eau au-dessus de laquelle le sol perd sa plasticité devient friable. Elle se définit par la possibilité de former sous le doigt un rouleau de 3mm de diamètre qui se fissure et se brise quand on le soulève de 1 à 2cm par le milieu.

On exécute 2 essais pour déterminer cette limite. Cette opération se schématise comme suit :

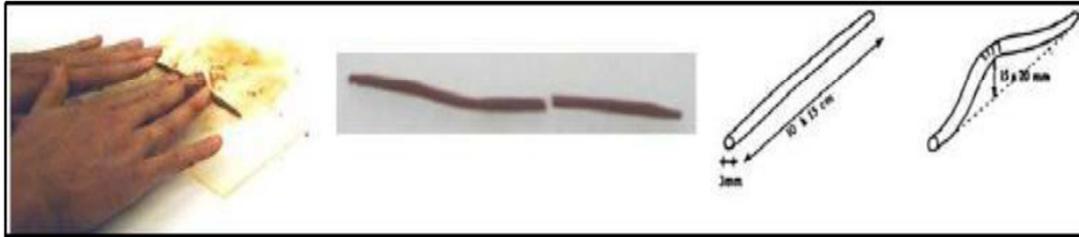


Figure III.17 : Etape de la limite de plasticité.

Limite de plasticité WP = 15.53 %

III.5.4.5.2.L'indice de plasticité Ip

C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, qui définit l'étendu du domaine plastique d'un sol :

$$I_p = W_L - W_p$$

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol.

Tableau III.8 : Classification selon l'indice de plasticité.

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique
$5 < I_p < 30$	Sol peu plastique
$30 < I_p < 50$	Sol plastique
$50 < I_p$	Sol très plastique

On présente ci-dessous le tableau (III.9) des résultats des limites d'Atterberg

Tableau III.9 : Résultats des limites d'Atterberg.

Caractéristiques physiques	Symboles	Valeurs (%)
Limite de liquidité	WL	20.93
Limite de plasticité	Wp	15.53
Indice de plasticité	Ip	6.14

D'après les résultats obtenus le schiste étudié est peu plastique.

III.6.Analyse minéralogique par diffraction des rayons X

La cristallographie aux rayons X ou diffractométrie de rayons X est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X par la matière, particulièrement quand celle-ci est cristalline. La diffraction des rayons X est une diffusion élastique, c'est-à-dire sans perte d'énergie des photons (longueurs d'onde inchangées), qui donne lieu à des interférences d'autant plus marquées que la matière est ordonnée. Pour les matériaux non cristallins, on parle plutôt de diffusion.

Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui, rencontrant un cristal, est renvoyé dans des directions spécifiques déterminées par la longueur d'onde des rayons X et par les dimensions et l'orientation du réseau cristallin. Par la mesure des angles et de l'intensité des rayons diffractés, il est possible d'obtenir les dimensions de la maille cristalline, les symétries de la structure cristalline (groupe d'espace) et une image tridimensionnelle de la densité électronique dans la maille. À partir de cette densité, la position moyenne des atomes du cristal formant le motif cristallin peut être déterminée ainsi que la nature de ces atomes (dans une certaine mesure), leurs liaisons chimiques, leur agitation thermique et d'autres informations structurales.

On prépare l'échantillon sous la forme d'une poudre aplaniée dans une coupelle, ou bien sous la forme d'une plaquette solide plate. On envoie des rayons X sur cet échantillon, et un détecteur fait le tour de l'échantillon pour mesurer l'intensité des rayons X selon la direction.

L'appareil de mesure s'appelle chambre de diffraction quand il est photographique et diffractomètre quand il comporte un système de comptage des photons (détecteur ou compteur). Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme.



Figure III.18 : La prise de l'échantillon



Figure III.19 : Un diffractomètre.

Le résultat du diffractogramme sont présentés sur la figure III.24 et sont consignés dans tableau III.10.

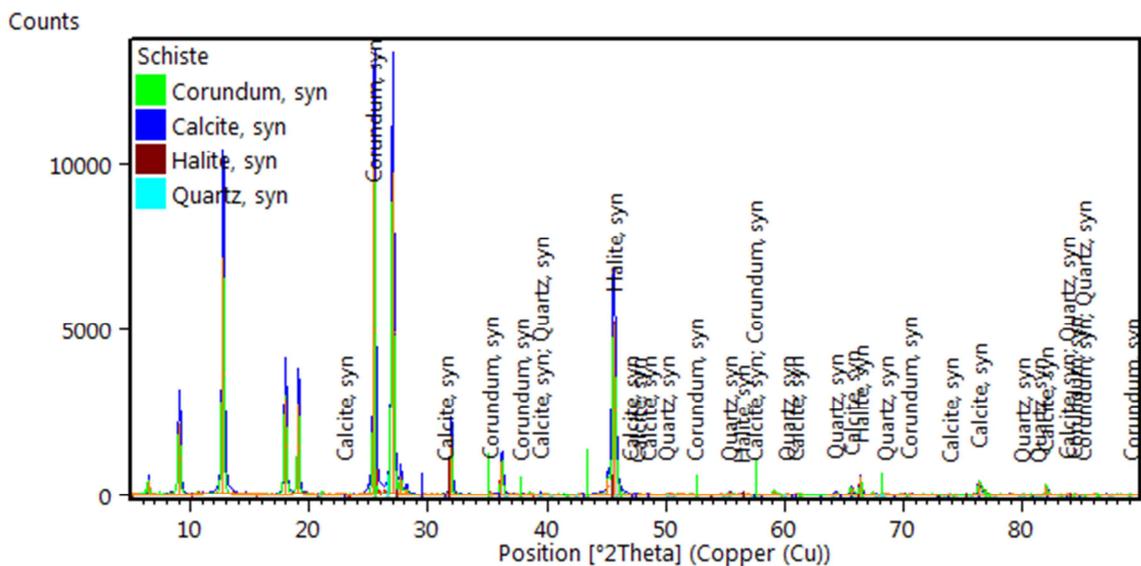


Figure III.20 : Diffractogramme du schiste étudié.

Tableau III.10 : Résultat du diffractogramme pour le schiste.

Eléments	Corindon (Aluminium Oxyde Al_2O_3)	Calcite (Calcium Carbonate $CaCO_3$)	Halite (Sodium Chlorite $Na Cl$)	Quartz (Silicone Oxyde SiO_2)
Quantités %	65	16	12	7

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction des rayons x (RX) sur l'échantillon de schiste montre le caractère prédominant du corindon (traces des métaux) et la présence de calcite, de halite et aussi une faible proportion de quartz.

L'existence de halite (12%) peu présenter une certaine sensibilité à l'eau. Cependant, sa présence en faibles proportions, ne peut influencer fortement le comportement mécanique du matériau.

Puisque le corindon est un minéral accessoire dans les schistes à mica [33], a le pourcentage le plus élevé alors le schiste étudié est un micaschiste.

III.7. Débris de verre

Nous avons choisi de travailler avec un verre propre pour réduire toute interaction pouvant parasiter cette investigation. C'est ainsi que le verre collecté, préalablement débarrassé de tous ses contaminants : métal, plastique, papier et autre..., le matériau sec a été broyé jusqu'à l'obtention de la classe granulométrique désirée.

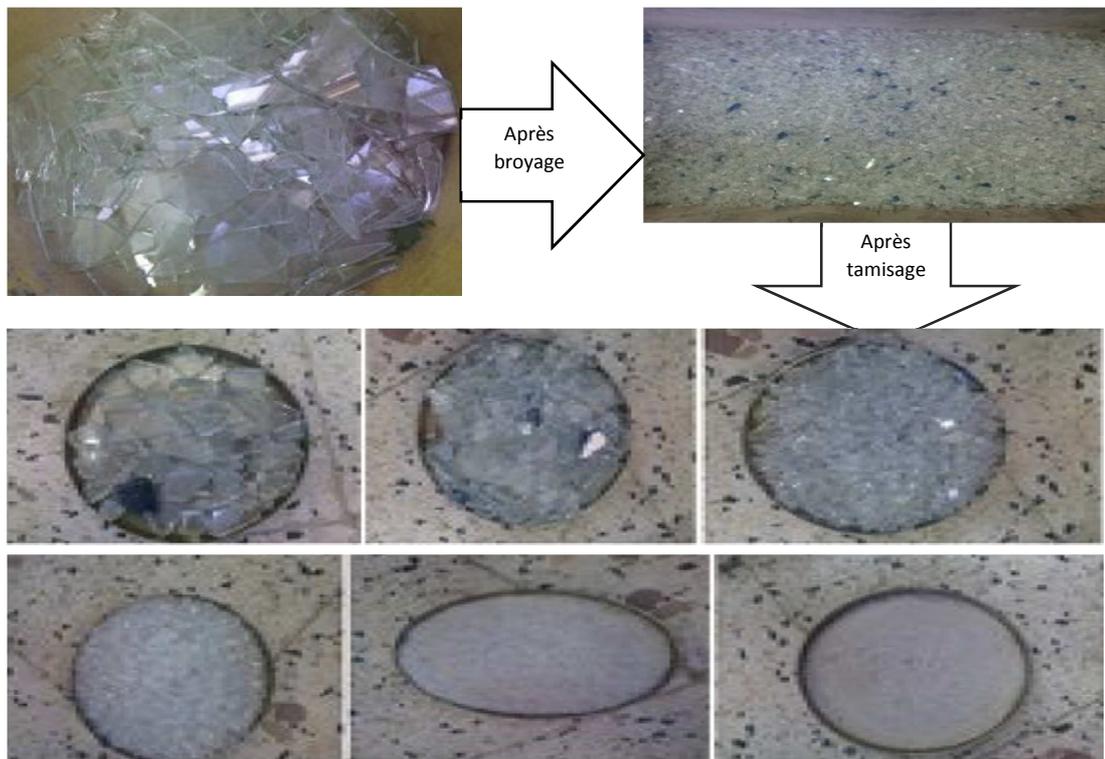


Figure III.21 : Débris verre broyé et tamisé.

III.7.1. Quelque propriété de verre

Les principales propriétés du verre concassé relevées dans la littérature sont résumées ci-dessous [12] :

- Densité = 2,49 à 2,52 g/cm³
- Masse volumique sèche obtenue au Proctor standard = 1590 à 1720 kg/m³
- Masse volumique sèche obtenue au Proctor modifié = 1750 à 1890 kg/m³
- Angle de friction ϕ avec 100 % de verre brisé = 51,2°
- Pourcentage passant au tamis de 80 microns = 1 à 3 %
- CBR avec 50 % de pierre-concassé et 50 % de verre brisé = 42 à 115 %
- Perméabilité = 1 à 6 x 10⁻⁴ cm/sec ; donc très perméable par rapport aux granulats conventionnels utilisés dans les chaussées.

III.8. Déchets plastique

Les déchets plastiques utilisés proviennent d'une usine de recyclage situé dans la Daïra de Tizi Ouzou, Ces déchets plastiques ont été collectés au niveau du territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou, et se constituent d'un mélange de PET, PEHD, PVC, PS et PEBD broyés à l'état brut.



Figure III.22 : Déchets plastiques broyés.

III.8.1. Quelque propriété de plastique

Tableau III.11 : Récapitulatif de la composition et utilisation des différents types de plastiques (L'industrie plastique, 1988).

Type de plastique	Composition chimique	Utilisation
PEHD	polyéthylènes à hautes densités	flacons, les emballages semi-rigides...
PVC	polychlorures de vinyle	canalisations (tubes), revêtement de sol, bouteilles de détergents
PS	polystyrène	l'isolation pour bâtiment, gobelets jetables, stylos...
PEBD	polyéthylène basse densité	bâches, sacs poubelles....

Tableau III.12 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères [10].

Type	Légèreté	Dureté	Résistance aux chocs	Résistance au froid	Résistance à la chaleur	Densité
PEHD	Très bon	Médiocre à assez bon	Très bonne	bon	Assez bon	0.95
PEBD	Très bon	Faible à médiocre	Médiocre à très bon	Bon	Médiocre	0.92
PVC	Assez bon	Assez bon	Faible à très bon	Médiocre	Faible	1.38
PS	Bon	Assez bon à bon	Médiocre	Bon	Assez bon	1.05

III.9.Préparation des échantillons

Les échantillons soumis aux essais mécaniques, ont été préparés selon les proportions en schiste et en mélange de déchets plastique et débris de verre :

- Echantillon 1 : Schiste seul ;
- Echantillon 2 : Mélange de schiste + 5% de déchets plastique et débris de verre ;
- Echantillon 3 : Mélange de schiste + 10% de déchets plastique et débris de verre ;
- Echantillon 4 : Mélange de schiste + 15% de déchets plastique et débris de verre ;
- Echantillon 5 : Mélange de schiste + 20% de déchets plastique et débris de verre.

III.10. 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 nous permettrons de mettre en évidence le comportement mécanique des matériaux utilisés sous les différents types de sollicitations auxquelles ils seront soumis.

Le prochain chapitre comportera la première série d'essais mécaniques à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié ainsi que les essais CBR avant et après immersion.

CHAPITRE IV

COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES

IV.1. Introduction

Le compactage des sols est une technique utilisée en génie civil visant à améliorer les caractéristiques mécaniques et hydrauliques d'un sol en vue de la réalisation de différents ouvrages (chaussées ; remblais, digues de barrages, briques en terre...). Les techniques adoptées sont très variées et diffèrent selon le lieu d'utilisation (chantier ou laboratoire), le type de sol et le but recherché.

Dans les travaux de construction des routes, le compactage du sol support, de la plateforme et des différentes couches du corps de chaussée permet une plus grande durabilité des routes.

En effet, un mauvais compactage des différentes couches du corps de chaussée peut être la cause des phénomènes de dégradation. Cette situation doit nous amener à porter une plus grande attention au compactage surtout du sol support dans les travaux de construction des routes. Un bon compactage réduit les vides des matériaux.

Dans ce chapitre, sont présentés principalement les résultats des essais de compactage et des essais CBR avant et après immersion.

Essais de compactage

IV.2. Définition du compactage

Compacter un matériau, c'est réduire le volume des vides de ce matériau et réorganiser la structure des grains de manière à obtenir un assemblage plus stable. Cette opération qui s'appelle le compactage peut être obtenue par des sollicitations statiques (compactage statique), dynamiques (compactage dynamique), ou par vibrations (compactage in situ). L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation [7]

En général, après le compactage, le sol acquiert :

- 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.

IV.2.1. Objectif du compactage

L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation [7].

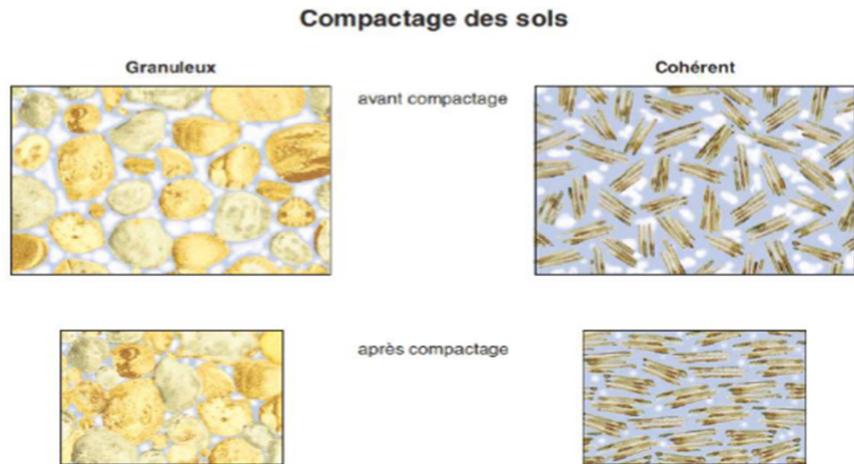


Figure IV.1 : Compactage des sols [43].

IV.3. Les facteurs qui influencent le compactage

L'influence de la teneur en eau, l'énergie de compactage et de la nature du matériau sur le résultat d'un compactage a été étudiée dès 1933 par l'ingénieur américain Proctor, qui a mis au point l'essai de compactage qui porte son nom.

IV.3.1. L'influence de 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. Plusieurs auteurs montrent que la densité sèche après compactage augmente avec la charge de la roue et la pression de gonflage. Les auteurs Martinez (1980) et Gaye (1995) remarquent 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 nul (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).

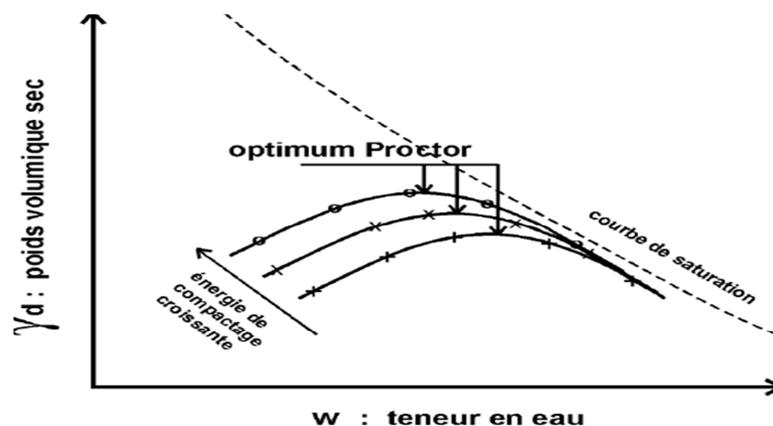


Figure IV.2 : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor.

IV.3.2. L'influence de la teneur en eau

Pour une énergie de compactage donnée, on peut tracer les variations du poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau W . la courbe obtenue appelée courbe de compactage ou diagramme de Proctor est une courbe en cloche qui représente un point haut que l'on appelle l'optimum Proctor. Cette valeur correspond à la densité maximale ainsi qu'à la teneur en eau optimum nécessaire.

Si le sol est sec, plusieurs frottements apparaissent lors de l'opération. Inversement, si le sol est trop humide, une partie importante de l'énergie est absorbée par l'eau connue pour son incompressibilité, et donc sera mal répartie entre les grains.

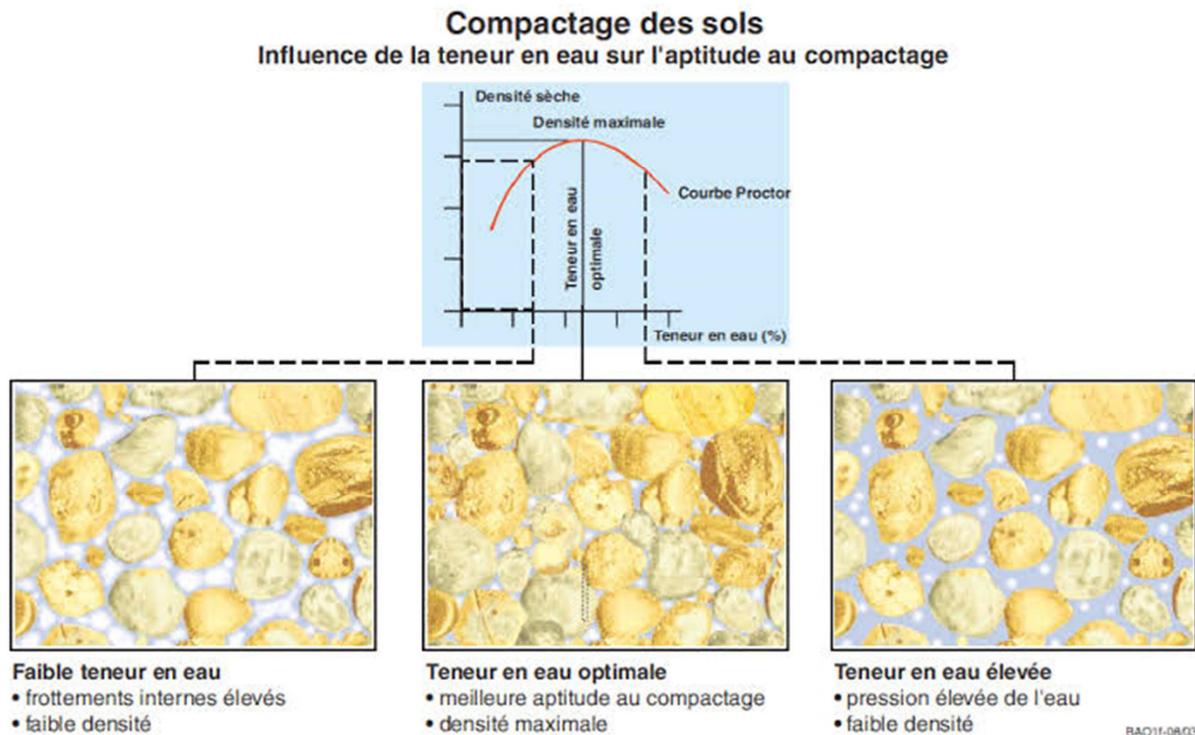


Figure IV.3. Influence de la teneur en eau sur le compactage [43].

IV.3.3. L'influence de la nature du sol

Un sol dont le compactage sera fortement influencé par la teneur en eau présentera une courbe de compactage avec un maximum très marqué. A l'inverse, un sol dont la teneur en eau influence peu le compactage sera caractérisé par une courbe de compactage très plate. Les sols de ce type font généralement les meilleurs remblais. La figure suivante donne quelques exemples des allures que peuvent présenter les courbes de compactage des sols courants.

D'après la courbe ci-dessous on voit que les sables sont très peu sensibles à l'eau en ce qui concerne le compactage, tandis que s'ils contiennent une fraction argileuse, leur courbe s'infléchit de manière importante. On voit en effet, la courbe du compactage se déplacer vers le haut et la gauche du diagramme à mesure que le nombre de coups augmente.

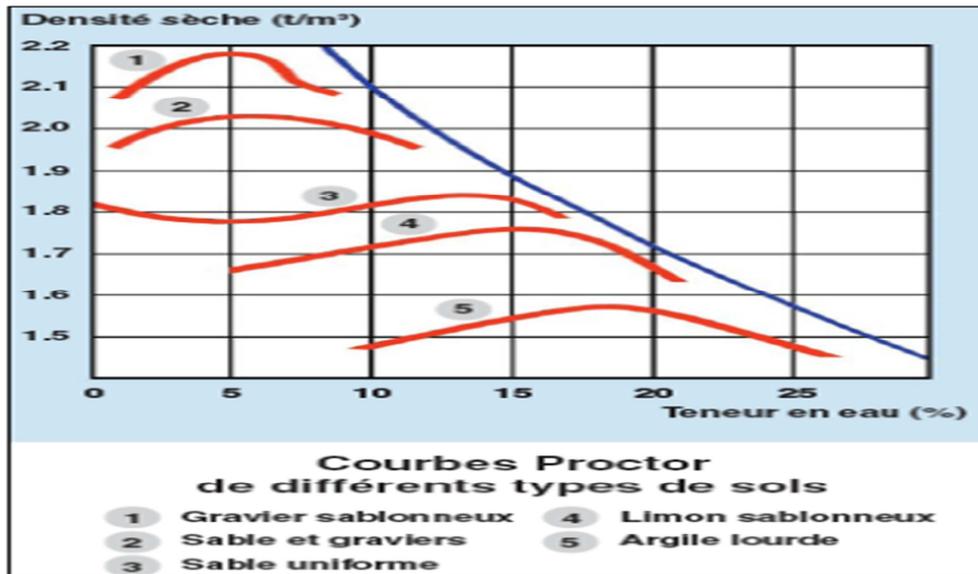


Figure IV.4. Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor [43].

IV.4. Les essais de compactages en laboratoire

Les essais de compactage effectués en laboratoire permettent de déterminer la masse volumique sèche maximale pour une énergie de compactage donnée. En comparant la valeur obtenue en laboratoire avec la masse volumique du sol sec mesurée sur le chantier après les opérations de compactage, on peut vérifier si celui-ci a été suffisant et ainsi s'assurer de la qualité des travaux [37].

Les principaux types d'essais de compactage en laboratoire pratiqués sont les suivants :

- Les essais Proctor.
- L'essai à la table vibrante.

IV.4.1. L'essai Proctor

Le principe de l'essai Proctor consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une énergie définie. Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la densité sèche du matériau, et on trace la courbe de la densité sèche en fonction de la teneur en eau (courbe Proctor).

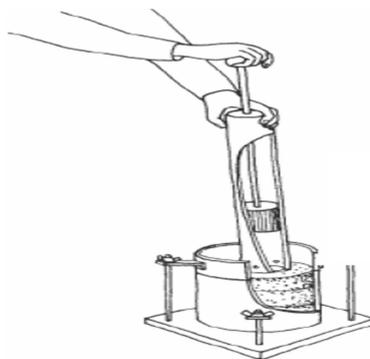


Figure IV.5. Essai de compactage.

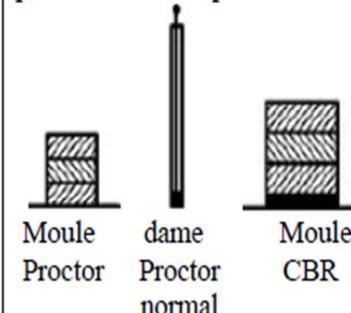
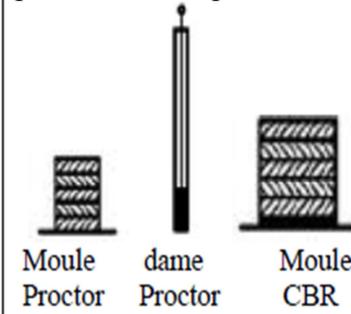
IV.4.1.1. Essai Proctor normal

L'énergie de compactage au niveau de cet essai est relativement faible et correspond à un compactage modéré. C'est un essai utilisé au niveau des sols de remblais tel que les barrages en terre, les digues ..., il est aussi utilisé dans le but de limiter les tassements ultérieurs au niveau des terrassements.

IV.4.1.2. Essai Proctor modifié

A l'inverse de l'essai Proctor normal, l'essai Proctor modifié à une énergie de compactage importante. C'est un essai utilisé pour des études de sol de fondations (routes, pistes d'aérodromes,...). On fait référence au Proctor modifié pour les couches de chaussées (pistes d'aérodrome). Cet essai vise une augmentation de la résistance mécanique de la couche. Le compactage obtenu par l'essai Proctor modifié correspond au compactage maximum que l'on peut obtenir sur les chantiers avec des engins de compactage puissants.

Tableau IV. 1 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié [21].

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2490 g	2490g	3 couches, à raison de : 25coups par couche 56coupes par couche  Moule Proctor dame Proctor normal Moule CBR
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4535 g	4535 g	5 couches, à raison de : 25coups par couche 56coupes par couche  Moule Proctor dame Proctor modifié Moule CBR
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

IV.5. L'essai Proctor modifié (PM)

IV.5.1. But de l'essai (NF P 94-093)

L'essai permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau. Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette. [21].

IV.5.2. Principe de l'essai

Cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau puis à le compacter dans un moule normalisé selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneurs en eau considérées, on déterminera la masse volumique sèche du matériau et on tracera la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé [21].

IV.5.3. Matériel utilisé

Pour cet essai nous aurons besoin :

- D'un moule Proctor ;
- D'une dame Proctor ;
- D'une règle à araser ;
- D'une balance ;
- D'une étuve ;
- D'une éprouvette graduée

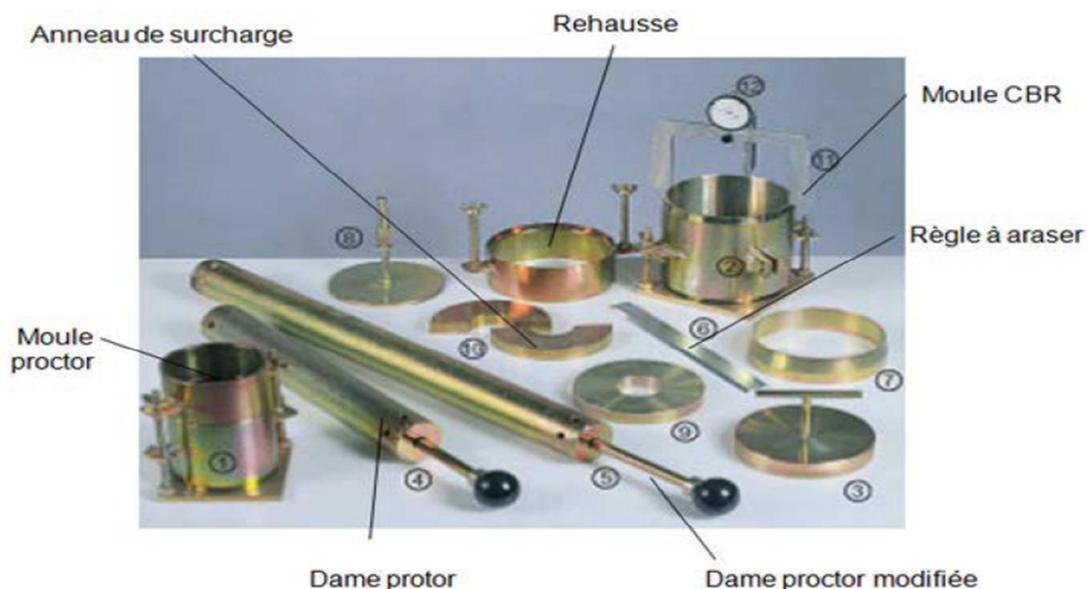


Figure IV.6 : Appareillage Proctor [52].

IV.5.4. Essais réalisés

Au niveau du laboratoire de notre faculté, nous avons réalisé une série d'essai Proctor modifié sur des échantillons de schiste avec différents pourcentages de déchets plastique et débris de verre à savoir :

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 05% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre.

IV.5.5. Expression des résultats

On portera chaque mesure de la densité sèche sur un graphe en fonction de la teneur en eau correspondante. Les résultats obtenus sont présentés au fur et à mesure sous forme de tableaux et de courbes :

- **Schiste seul**

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste seul.

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d / γ_w)
Echantillon N° 01	1,86	2,28
Echantillon N° 02	2,49	2,33
Echantillon N° 03	3,27	2,36
Echantillon N° 04	4,25	2,31

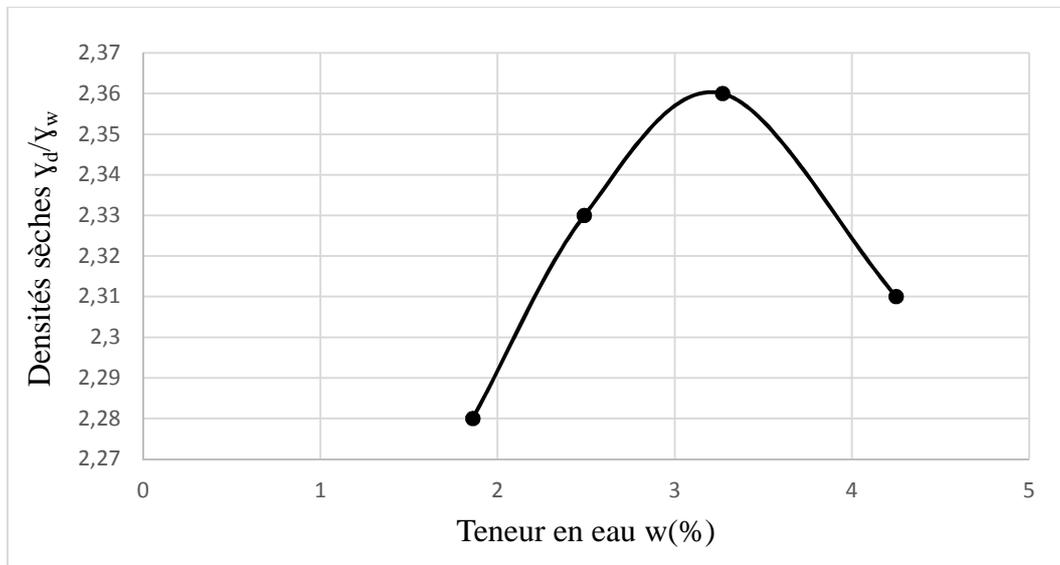


Figure IV.7. Courbe Proctor de schiste seul.

- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre.

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d / γ_w)
Echantillon N° 01	2,33	2,16
Echantillon N° 02	2,85	2,17
Echantillon N° 03	3,98	2,2
Echantillon N° 04	5,72	2,15

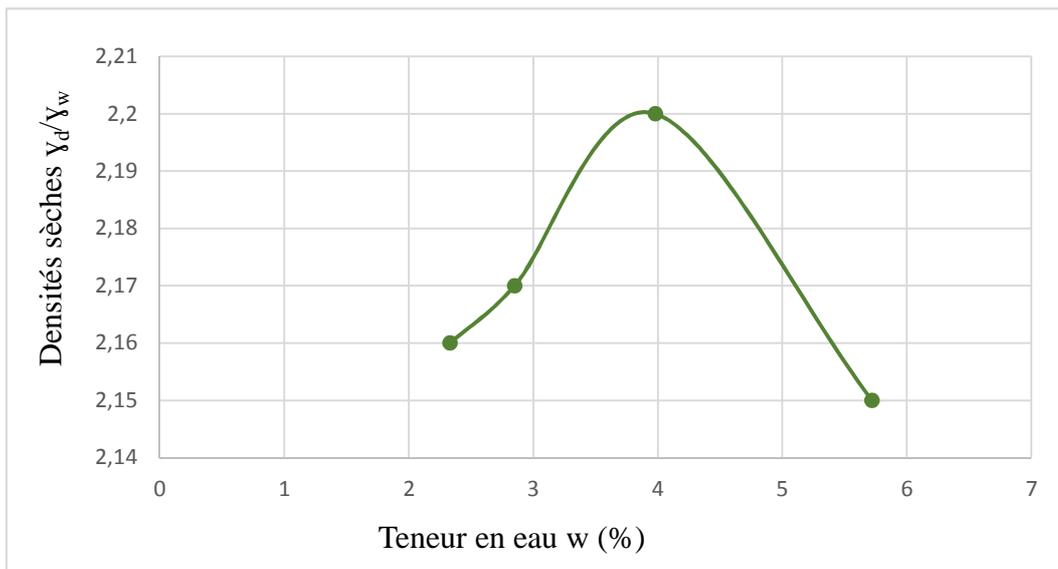


Figure IV.8. Courbe Proctor de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre.

- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 10 % de déchet plastique et débris de verre.

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d / γ_w)
Echantillon N° 01	3,11	2,1
Echantillon N° 02	4,56	2,17
Echantillon N° 03	5,22	2,15
Echantillon N° 04	6,31	2,13

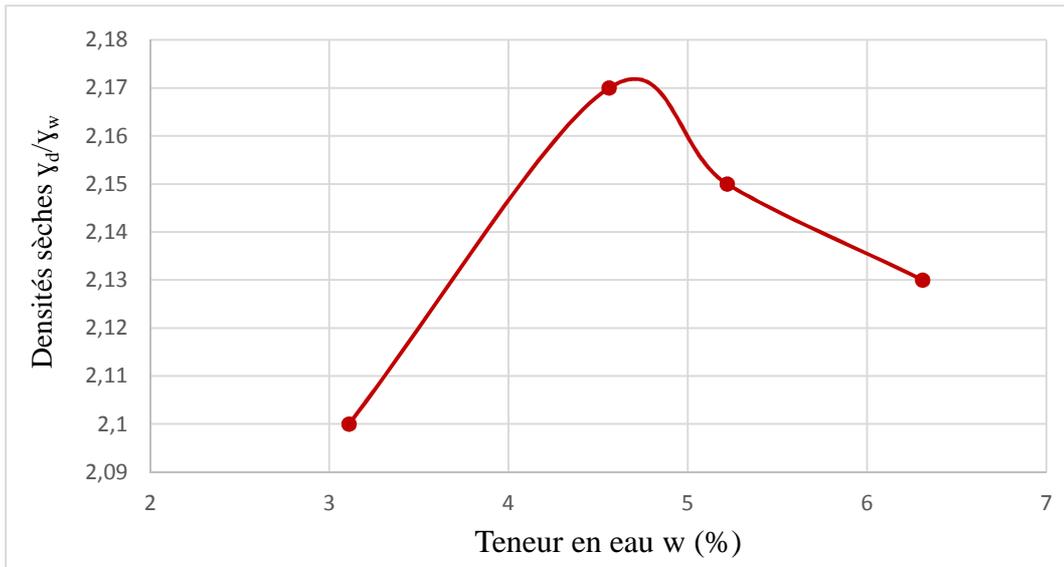


Figure IV.9. Courbe Proctor de schiste + 10 % de déchet plastique et débris de verre.

- **Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre**

Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 15 % de déchet plastique et débris de verre.

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d/γ_w)
Echantillon N° 01	3,16	2,01
Echantillon N° 02	4,04	2,02
Echantillon N° 03	5,12	2,08
Echantillon N° 04	6,71	2,03

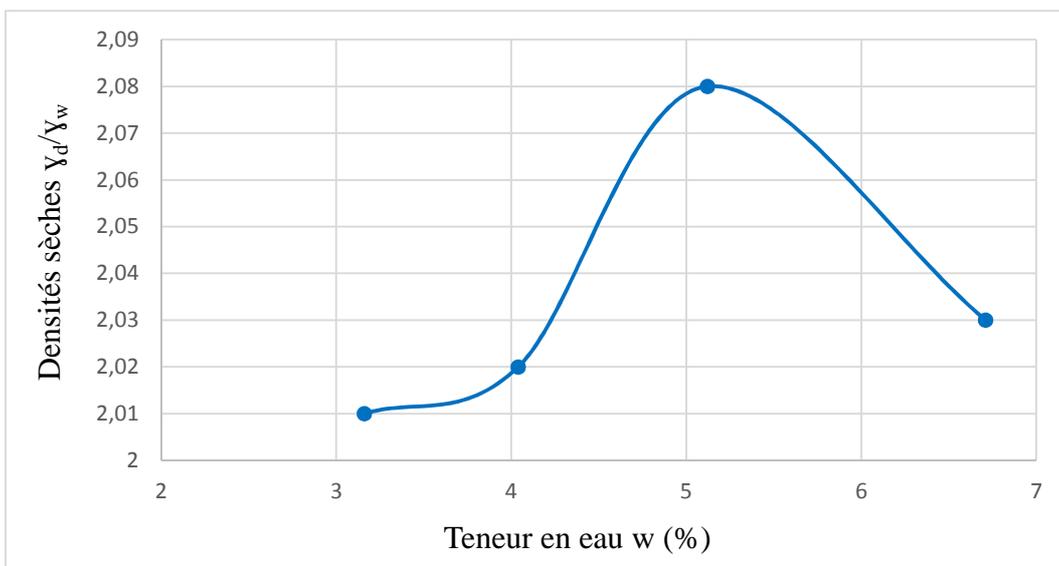


Figure IV.10. Courbe Proctor de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre.

- Mélange de schiste + 20 % de déchet plastique et débris de verre

Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 15 % de déchet plastique et débris de verre.

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d / γ_w)
Echantillon N° 01	4,5	1,48
Echantillon N° 02	5,72	1,87
Echantillon N° 03	6,47	1,89
Echantillon N° 04	7,47	1,89

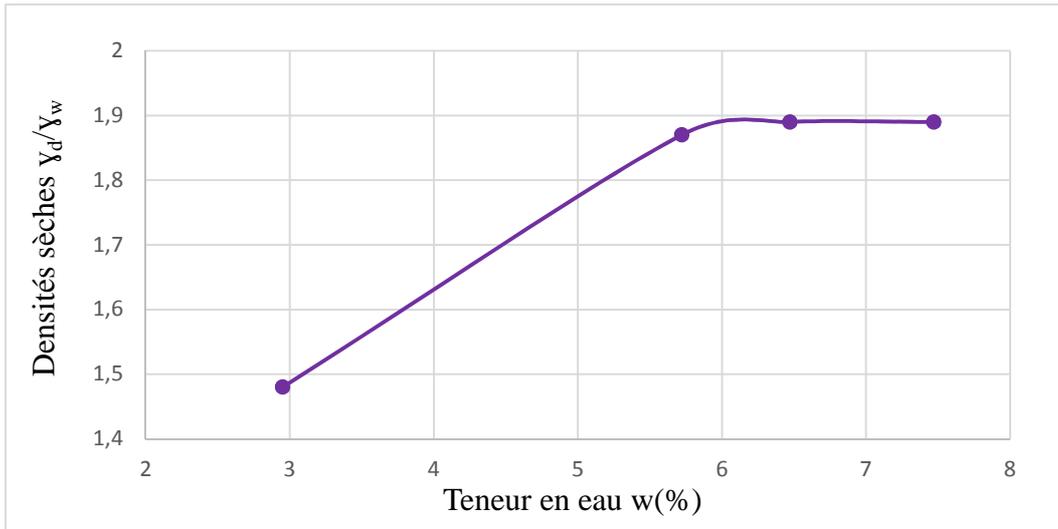


Figure IV.11. Courbe Proctor de schiste + 20 % de déchet plastique et débris de verre.

- Courbe comparative de tous les échantillons

Les courbes Proctor obtenues pour les différents mélanges sont regroupées sur la figure ci-dessous.

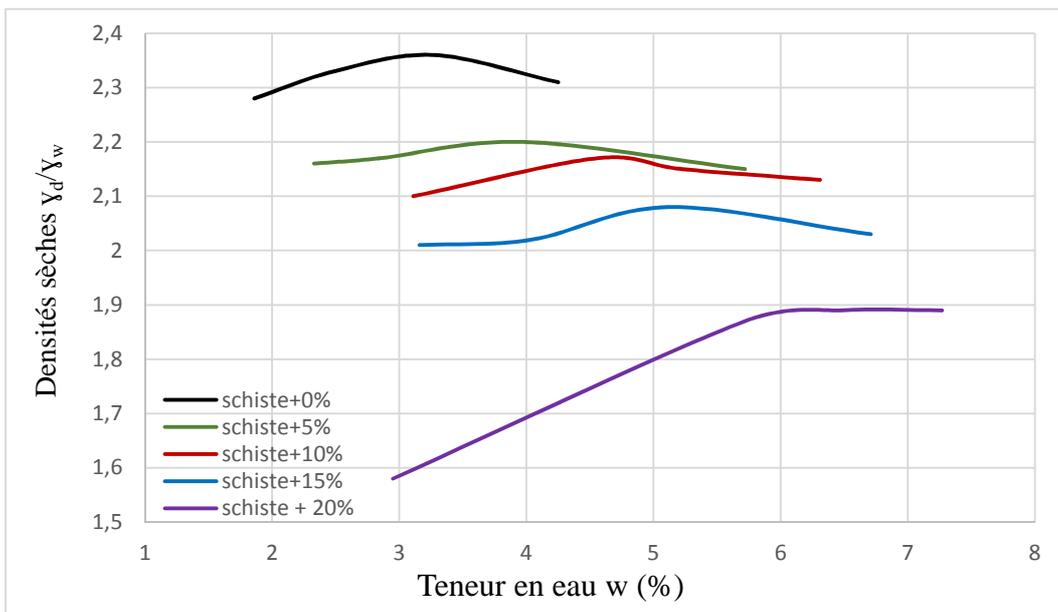


Figure IV.12 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

En se référant à la figure IV.12, nous constatons que les courbes Proctor obtenues montrent une allure en forme de cloche légèrement bombée, elles présentent généralement un pic plus ou moins apparent (en fonction de l'échelle choisie) permettant la détermination des caractéristiques optimales, à savoir : la teneur en eau optimale (w_{opt}) appelée "optimum Proctor" et la densité sèche maximale (γ_d / γ_w) qui lui correspond.

Cependant, il est à indiquer que les courbes Proctor des échantillons contenant des déchets de plastique et débris de verre sont moins bombées comparées à la courbe Proctor du schiste seul. Ceci, permet de conclure que l'ajout des déchets de plastique et débris de verre rend les échantillons moins sensibles à l'eau. En effet, ces déchets et débris sont des matériaux non absorbants à l'eau ainsi, plus leur quantité est importante dans l'échantillon, plus ce dernier devient moins influencé par l'eau.

Cependant, au-delà de 20% la courbe Proctor correspondante présente une allure particulière. Elle évolue linéairement à un certain point (environ 1,9 de densité), ensuite en pallier. Ceci, permet de dire que le compactage du mélange est perturbé par la présence des déchets en fortes quantités, toutefois, il atteint des densités au voisinage de 1,9.

Les teneurs en eau optimales ainsi que les densités sèches maximales obtenues sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Tableau IV.7 : Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.

Echantillons	Teneur en eau optimale w_{opt} (%)	Densité sèche maximale (γ_{dmax})
Schiste+ 0% de déchet plastique et débris de verre	3,2	2,36
Schiste+ 5% de déchet plastique et débris de verre	3,9	2,2
Schiste+10% de déchet plastique et débris de verre	4,7	2,17
Schiste+15% de déchet plastique et débris de verre	5,2	2,08
Schiste+20% de déchet plastique et débris de verre	5,9	1,9

- **Densités sèches maximales pour les mélanges de schiste + % de déchet plastique et débris de verre**

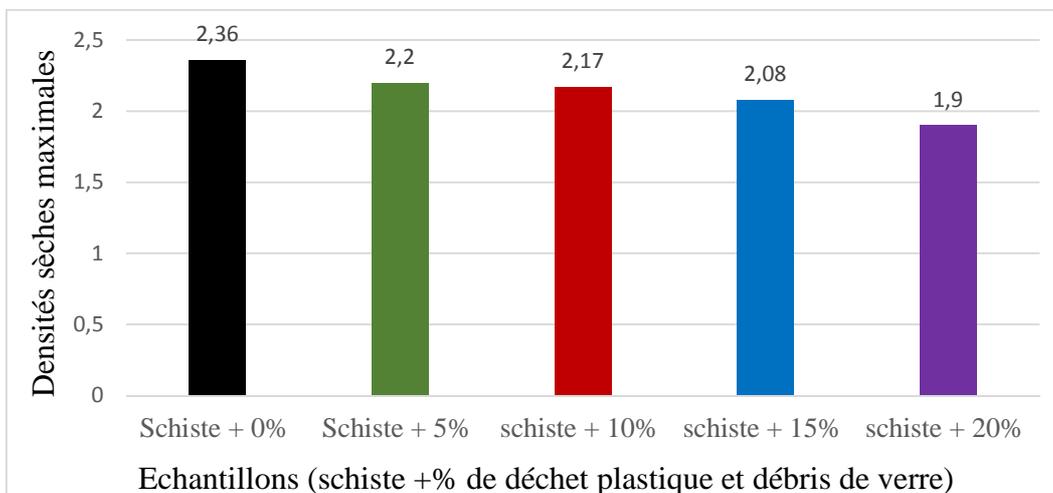


Figure IV.13 : Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de déchet plastique et débris de verre.

Le compactage des différents mélanges de schiste + déchet plastique et débris de verre montre des densités sèches qui diminuent de plus en plus avec l'augmentation d'ajout. Ceci peut être dû à la structure feuilleté (schisteuse) des granulats de schiste et des débris de verre et aussi de la forme plate des déchets plastiques.

Toutefois, ces densités sont supérieures à 2, ce qui vérifie amplement les valeurs de référence exigées par les normes en vigueur. Ces résultats permettent ainsi, de qualifier les mélanges étudiés du point de vue compactage comme matériaux acceptables et intéressants pour une utilisation dans les corps de chaussées à condition de ne pas dépasser les 15% d'ajouts.

- **Teneur en eau optimales pour les mélanges de schiste + % de déchet plastique et débris de verre**

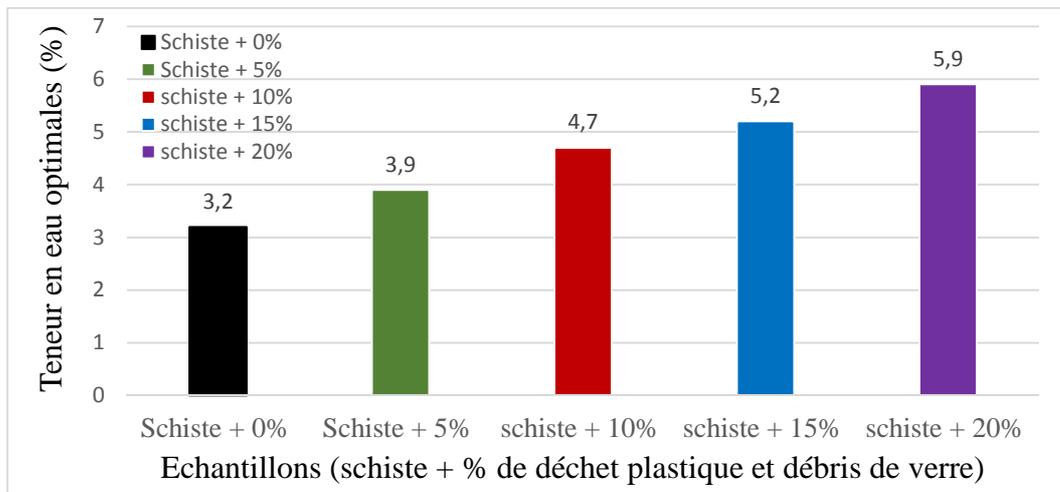


Figure IV.14 : Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de déchet plastique et débris de verre

D'après la figure IV.14, on remarque que les teneurs en eau optimales augmentent au fur et à mesure que le pourcentage d'ajout augmente. Comme il a été constaté précédemment, les mélanges deviennent moins denses avec l'ajout du plastique et de verre, ce qui se traduit par un accroissement de la proportion des vides dans la structure des échantillons. Ces vides sont généralement occupés par l'eau de compactage. Ce qui explique l'augmentation de la teneur en eau optimale avec l'augmentation de la proportion d'ajout.

En se basant sur l'ensemble des résultats obtenus aux essais Proctor, nous pouvons conclure que les mélanges étudiés ont présenté des caractéristiques intéressantes au compactage et peuvent être ainsi proposés pour une utilisation dans les couches inférieures de chaussées de faible à moyen trafic, Reste à étudier leur comportement sous d'autres types de sollicitations.

IV.6. Essais de portance CBR (California Bearing Ratio) NF P 94-078

IV.6.1.Définition

L'essai CBR est un essai qui caractérise la portance d'un sol du point de vue routier. Il s'agit d'un essai totalement empirique et qui n'est pas relié aux caractéristiques (c, ϕ) du matériau étudié. L'échantillon de sol étudié est compacté dans un moule (moule CBR de diamètre $\varnothing = 15.2$ et de hauteur $H = 15.2$ cm).

IV.6.2. But de l'essai

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges) des remblais et des couches de formes compactées des ouvrages routiers. Il s'agit de déterminer expérimentalement des indices portants (IPI, CBR) qui permettent :

- D'établir une classification des sols (GTR)
- D'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI)
- Déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente \Rightarrow épaisseur diminue).

IV.6.3. Principe de l'essai

L'essai consiste à poinçonner l'échantillon de matériau compacté par pénétration d'un poinçon cylindrique à vitesse constante (1.27mm/min). On relève les valeurs des forces correspondant à des enfoncements de 2.5 et 5 mm. On rapporte ces valeurs à celles obtenues sur un matériau de référence pour en déduire la valeur de l'indice portant recherché.

- **Les essais CBR permettent de déterminer 3 types indices :**

-L'indice portant immédiat : mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle ou dans la plage de teneurs en eau dans laquelle il est susceptible d'évoluer. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins en phase de réalisation du chantier. Le matériau est compacté à l'énergie Proctor normal dans le cas d'un sol et à l'énergie Proctor modifiée dans le cas d'un matériau d'assise de chaussée.

-L'indice C.B.R immédiat : mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté généralement à l'énergie Proctor modifiée à sa teneur en eau à l'optimum Proctor (Wopn). En sus, dans la mesure où le matériau est support ou constituant d'une structure de chaussée, l'éprouvette de sol testé sera surchargée en tête par des disques annulaires représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate-forme.

-L'indice C.B.R après immersion : Mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé pendant plusieurs jours (4 en général). Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté et/ou soumis à des variations de régime hydrique.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{I (2.5)} = \text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN) x } 100 / 13.5 \\ \mathbf{I (5)} = \text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN) x } 100 / 20 \end{array} \right.$$

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

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

Avec :

Δh : variation de hauteur mesurée (mm).

H : hauteur initiale de l'éprouvette, soit 116mm.

IV.6.4. Matériel utilisé

- Matériels de confection des éprouvettes
 - le moule CBR ;
 - les dames ou machine de compactage Proctor normal et modifié ;
 - l'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle araser) ;
 - le matériel d'usage courant (balance, étuve, bacs...).

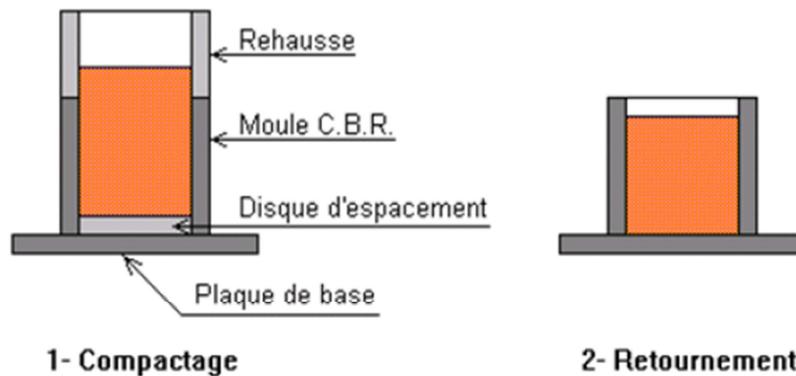


Figure IV.15 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

- 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.

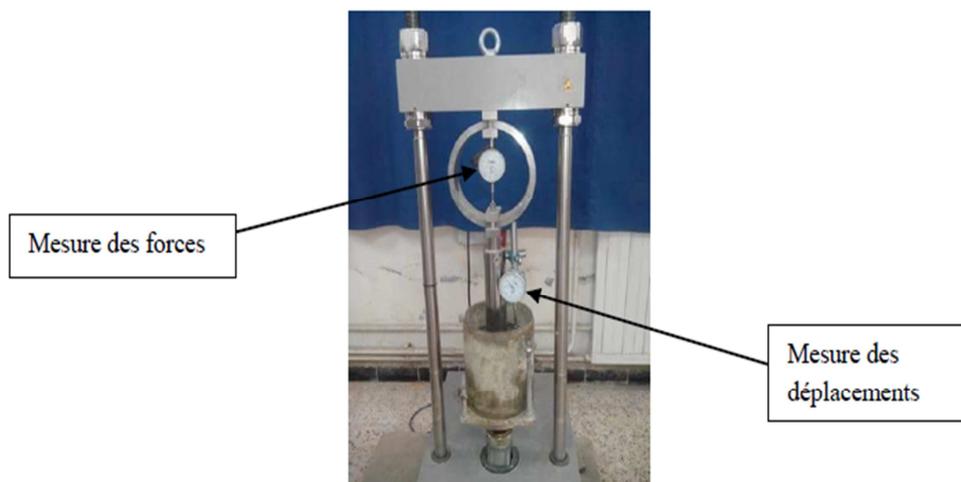


Figure IV.16 : Presse CBR.

IV.6.5. Mode opératoire

IV.6.5.1. Préparation des échantillons

Les échantillons à poinçonner sont compactés dans les conditions de l'optimum, à différentes teneurs en laitier. Une fois préparés, sont soumis au poinçonnement à la presse CBR.

IV.6.5.2. Détermination de l'indice CBR immédiat

Placer l'ensemble embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante :

- Mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;
- Initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;
- Exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à 1.27 mm/min ;
- Etablir la courbe effort-déformation correspondant, au moins, aux enfoncements de 1.25 mm ; 2 mm ; 2.5 mm ; 5 mm ; 7.5 mm ; 10 mm ;
- Déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon l'une des méthodes normalisées.

IV.6.5.3. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif)

- Positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment ;
- Mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement ;
- Immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur soit présente sous le moule ;
- Après quatre jours d'immersion, relever la valeur de gonflement total atteint ;
- Retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le poinçonnement comme indiqué précédemment.



Figure IV.17 : Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement.

IV.6.6. Expression des résultats

Une série d'essai CBR a été réalisée dans la présente étude sur des échantillons de schiste et de laitier, afin de déterminer les indices CBR immédiats et les indices CBR après immersion. Plusieurs échantillons ont été préparés, à savoir :

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre.

IV.6.6.1. Interprétation des résultats (CBR)

Tableau IV.8 : Résultats des essais CBR immédiat.

Echantillon	Gonflement relatif G	Indice CBR Immédiat (CBR _{imd})		
		I (2.5)	I(5)	CBR _{imd}
Schiste+ 0% de déchet plastique et débris de verre	0	57,49	69,93	69,93
Schiste+ 5% de déchet plastique et débris de verre	0	64,55	72,13	72,13
Schiste+10% de déchet plastique et débris de verre	0	58,97	79,05	79,05
Schiste+15% de déchet plastique et débris de verre	0	27,48	41,44	41,44

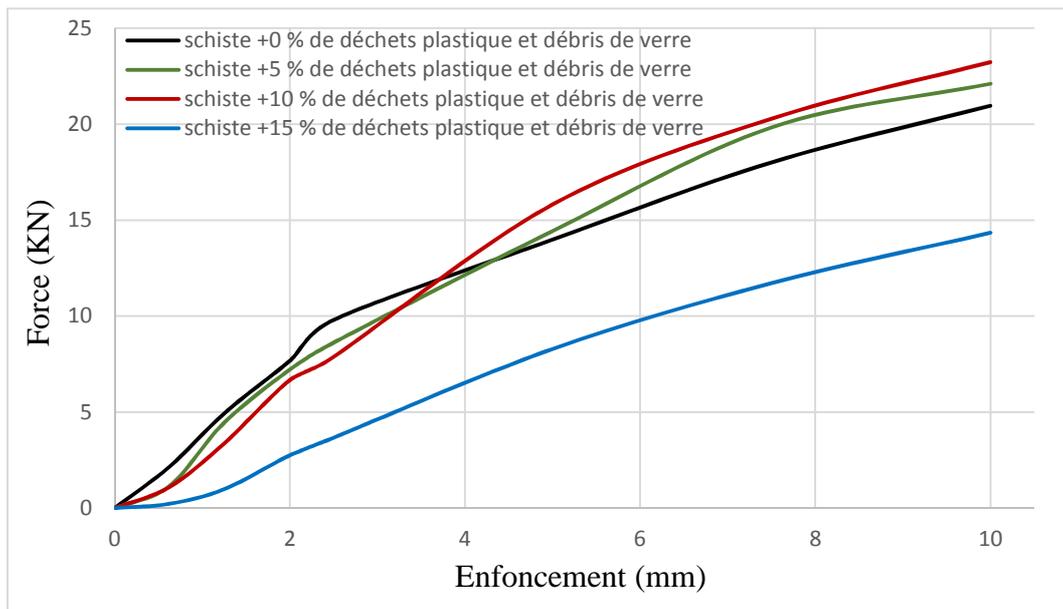


Figure IV.18 : Courbes enfoncements-forces (cas des CBR_{imd}).

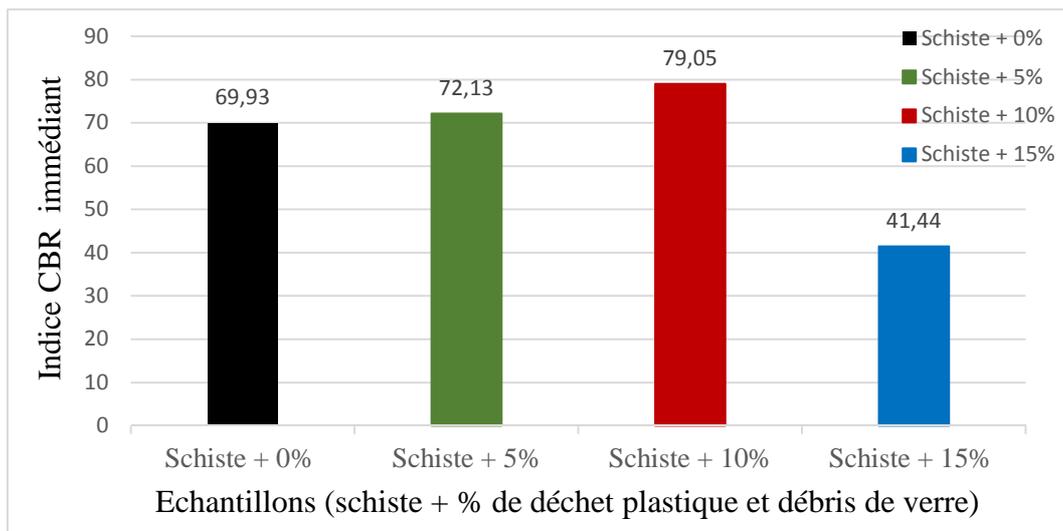


Figure IV.19 : Evolution des indices CBR immédiat en fonction des pourcentages de déchet plastique et de débris de verre.

Les résultats d'essais de portance CBR réalisés avant immersion présentés sur la figure IV.19, permettent de constater que la portance des mélanges (schiste + de déchet plastique et débris de verre) augmente au fur et à mesure que le pourcentage d'ajout augmente. Elle passe de 69.93 pour le schiste seul à un maximum de 79.09 pour le mélange de schiste + 10% d'ajout. Ceci est peut-être dû au fait que le plastique et le verre notamment en position feuilletée renforcent la structure du mélange et développent des résistances au poinçonnement importantes que celles développées par le schiste seul.

Au-delà de 10% d'ajout (15% de déchet plastique et débris de verre) le mélange présente une faible portance face au poinçonnement, ceci peut être dû à l'effet négatif du plastique déformable et même du verre fragile en forte proportion sous chargement vertical.

IV.6.6.2. Interprétation des résultats (CBR_{imm})

Pour les essais CBR après immersion, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Résultats des essais CBR après immersion.

Echantillon	Gonflement relatif G	CBR _{imm}		
		I (2.5)	I(5)	CBR _{imm}
Schiste+ 0% de déchet plastique et débris de verre	0	6,69	11,92	11,92
Schiste+ 5% de déchet plastique et débris de verre	0	18,38	24,08	24,08
Schiste+10%de déchet plastique et débris de verre	0	20,61	32,67	32,67
Schiste+15%de déchet plastique et débris de verre	0	8,07	14,90	14,90

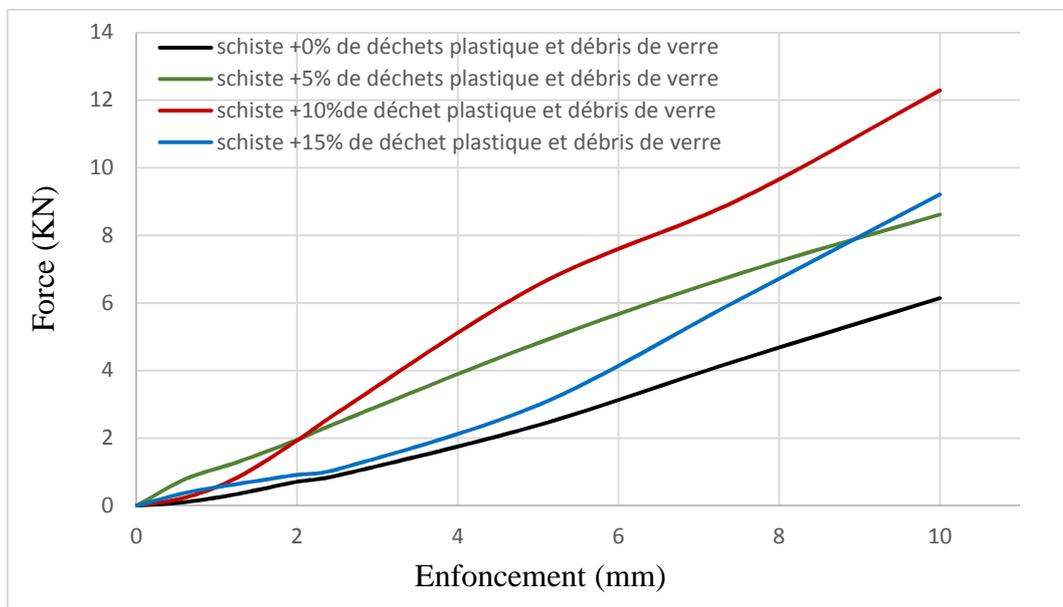


Figure IV.20 : Courbes enfoncements-forces (cas des CBR_{imm}).

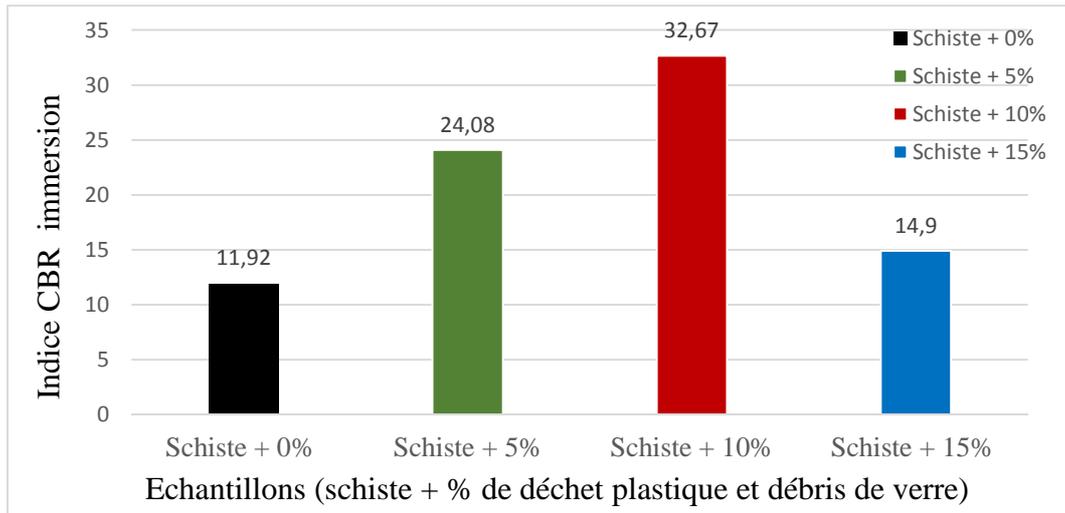


Figure IV.21 : Evolution des CBR_{imm} en fonction des pourcentages de déchet plastique et débris de verre.

Les résultats d’essais de portance CBR réalisés après immersion présentés sur la figure IV.21, montre que la portance des mélanges après immersion augmente progressivement avec l’ajout de plastique et de verre pour atteindre un maximum de 32,67 dans le cas de mélange à 10% d’ajout. Au-delà de cette proportion du verre et du plastique, le mélange (schiste +15% d’ajout) à perdu leurs portances pour atteindre 14,9.

IV.6.6.3. Interprétation des résultats (CBR et CBR_{imm})

Figure IV.9 : Résumé des résultats d’essai CBR (CBR_{imd} et CBR_{imm}).

Echantillon	CBR_{imd}	CBR_{imm}
Schiste + 0% de déchets plastique et débris de verre	69,93	11,92
Schiste + 5% de déchets plastique et débris de verre	72,13	24,08
Schiste + 10% de déchets plastique et débris de verre	79,05	32,67
Schiste + 15% de déchets plastique et débris de verre	41,44	14,90

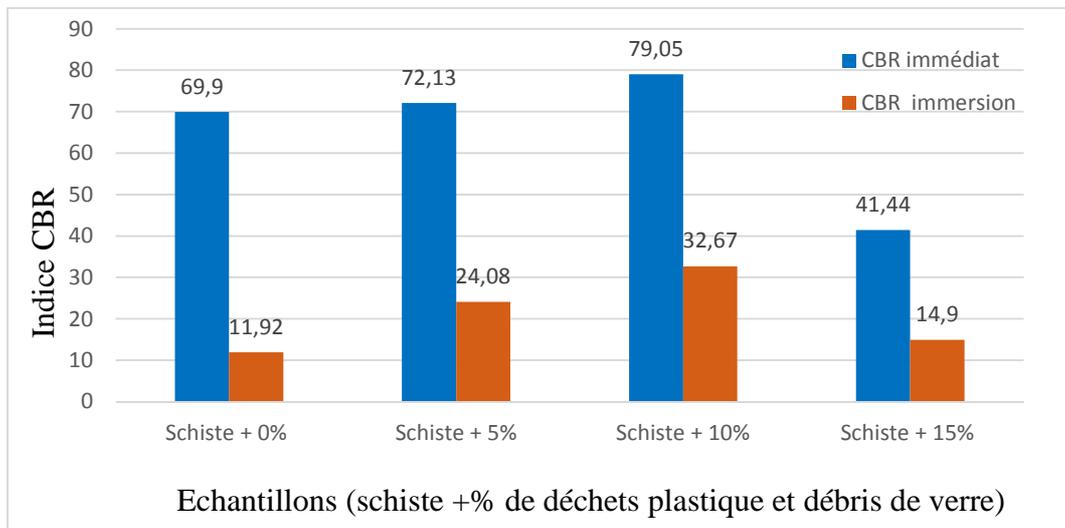


Figure IV.22 : Courbes comparatives des CBR_{imd} et CBR_{imm} des différents mélanges.

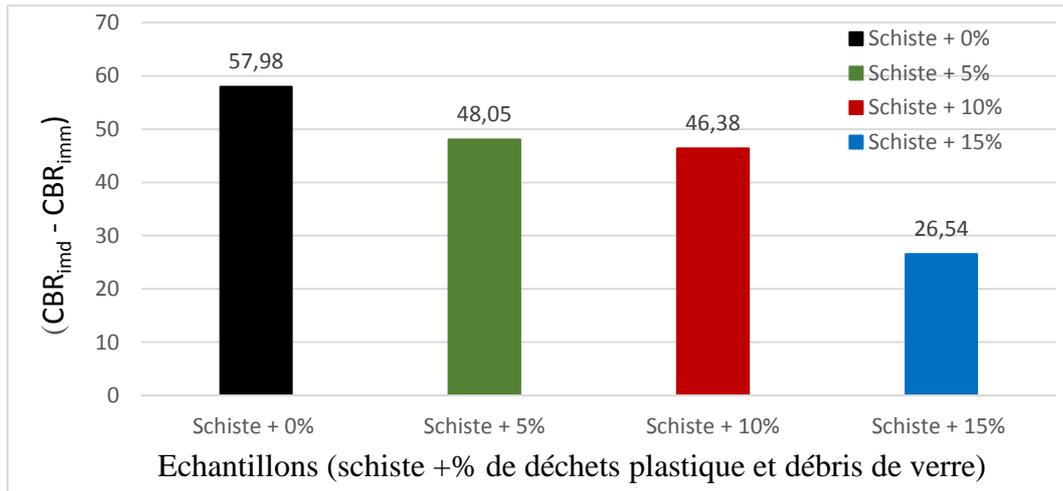


Figure IV.23 : Courbes comparatives des écarts entre CBR_{imd} et CBR_{imm} des différents mélanges.

A titre de comparaison, les résultats ci-dessus permettent de constater que les portances des échantillons étudiés après immersion sont inférieures à celles développées avant immersion, ce qui est souvent évident dans le cas des sols et des roches naturelles. Toutefois, l'écart entre les indices CBR avant et après immersion diminue en fonction de la proportion d'ajouts (voir figure IV.23). Les mélanges peuvent ainsi présenter une certaine stabilité en fonction des variations climatiques à l'échelle réelle.

Tableau IV.10 : Classes de portance des sols par ordre croissant de S4 à S0 [6].

Portance (Si)	CBR
S4	< 5
S3	5 - 10
S2	10 - 25
S1	25 - 40
S0	> 40

En se référant aux classes de portances présentées dans le tableau IV10, nous pouvons dire que les matériaux étudiés développent des portances très intéressantes. Les mélanges étudiés, se présentent respectivement comme matériaux de portance moyenne (classe S2) à portance très élevée (classe S0).

IV.7.Conclusion

Les essais Proctor et CBR présentés dans cette étude ont permis de montrer l'aptitude des mélanges au compactage, ainsi que leur portance dans les conditions les plus défavorables. En se basant particulièrement sur ces résultats, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés (mélange de schiste + déchets plastique et débris de verre) ont présenté des comportements très intéressants. Les caractéristiques mécaniques obtenues, sont très satisfaisantes et vérifient les conditions exigées par les normes. Ceci permet de les proposer comme matériaux routiers à conditions de présenter des résultats acceptables sous d'autres essais routiers exerçant d'autres types de sollicitations, ce qui fera l'objet des chapitres suivants.

CHAPITRE V

ESSAIS MICRO DEVAL, LOS ANGELES, DEGRADABILITE ET FRAGMENTABILITE

V.1.Introduction

Les essais routiers sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Les caractéristiques mécaniques des granulats telles que la dureté et la résistance à l'usure par frottement ne sont déterminées que par ces essais spécifiques. La dureté est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

V.2.Essai micro Deval

V.2.1.Définition et But de l'essai (NF P18-572) [23]

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4-6.3mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 25-50 mm. Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.



Figure V.1 : Machine Micro Deval.

V.2.2 principe de l'essai

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des quatre classes granulaires types 4-6.3 ; 6.3-10 ; 10-14 ; 25-50. Les 25-50 mm doivent contenir 60% de 25-40 mm. Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à poids constant (5 heures au minimum). Il n'est pas possible d'étendre ce processus d'usure aux sables, les classes granulaires inférieures à 4 mm n'évoluent plus par usure, dans cet essai, mais par fragmentation. Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. La prise d'essai sera de 500 ± 2 g pour les 4-14 mm et de $10\text{kg} \pm 20$ g pour

les 25-50 mm. Ajouter 2.5 litres d'eau et la charge abrasive (billes en acier de 10 mm de diamètre) correspondant à la classe granulaire choisie dans les cylindres de la machine. Après rotation des cylindres à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures, tamiser le matériau sur le tamis de 1.6 mm et peser le refus

Tableau V.1 : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.

Classe granulaires (mm)	Poids de l'échantillon(g)	Poids de la charge (g)
4-6.3	500 ± 2	2000 ± 5
6.3-10	500 ± 2	4000 ± 5
10-14	500 ± 2	5000 ± 5

M est la masse du matériau soumis à l'essai, M' la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval qui s'écrit :

$$MDE = \frac{M - M'}{M} \times 100$$

Le coefficient mesure le % d'usure, plus il est petit et plus la résistance à l'usure est grande.



Figure V.2 : Mode opératoire d'essai micro Deval.

V.2.3 Matériaux utilisées

On a réalisé des essais micro Deval sur la classe granulaire 10-14 mm pour les mélanges :

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre.

V.2.4 résultats de l'essai

Tableau V.2 : Résultats des essais Micro Deval.

Echantillon	Masse avant essai M(g)	Masse après essai M'(g)	MDE (%)
Schiste+0% de déchet plastique et débris de verre	500	156	68,8
schiste +5% de déchet plastique et débris de verre	500	159	68,2
Schiste+10% de déchet plastique et débris de verre	500	179	64,2
schiste+15% de déchet plastique et débris de verre	500	200	60
Schiste+20% de déchet plastique et débris de verre	500	244	51,2
Schiste+30% de déchet plastique et débris de verre	500	274	45,2
Schiste+40% de déchet plastique et débris de verre	500	297	40,6
Schiste+50% de déchet plastique et débris de verre	500	307	38,6

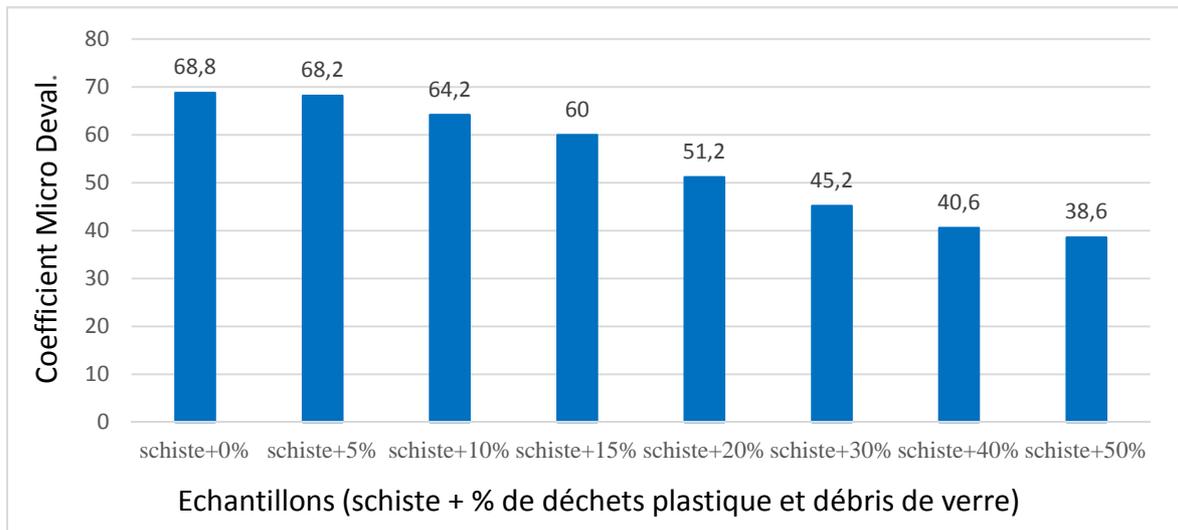


Figure V.3 : Courbes comparatives des essais micro Deval.

Les résultats obtenus, présentés sur le tableau V.2 et récapitulés sur la figure V.3, permettent de constater que le coefficient MDE diminue de plus en plus avec l'augmentation du pourcentage de déchets plastiques et débris de verre, En effet, il passe de 68.8 pour les échantillons du schiste seul à 38.6 pour les échantillons à 50% d'ajouts. Ceci peut être dû à la structure lisse (moins de frottement) et résistante en présence d'eau (non sensible à l'eau) de débris de verre et de déchets plastiques, ces derniers en particulier peuvent même réduire le frottement entre les grains de schiste. Ces résultats permettent ainsi de conclure que l'ajout du plastique et du verre rend les mélanges plus résistants à l'usure. Leur utilisation en couche de forme et en couches de fondations est fortement envisageable.

V.3 Essai Los Angeles

V3.1 Définition et but de l'essai (NF P18 573) [24]

L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement. Le matériau

évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.



Figure V.4 : Machine d'essai Los Angeles.

V.3.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à poids constant (5 heures au minimum). La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre. Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité choisie comme le montre le tableau suivant

Tableau V.6 : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.

Classes granulaires (mm)	fractions	Nombre de boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 - 6.3		7	3080 ± 20	5000 ± 2
6.3 - 10		9	3960 ± 25	5000 ± 2
10 - 14		11	4840 ± 25	5000 ± 2
10 - 25	10 - 16	11	4840 ± 25	3000
	16 - 25	11	4840 ± 25	2000
16 - 31.5	16 - 25	12	5280 ± 25	2000
	25 - 31.5	12	5280 ± 25	3000
25 - 50	25 - 40	12	5280 ± 25	3000
	40 - 50	12	5280 ± 25	2000

On procède au lavage de l'échantillon en récupérant le refus au tamis de 1.6mm. Ce dernier est séché, puis pesé, ce qui nous permettra de calculer le coefficient Los Angeles (LA) en utilisant la relation suivante :

$$LA = \frac{M - M'}{M} \times 100$$

Avec :

M : masse de l'échantillon avant essai.

M' : masse du refus du tamis 1.6mm.



Figure V.5 : Mise en place des granulats pour l'essai Los Angeles.

V.3.3. Matériaux utilisés

Nous avons réalisé des essais Los Angeles sur la classe 10-16 mm pour les échantillons :

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre.

V.3.4. Résultats des essais

Tableau V.2 : Résultats des essais Los Angeles.

Echantillon	Masse avant essai M(g)	Masse après essai M'(g)	LA (%)
Schiste+0% de déchet plastique et débris de verre	5000	3641	27,18
Schiste+5% de déchet plastique et débris de verre	5000	3673	26,54
Schiste+10% de déchet plastique et débris de verre	5000	3687	26,26
Schiste+15% de déchet plastique et débris de verre	5000	3744	25,12
Schiste+20% de déchet plastique et débris de verre	5000	3933	21,34
Schiste+30% de déchet plastique et débris de verre	5000	4055	18,9
Schiste+40% de déchet plastique et débris de verre	5000	4145	17,1
Schiste+50% de déchet plastique et débris de verre	5000	4195	16,1

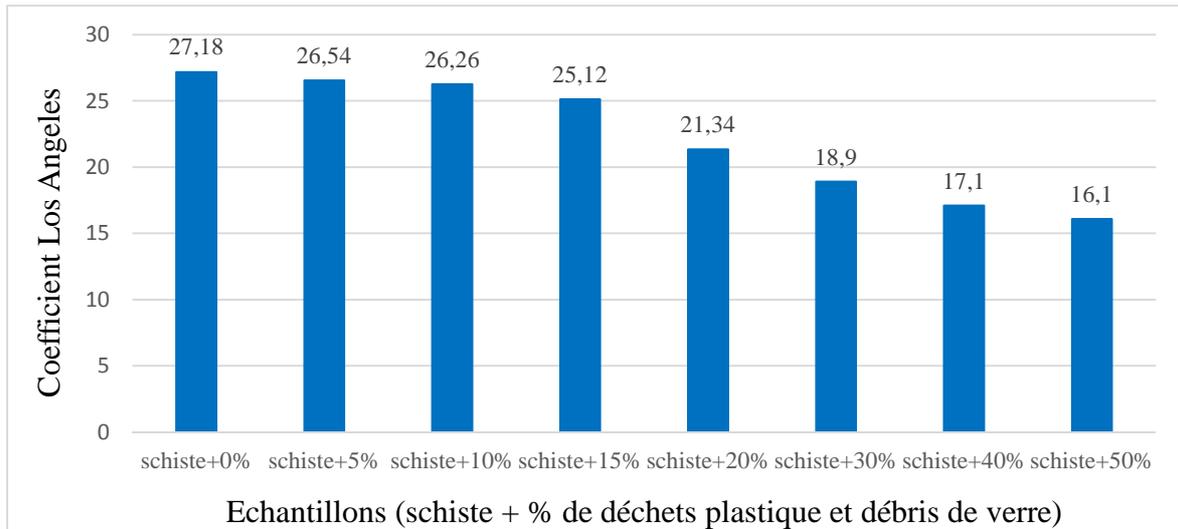


Figure V.6 : Courbe comparative des essais Los Angeles.

La figure V.6 montre que le coefficient Los Angeles diminue au fur et à mesure que le pourcentage de déchet plastique et débris de verre augmente. Ceci nous permet de déduire que le plastique et le verre améliore la résistance des mélanges aux chocs (l'ajout, notamment en plastique amorti relativement les chocs produits par les boulets sur les granulats).

Tableau V.3 : Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

Echantillon	MDE(%)	LA(%)	MDE+LA	Catégorie
Schiste+0% de déchet plastique et débris de verre	68,8	27,18	95,98	F
Schiste+5% de déchet plastique et débris de verre	68,2	26,54	94,74	F
Schiste+10% de déchet plastique et débris de verre	64,2	26,26	90,46	F
Schiste+15% de déchet plastique et débris de verre	60	25,12	85,12	F
Schiste+20% de déchet plastique et débris de verre	51,2	21,34	72,54	E
Schiste+30% de déchet plastique et débris de verre	45,2	18,9	64,1	E
Schiste+40% de déchet plastique et débris de verre	40,6	17,1	57,7	E
Schiste+50% de déchet plastique et débris de verre	38,6	16,1	54,7	D

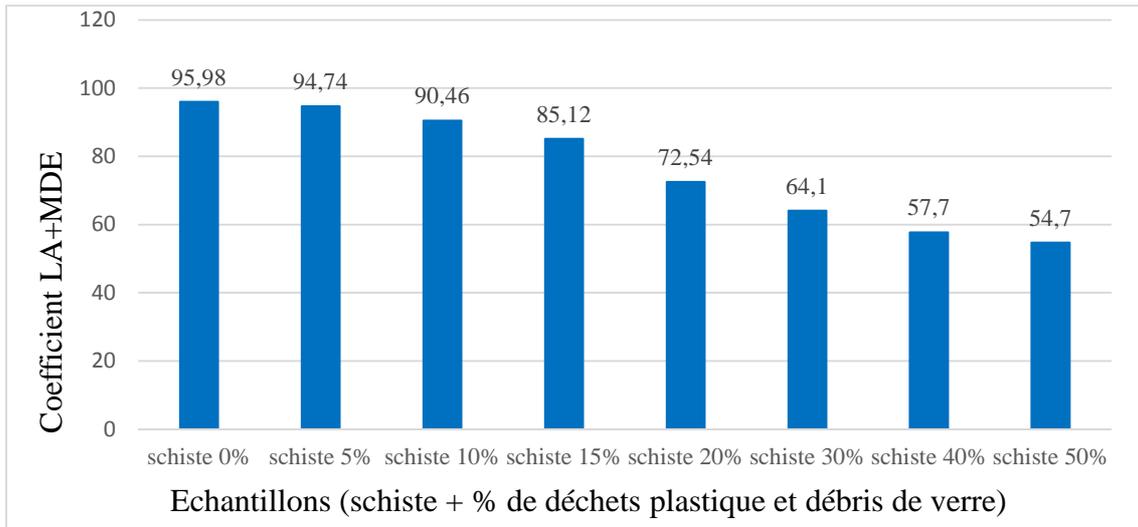


Figure V.7 : Courbe comparative LA+MDE

Tableau V.4 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure

Catégorie	LA	MDE	LA + MDE	Domaine d'utilisation
A	≤ 20	≤ 15	≤ 25	Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, y compris les couches de roulement à trafic important.
B	≤ 25	≤ 20	≤ 35	Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, sauf couches de roulement a trafic important.
C	≤ 30	≤ 25	≤ 45	Matériau utilisable pour couches de fondations, et couches de base tout trafic.
D	≤ 35	≤ 30	≤ 55	Matériau utilisable pour couches de fondation toutes chaussées, et couches de base pour chaussées à moyen trafic.
E	≤ 45	≤ 45	≤ 80	Matériau utilisable pour couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.
F	> 45	> 45	> 80	Matériau utilisable en couches de chaussés avec un traitement éventuel en fonction de l'intensité du trafic

En se référant aux résultats du tableau V.3. Figure V.7 et aux restrictions du tableau V.4, nous pouvons dire que :

Les échantillons de schiste seuls, ainsi que les échantillons en mélanges ne dépassant pas 15% de plastique et de verre sont de catégories **F**.

Par contre, les échantillons de schiste +20% ; 30% et 40% de déchet plastique et débris de verre sont reclassés dans la catégorie **E**. Ils présentent de ce fait un meilleur comportement que ceux de catégorie **F**.

A titre de comparaison entre les résultats des essais LA et MDE on peut dire que le matériau a une faible résistance en présence d'eau, ceci est dû à la composition minéralogique du schiste étudié.

Ainsi, nous pouvons dire que le plastique et le verre en grande proportion peut présenter une meilleure résistance que le matériau naturel, mais ces fortes proportions d'ajout agissent négativement sur le comportement des mélanges sous d'autres essais (Proctor, CBR,...) comme il a été constaté précédemment.

Les matériaux étudiés peuvent être classés dans les catégories **E** à **F**. Ce type de matériau est employé dans les couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.

V.4.Essai de dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-056) [22]

V.4.1.Principe de l'essai

Il nous permet d'étudier la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques (risque d'évolution à long terme).

V.4.2.Exécution de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité 10/20 mm donnée, soumis à quatre cycles d'imbibition-séchage conventionnels selon la norme NF P 94-056. Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant l'essai}}{D_{10} \text{ du matériau après l'essai}}$$

Avec : D_{10} : Diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât.

La préparation de la fraction 10/20mm s'effectue avec les deux tamis 10 et 20mm, puis on refait l'analyse granulométrique avec la série de tamis 10, 16 et 20 mm. A la fin des cycles imbibition-séchage nous procédons au tamisage de l'échantillon au travers la colonne de tamis suivante : 10, 5, 2 et 1mm.

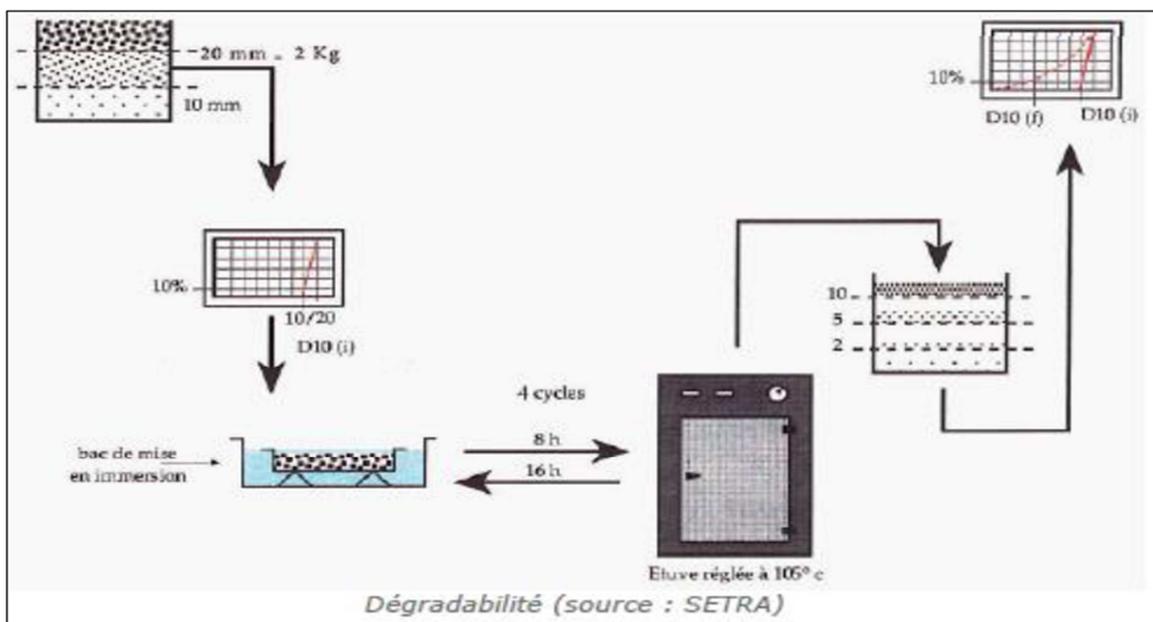


Figure V.8 : Différentes étapes de l'essai de dégradabilité.

V.4.3. Matériaux utilisés

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre.

V.4.4. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sur le matériau schiste à l'issue de l'essai de dégradabilité sont présentés sur la figure suivante :

- **Schiste seul**

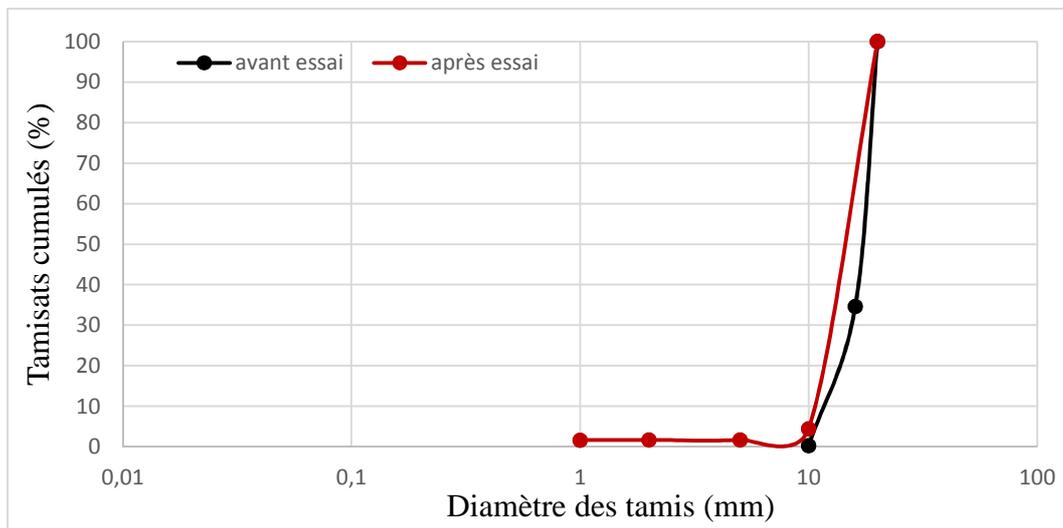


Figure V.9 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste seul).

Le coefficient de dégradabilité DG est déterminé par la relation suivante :

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{12}{11,5} \approx 1.05 \quad DG = 1.05$$

Tableau V.5 : Classification des matériaux rocheux.

Coefficient de dégradabilité DG	DG Nature du matériau
DG > 20	matériaux rocheux très dégradables
5 < DG < 20	matériaux rocheux moyennement dégradables
DG < 5	matériaux rocheux peu dégradables

En comparant les résultats obtenus aux résultats de référence présentés dans le tableau V.13 nous constatons que le schiste étudié fait partie des matériaux rocheux peu dégradables ($DG = 1.15 < 5$). Son utilisation en couches de chaussées est très envisageable.

- **Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre**

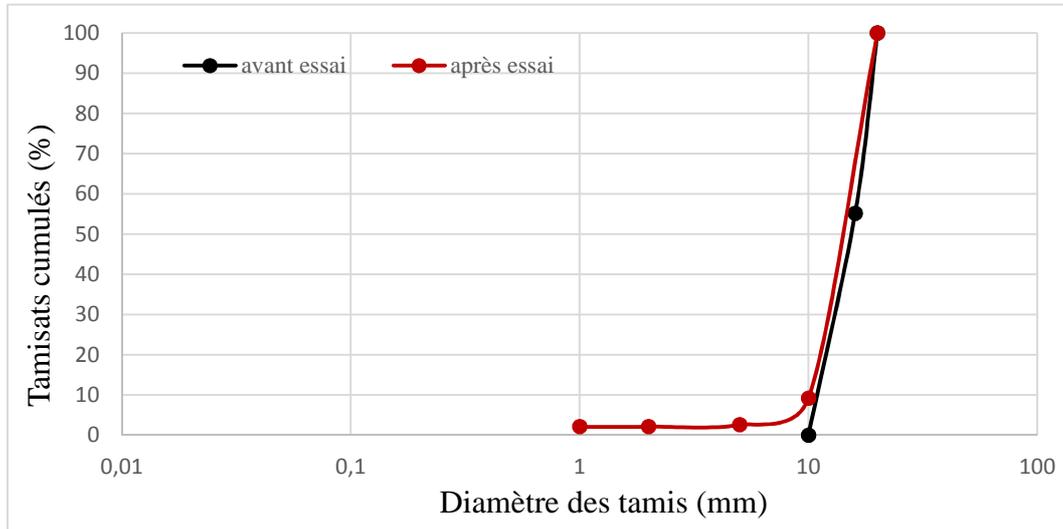


Figure V.10 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11.5}{10.45} = 1.1 \quad DG = 1.1$$

- **Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre**

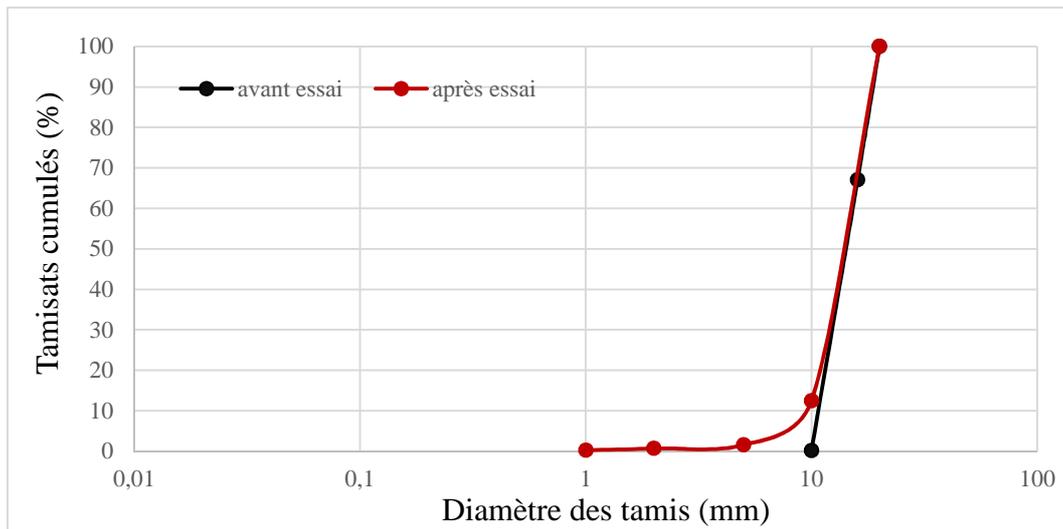


Figure V.11 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11}{9.75} = 1.13 \quad DG = 1.13$$

• Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre

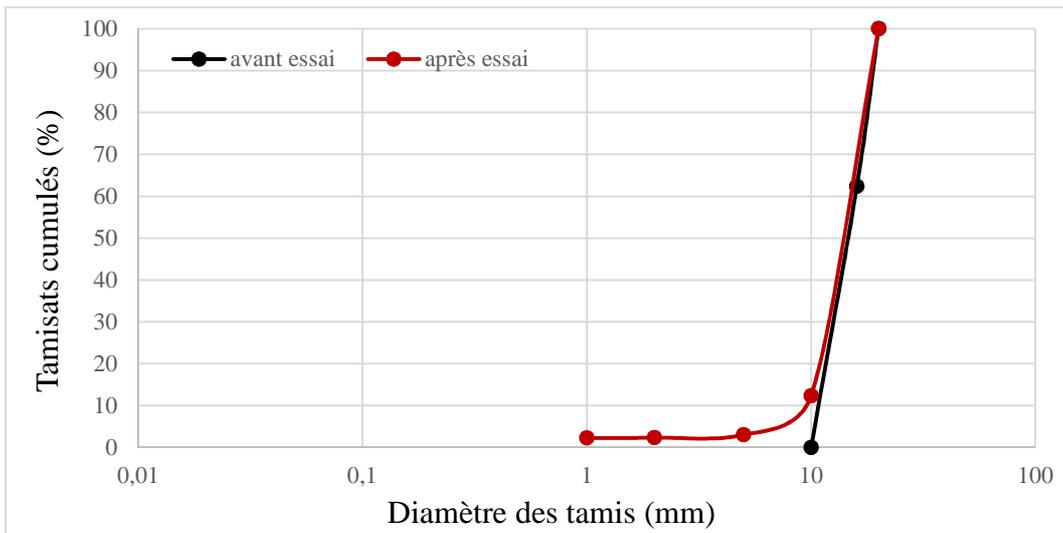


Figure V.12 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{12}{10} = 1.18 \quad DG = 1.18$$

• Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre

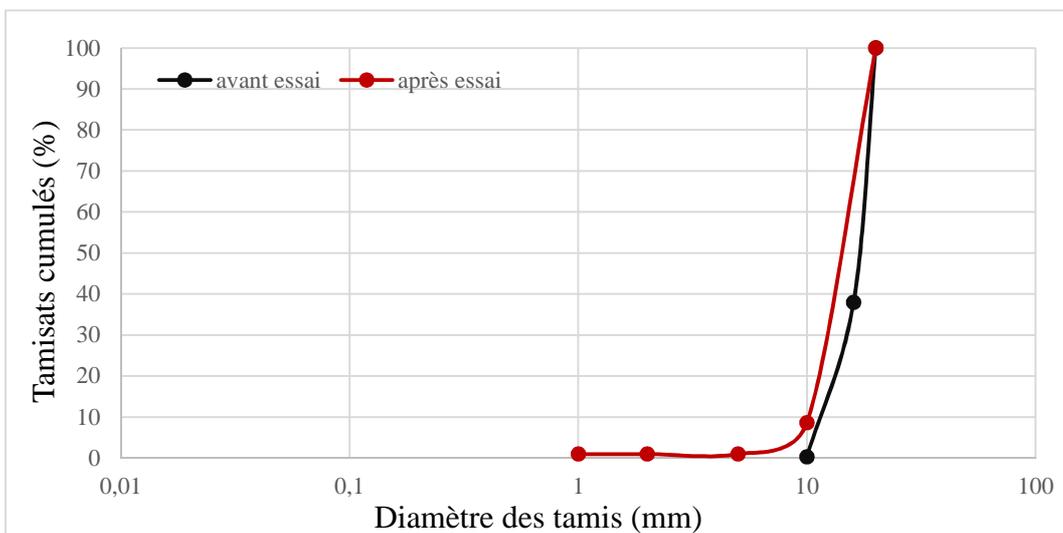


Figure V.13 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre).

$$G = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{12.5}{10.2} = 1.22 \quad DG = 1.22$$

• Mélange de schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre

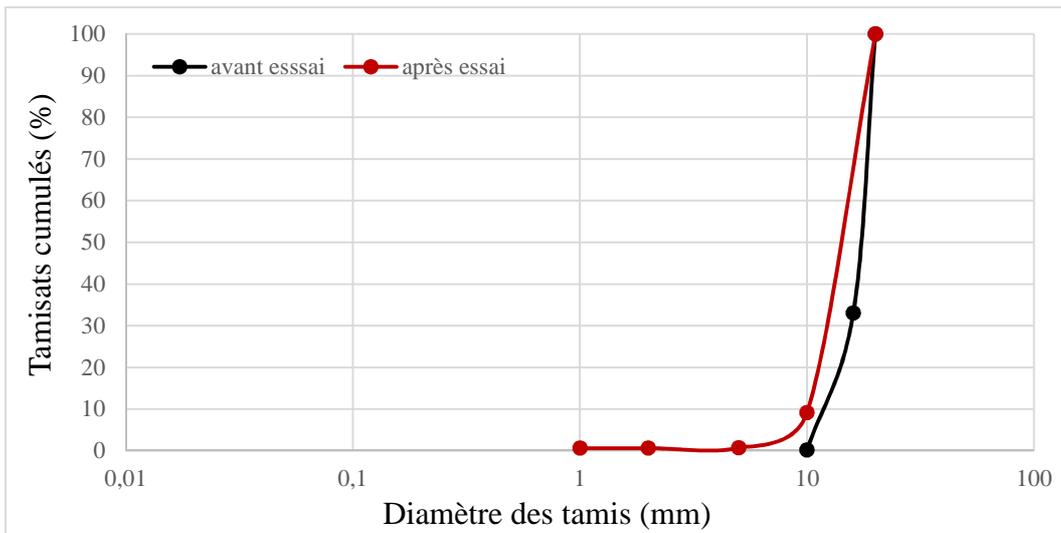


Figure V.14 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre).

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{13}{10} = 1.3 \quad DG = 1.3$$

• Mélange de schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre

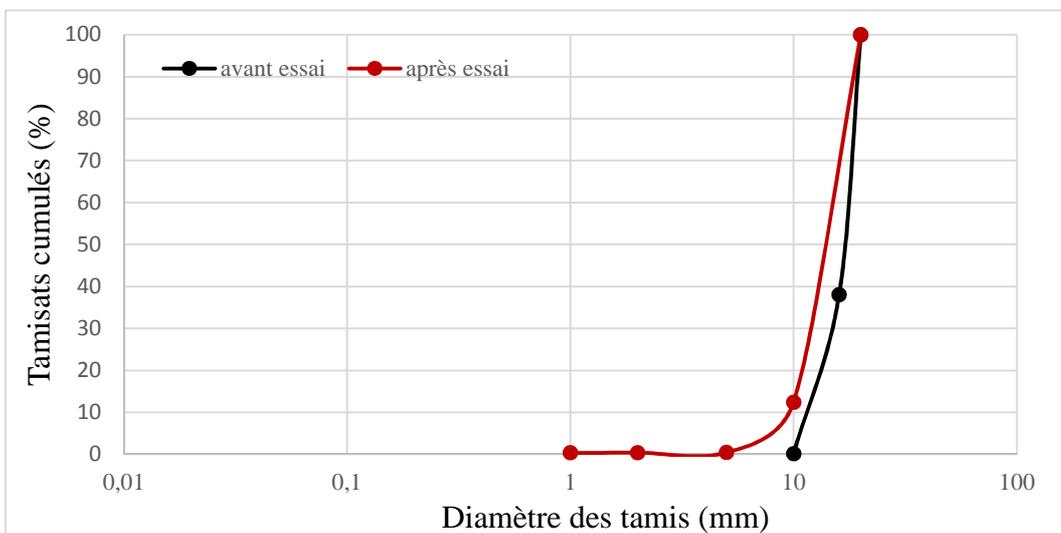


Figure V.15 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre).

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{13}{9.8} = 1.35 \quad DG = 1.35$$

• Mélange de schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre

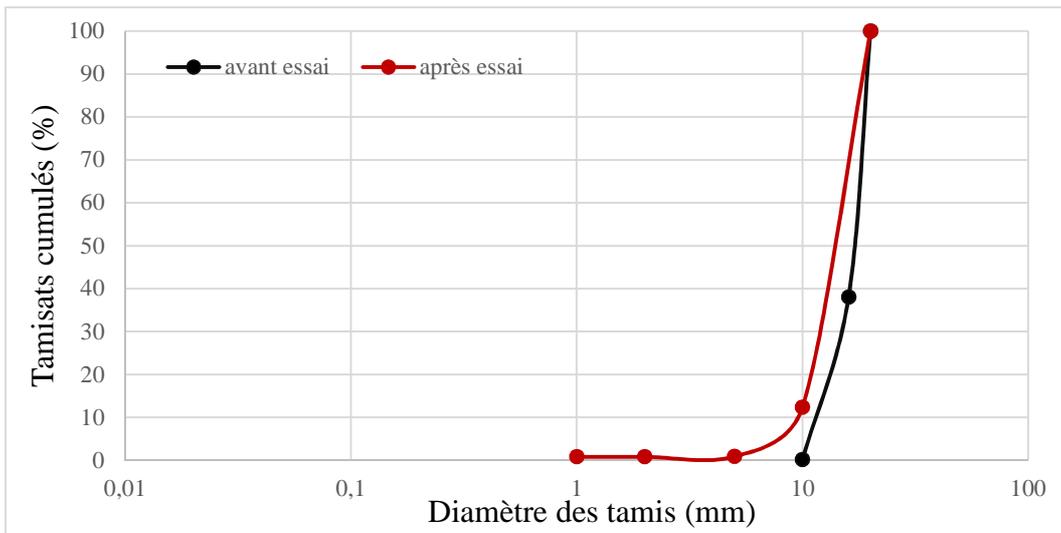


Figure V.16 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre).

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{13,5}{9,6} = 1,4 \quad DG = 1,4$$

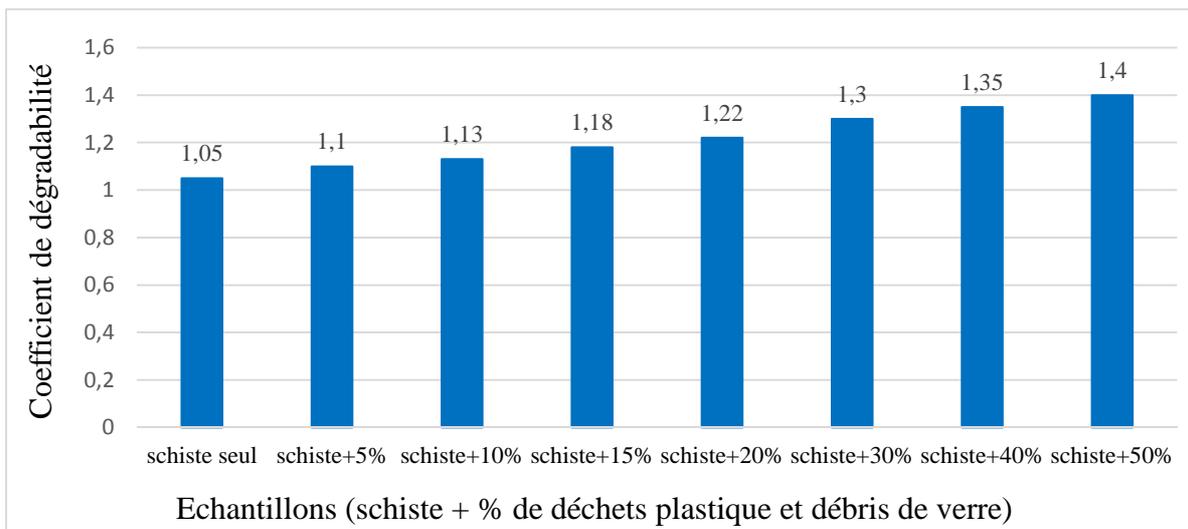


Figure V.17 : Courbe comparative coefficient de dégradabilité

L'ajout de déchet plastique et débris de verre augmente la dégradabilité des échantillons. En effet, DG passe de 1.05 à 1.4 dans le cas du schiste avec 50% de verre et de plastique. Ça peut être expliquée par l'influence de température élevée (+100°C) sur quelque type de plastique utilisé. Ainsi, les matériaux étudiés sont considérés rocheux peu dégradables et leur utilisation en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations) peut être recommandée.

V.5.Essai de fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066) [25]

V.5.1.Principe de l'essai

C'est la capacité des matériaux rocheux peu résistants à :

- être affectés par le trafic de chantier
- être transformés en matériaux compatibles avec un réemploi en remblais

V.5.2.Exécution de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité 10/20mm donnée soumis à un pilonnage conventionnel selon la norme NF P 94-066. Cette réduction s'exprime par le rapport :

$$FR = \frac{D10 \text{ du matériau avant essai}}{D10 \text{ du matériau après essai}}$$

La préparation de la fraction 10/20mm s'effectue avec les deux tamis 10 et 20mm puis on refait l'analyse granulométrique avec la série de tamis 10, 16 et 20 mm

A la fin du pilonnage nous procédons au tamisage à sec de l'échantillon au travers de la colonne de tamis suivante : 1, 2, 5 et 10 mm.

Pour le pilonnage on introduit le matériau dans un moule CBR.

Le pilonnage s'effectue en appliquant à la surface du matériau 100 coups de dame Proctor normal distribués conformément au mode de compactage décrit pour le compactage d'une couche dans un essai Proctor (voir NF P 94-093).

V.5.3.Matériaux utilisés

Nous avons réalisé des essais de fragmentabilité sur les échantillons suivants :

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre.

V.5.4. Résultats des essais

- Schiste seul

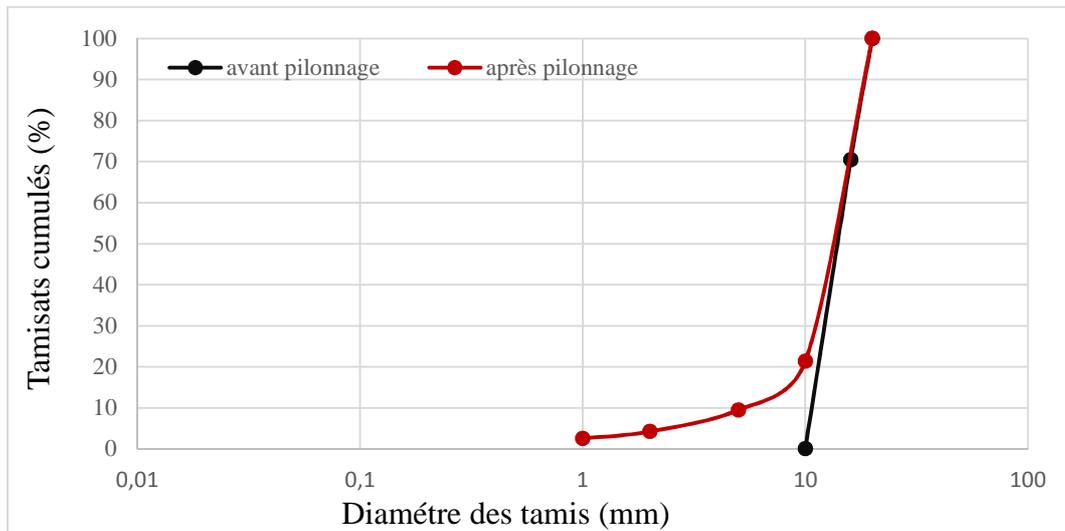


Figure V.18 : Courbes granulométriques avant et après essais (Schiste seul).

L'application numérique a donné :

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11}{4,8} = 2,18 \quad FR=2,18$$

Tableau V.5 : Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR

Coefficient de fragmentabilité (FR)	Nature du matériau
FR < 7	Roche peu fragmentable
FR > 7	Roche fragmentable

- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre

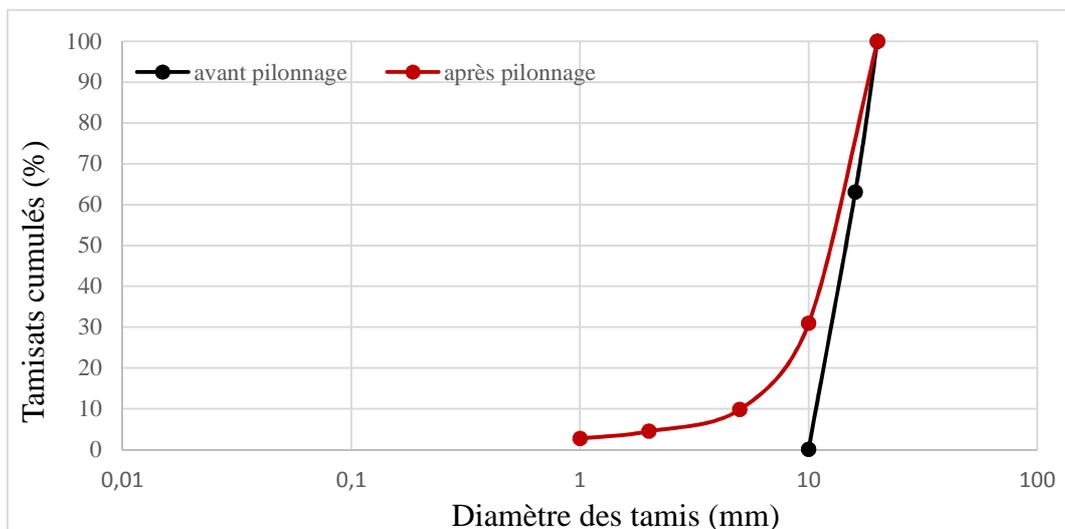


Figure V.19 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{5} = 2,1 \quad FR=2,1$$

- **Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre**

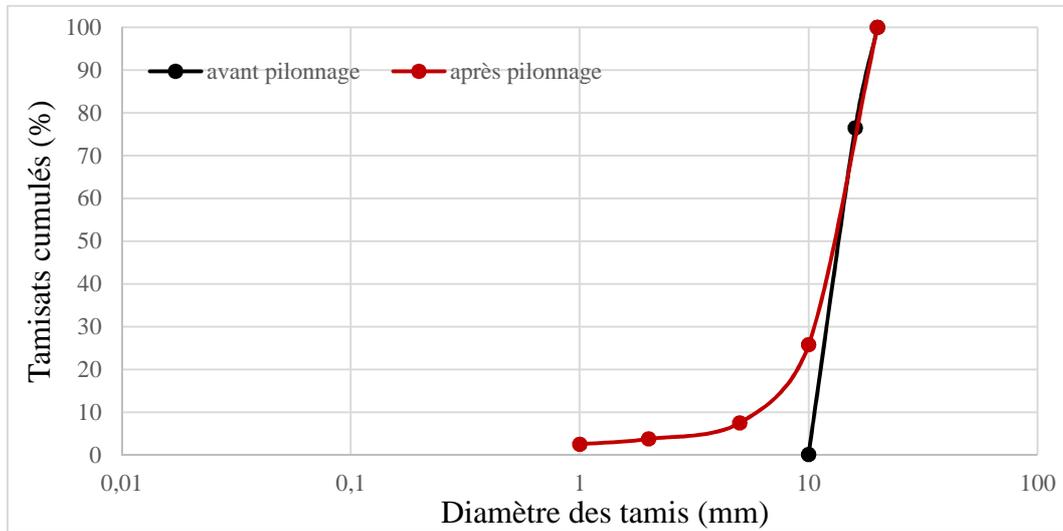


Figure V.20 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{5.8} = 1.81 \quad FR=1.81$$

- **Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre**

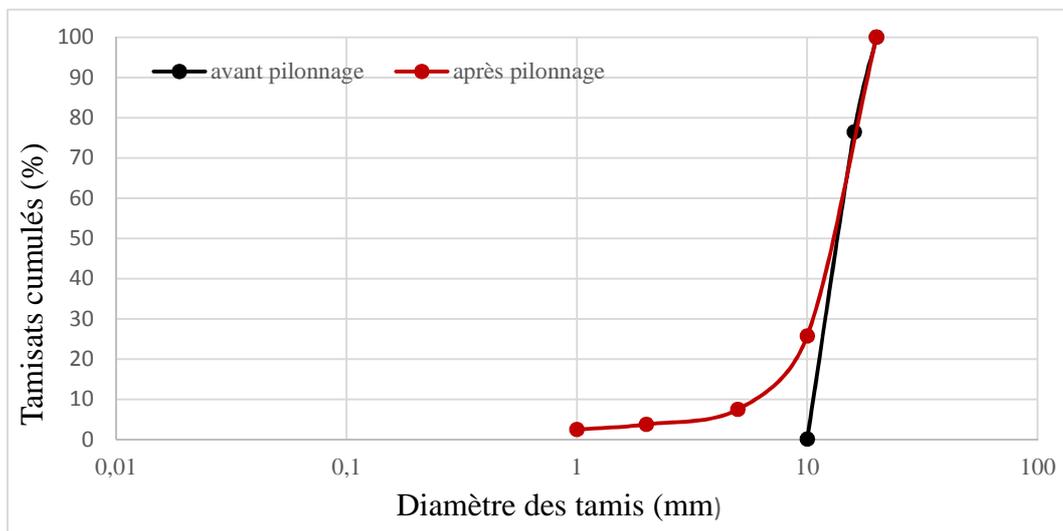


Figure V.21 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{6,5} = 1.61 \quad FR=1.61$$

• Mélange de schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre

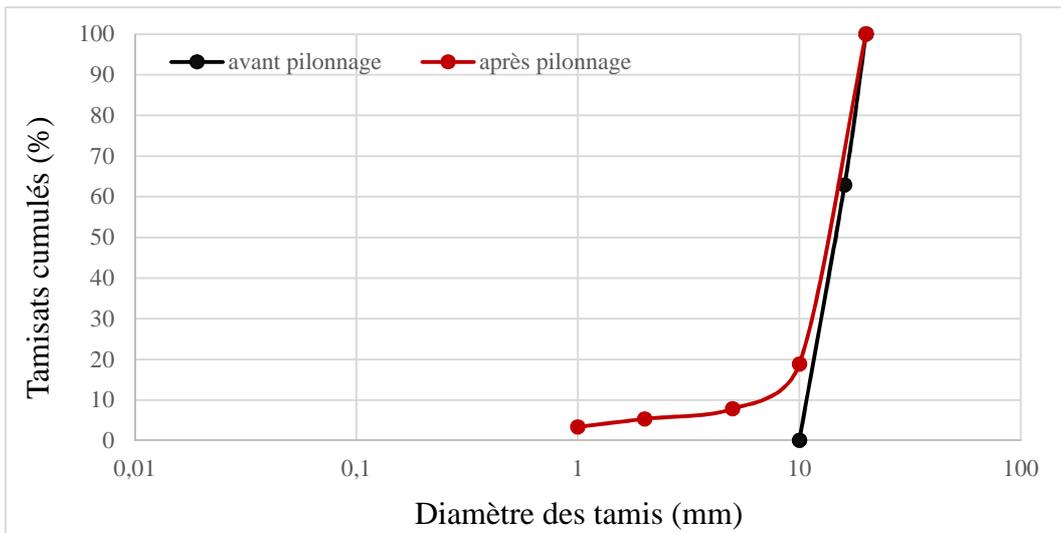


Figure V.22 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 20% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10,5}{8,9} = 1,17 \quad FR=1,17$$

• Mélange de schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre

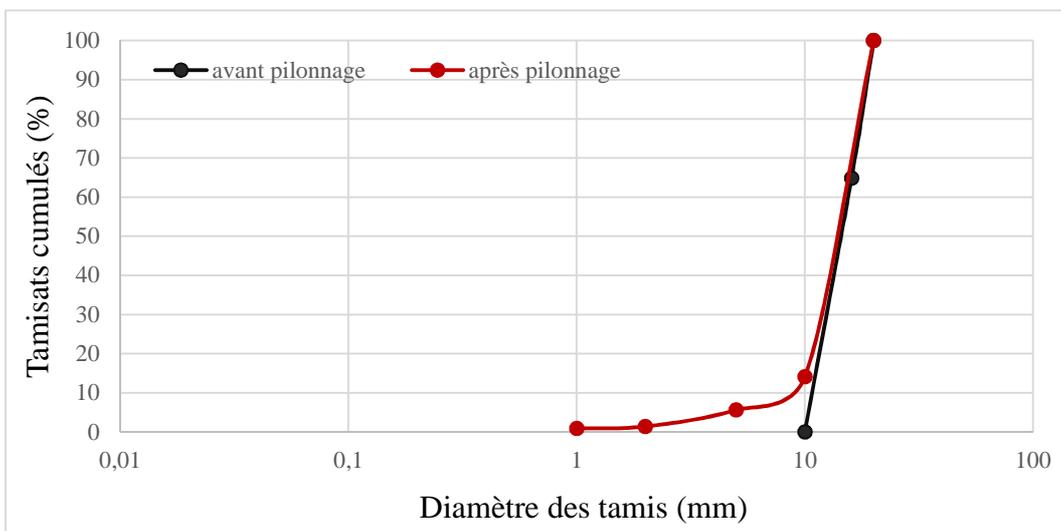


Figure V.23 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 30% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11}{19,8} = 1,12 \quad FR=1,12$$

• Mélange de schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre

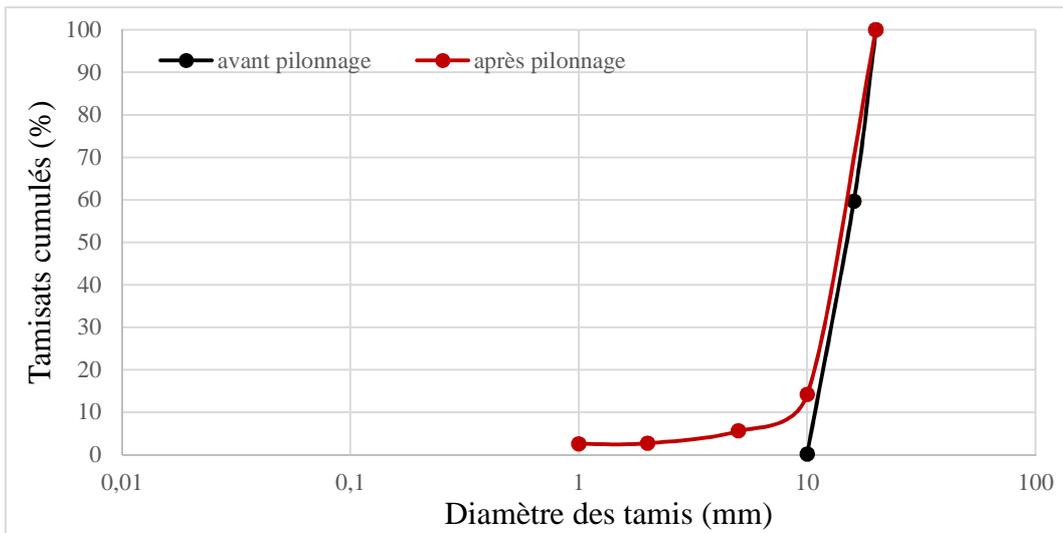


Figure V.24 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 40% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11,5}{9,8} = 1,07 \quad FR=1,07$$

• Mélange de schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre

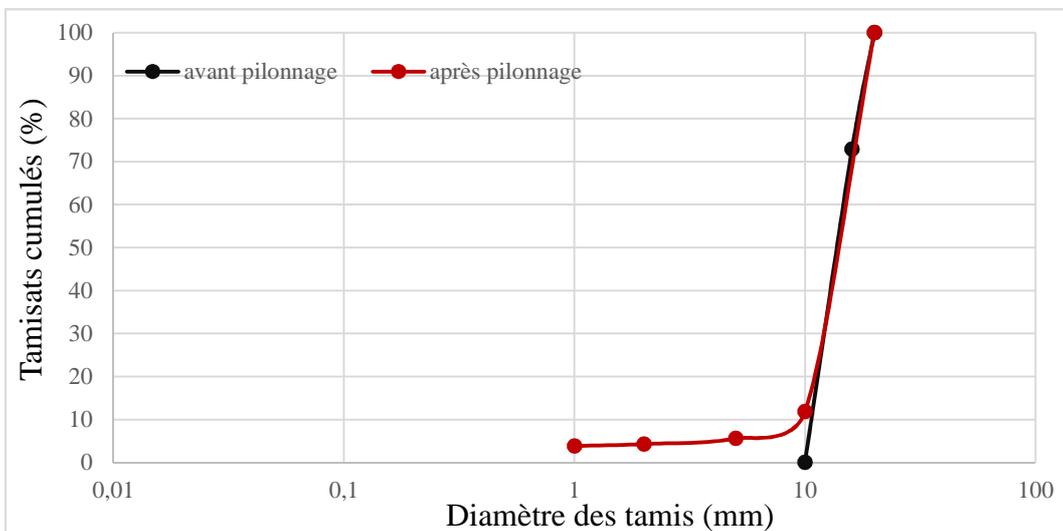


Figure V.25 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste + 50% de déchet plastique et débris de verre).

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10,5}{10,3} = 1,01 \quad FR=1,01$$

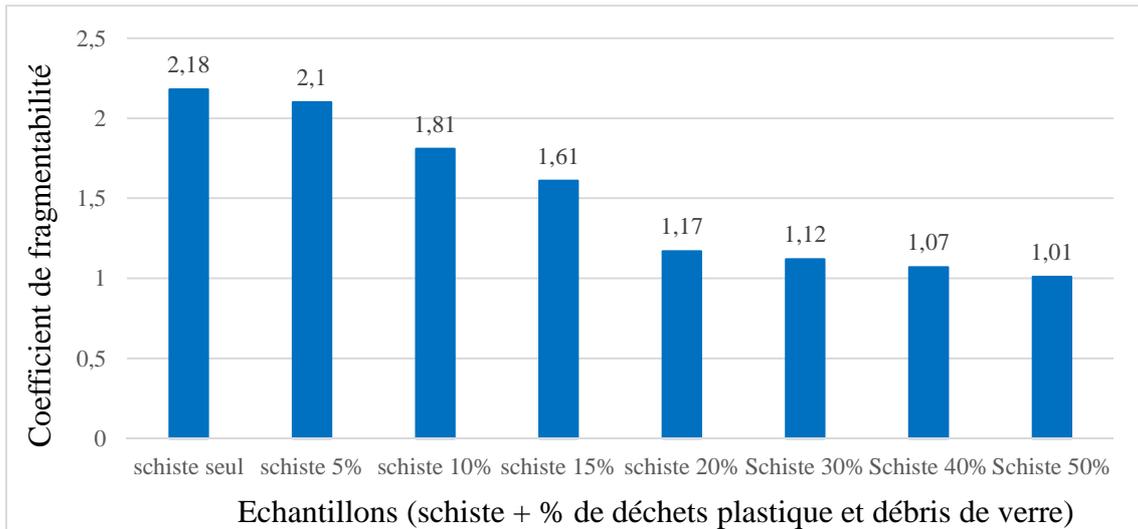


Figure V.26 : Courbe comparative coefficient de fragmentabilité.

En se référant aux valeurs présentées dans le tableau V.5, nous déduisons que le schiste étudié fait partie des matériaux rocheux peu fragmentables, ($FR = 2.2 < 7$). Son utilisation en couches de chaussées est très possible. Toutefois, les ajouts améliorent sensiblement la résistance à la fragmentation des mélanges. En effet, FR passe de 2.2 à 1.05 dans le cas du schiste avec 20% de verre et de plastique. Cette amélioration peut être expliquée par la nature flexible du plastique qui amorti les coups de pilonnage et absorbe une partie d'énergie transmise aux grains du schiste.

Les mélanges étudiés sont donc peu fragmentables et leur utilisation en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations et éventuellement en couches de base) peut être recommandée.

V.6. Conclusion

Les essais routiers que nous avons présentés dans ce chapitre (Los Angeles, Micro Deval, fragmentabilité, et dégradabilité) ont permis l'étude de la résistance des matériaux utilisés sous différentes sollicitations routières. Les résultats obtenus permettent ainsi, d'avoir une meilleure idée sur l'évolution des matériaux étudiés ce qui permettra sans doute d'éviter certains désordres à court ou à long terme pouvant affecter les projets à réaliser avec ce type de matériaux.

Pour étudier le comportement des mélanges présentés sous d'autres types de sollicitation et confirmer davantage leur utilisation dans la construction routière, nous les avons soumis à une série d'essais de cisaillement à la boîte. Les résultats obtenus feront l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE VI

RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX ETUDIES

IV.1.Introduction

L'étude de la résistance au cisaillement d'un sol constitue un problème complexe de la mécanique des sols. La résistance au cisaillement dépend du type de sol rencontré, suivant qu'il est cohérent ou non, que le matériau est grossier ou fin. Dans la résolution des problèmes de stabilité en mécanique des sols, il est nécessaire de connaître les paramètres de résistance au cisaillement du sol. Ces paramètres appelés angle de frottement interne et cohésion interviennent dans le calcul de stabilité des différents ouvrages de génie civil (fondations, barrages, digues...).

Il existe plusieurs types d'appareils pour les essais de cisaillement :

- Les essais de laboratoire :
 - boîte de casagrande ;
 - Appareil triaxial ;
 - Autre (scissomètre de laboratoire, pénétromètre de poche...).
- Les essais in situ : le phicomètre

Dans ce chapitre nous allons étudier la résistance au cisaillement des mélanges de schiste avec les déchets plastiques et les débris de verre en utilisant la boîte de cisaillement de Casagrande.

IV.2. Notion de résistance au cisaillement

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).

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 ».

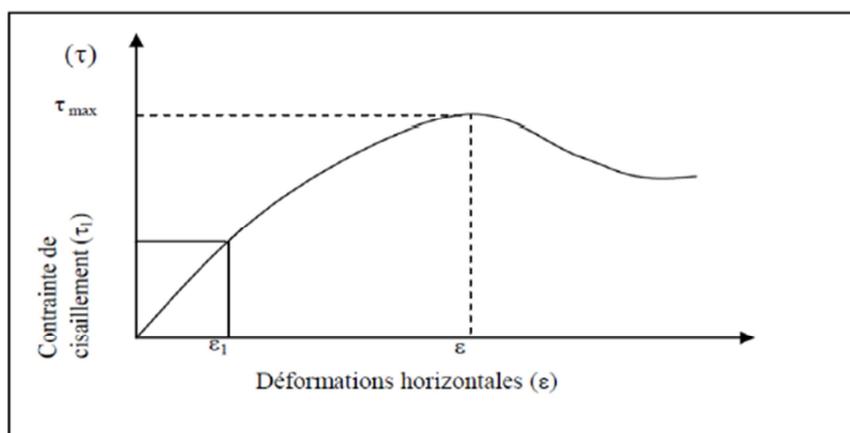


Figure VI.1 : Courbe de contraintes-déformations.

Selon le LCPC [15] 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 .

VI.3. But de l'essai

Les valeurs de la résistance au cisaillement qui s'appliquent sur le plan de rupture, ainsi définies sont portées sur un graphe en fonction de la contrainte normale illustré dans la figure VI.2. La courbe obtenue est approximativement une droite appelée « droite intrinsèque » [16].

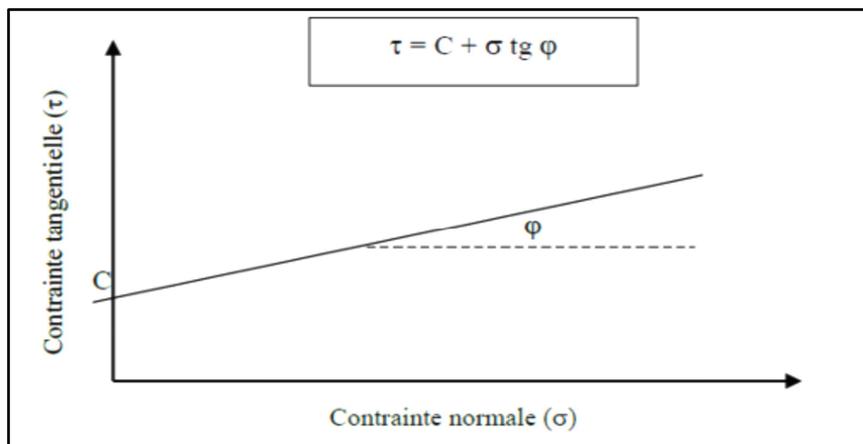


Figure VI.2 : Droite intrinsèque [16].

L'angle que fait cette droite avec l'axe des abscisses est appelé angle de frottement interne (φ) et l'ordonnée à l'origine de cette droite est appelée la cohésion (c).

L'équation de cette droite est donc :

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

VI.4. Paramètres c et φ pour différents types de sols et différents types d'essais

Trois grandes catégories de sols sont couramment rencontrées :

- Sols pulvérulents : les gravies et les sables ;
- Sols purement cohérents : argiles et limons ;
- Sols cohérents et frottant.

• Cas des 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, [37].

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 :

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

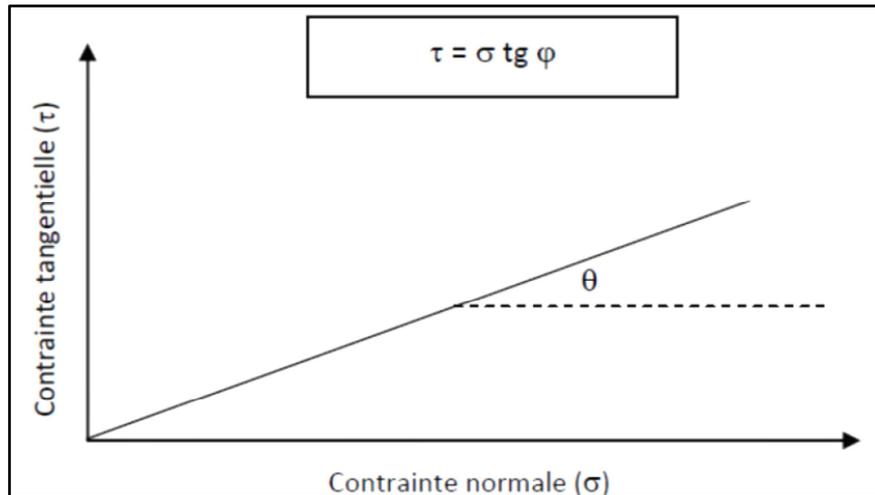


Figure VI.3 : Droite intrinsèque pour le cas des sols pulvérulents.

- **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 [37]. L'équation de Coulomb devient :

$$\tau = c$$

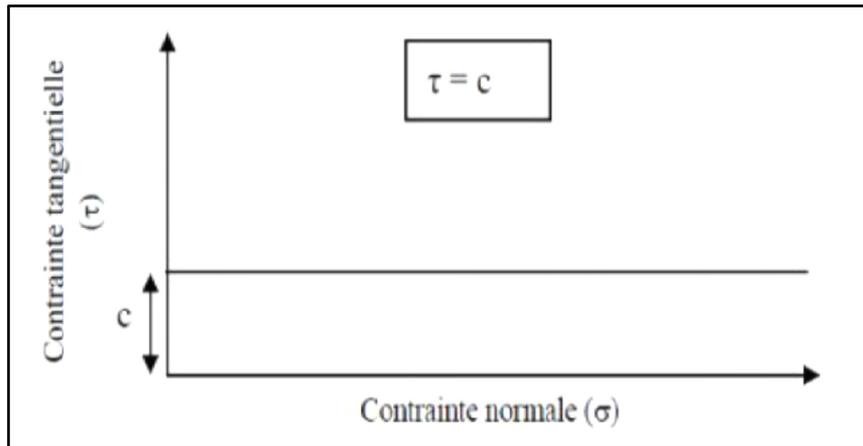


Figure VI.4 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent.

- **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).

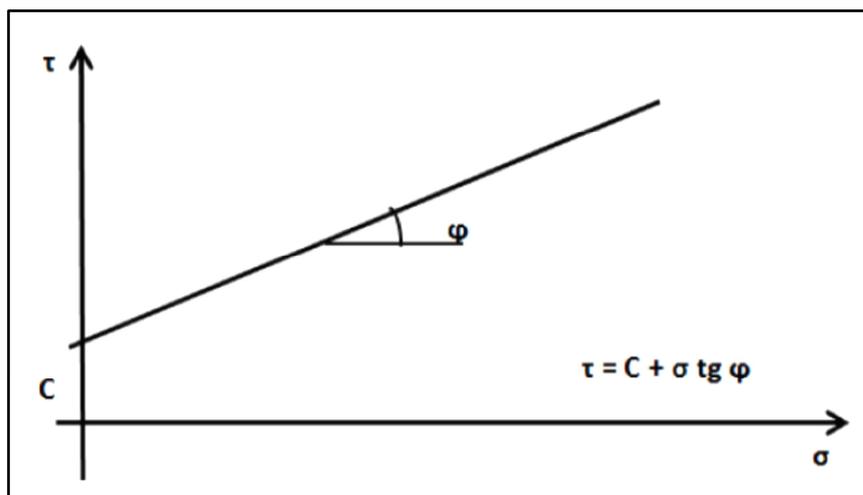


Figure VI.5 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent et frottant.

VI.5.Type d'essais peuvent être réalisés à la boîte de cisaillement

Trois types d'essais sont couramment réalisés :

- **Essai consolidé, drainé CD (Consolidated-Drained)**

Dans ce cas, l'échantillon est d'abord consolidé sous la même contrainte normale appliquée, ensuite cisailé lentement (à drainage permis, avec variation de volume) avec une vitesse de cisaillement très faible relativement à la perméabilité du sol, de telle sorte à assurer la dissipation des pressions interstitielles au cours du cisaillement ($u = 0$ le long du cisaillement). L'essai CD est très lent, il peut durer 4 à 6 semaines lorsqu'il s'agit de sols cohérents à faible perméabilité, tandis que cette durée peut se réduire sensiblement dans le cas des sols perméables. A cet effet, ce type d'essai est rarement réalisé sur les sols purement cohérents, à

l'exception des travaux de recherche. L'essai est exprimé en contrainte effective, la droite intrinsèque a pour équation :

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$$

Avec : φ' : angle de frottement effectif ;

c' : cohésion drainée.

- **Essai consolidé, non drainé avec mesure de u CU (Consolidated-Undrained)**

Pour ce type d'essai, l'échantillon est tout d'abord consolidé sous une contrainte isotrope jusqu'à dissipation des pressions interstitielles ; puis l'échantillon est cisailé à une vitesse suffisamment rapide empêchant toute dissipation des pressions interstitielles au cours de l'essai. Cet essai, plus rapide que l'essai consolidé drainé, permet malgré tout d'accéder aux caractéristiques intrinsèques du sol c' et φ' , à condition de l'interpréter en contrainte effective.

$$\tau = c_u + \sigma \operatorname{tg} \varphi_u$$

- **Essai non consolidé non drainé UU (Unconsolidated-Undrained)**

Les pressions interstitielles dans ce type d'essai ne se dissipent pas. Cet essai rapide correspond au comportement à court terme. Pendant l'essai, le volume est constant. Cet essai est interprété en contraintes totales et permet d'estimer c_u , cohésion non drainée. L'angle de frottement interne φ_u est généralement supposé nul.

VI.6. Facteurs influant sur les paramètres de résistance au cisaillement

Outre la vitesse d'application de l'effort et les conditions de drainage, la résistance du sol observée dans les essais et dans les massifs de sols en place dépend de nombreux facteurs.

Dans le cas des sols fins, argileux ou organiques, la résistance au cisaillement augmente avec la vitesse de déformation, que ce soit en comportement drainé ou en comportement non drainé. Pour tous les sols, la résistance à l'état remanié, après modification de la structure naturelle du sol, par exemple lors du prélèvement des éprouvettes soumises aux essais, diffère de la résistance du sol dans son état naturel. La plupart des sols naturels sont anisotropes. Pour cette raison, les différents types d'essais qui permettent de mesurer la résistance au cisaillement ne donnent pas tous les mêmes résultats.

Enfin, on peut définir plusieurs résistances au cisaillement, correspondant à des états de déformation différents.

- la **résistance de pic**, qui correspond à la structure initiale du sol et est atteinte pour de petites déformations (de l'ordre du pour-cent) ;
- la résistance stabilisée après le pic, ou **résistance à l'état critique**, en général égale à la résistance que l'on obtient quand le sol est remanié et que la courbe « effort-déformation » a une forme asymptotique ;
- la résistance après de grands déplacements sur une surface de rupture, appelée **résistance résiduelle** [37].

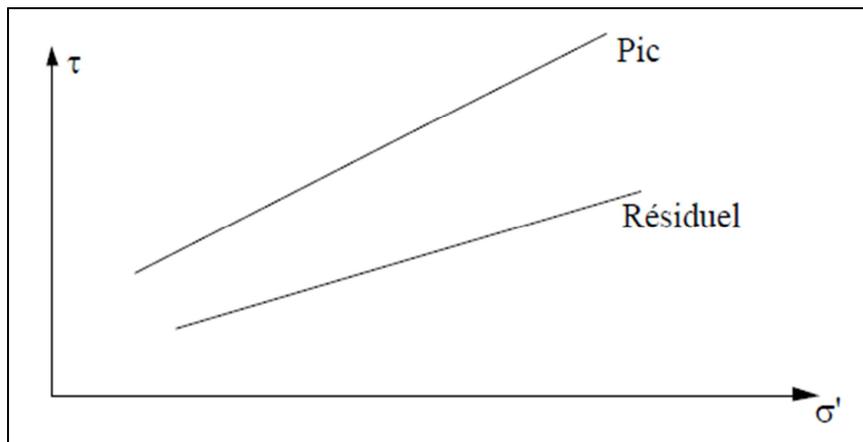


Figure VI.6 : résistance au pic, résistance résiduelle.

VI.7. Avantages et inconvénients de la boîte 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.

VI.8.Principe de l'essai de cisaillement à la boîte

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. [40].

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. [16].

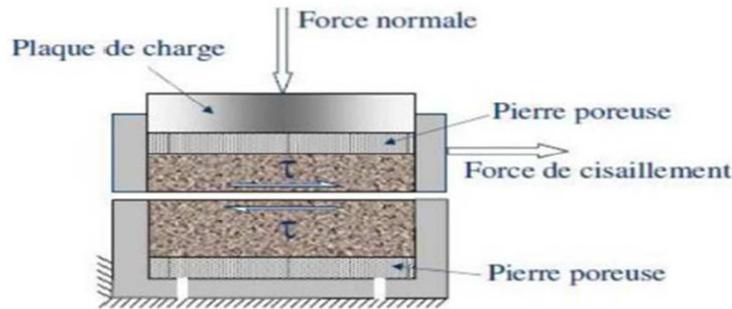


Figure VI.7 : Principe de la boîte de cisaillement.

VI .9. Mode opératoire

1. Solidariser les deux demi-bottes et mettre l'échantillon dans la boîte.
2. Placer la boîte sur le chariot et positionner les comparateurs ou capteurs pour prendre des lectures (déplacement horizontal, déplacement vertical et force tangentielle) ;
3. Appliquer sur la face supérieure un effort vertical N représentant les contraintes normales $\sigma = 100, 200$ et 300 kPa ;
4. Régler tous les comparateurs à zéro et démarrer l'essai à une vitesse constante adéquate ;
5. Prendre les lectures simultanées sur les différents comparateurs (force, déplacement horizontal et déplacement vertical), à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15 secondes);
6. 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 l'essai est poursuivi jusqu'à la fin de course.

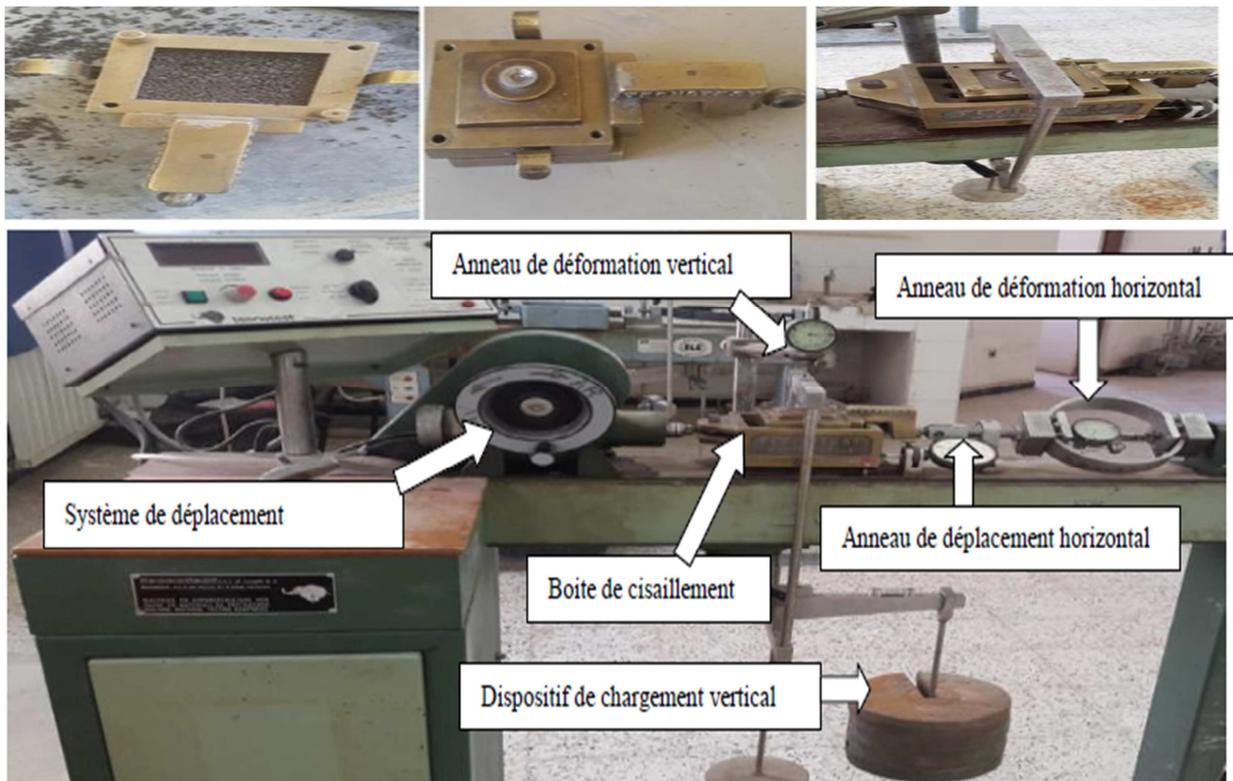


Figure VI.8 : Appareillage de l'essai de cisaillement à la boîte.

VI.10.Expression des résultats

Les essais de cisaillement direct à la boîte sont présentés sous forme de trois types de courbes, à savoir :

- Contraintes tangentielles en fonction des déplacements horizontaux ou des déformations horizontales (contraintes-déplacements ou courbe contraintes-déformations) : $\tau = f(\Delta L)$ ou $\tau = f(\Delta L/L)$;
- Déplacements (ou déformations) verticaux en fonction des déplacements (déformation) horizontaux : $\Delta L = f(\Delta L)$;
- Contraintes tangentielles en fonction de la contrainte normale, droite intrinsèques :

$$\tau = f(\sigma).$$

Pour tracer les courbes de contraintes-déformations ou contraintes-déplacements, il faut calculer les contraintes tangentielles qui sont fonction de la section (section corrigée) de l'échantillon. En effet, au cours du cisaillement, la demi-boîte inférieure se déplace par rapport à la demi-boîte supérieure dans le sens du cisaillement, ce qui fait réduire la section de l'échantillon tout le long du déplacement, ainsi, la section diminue tout le long de l'essai d'une valeur $(\Delta L \times L)$.

La contrainte tangentielle :
$$\tau = \frac{T}{S_c} \quad [\text{bar, kPa}]$$

Avec :

T : Force tangentielle de cisaillement [daN] ; S_c : section corrigée [cm^2].

S_c : La section corrigée : $S_c = L(L - \Delta L)$ [mm^2].

Avec :

L : Longueur du côté de la boîte de cisaillement ($L = 60 \text{ mm}$) ;

ΔL : Déplacement horizontal [mm] ;

ΔV : Déplacement vertical [mm].



Figure VI.9 : Échantillon après cisaillement.

VI.11.Essais réalisés

Les essais de cisaillement à la boîte sont réalisés sur les échantillons suivants :

- Schiste seul ;
- Mélange de schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre ;
- Mélange de schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre.

VI.12.Présentation des résultats

- Schiste seul

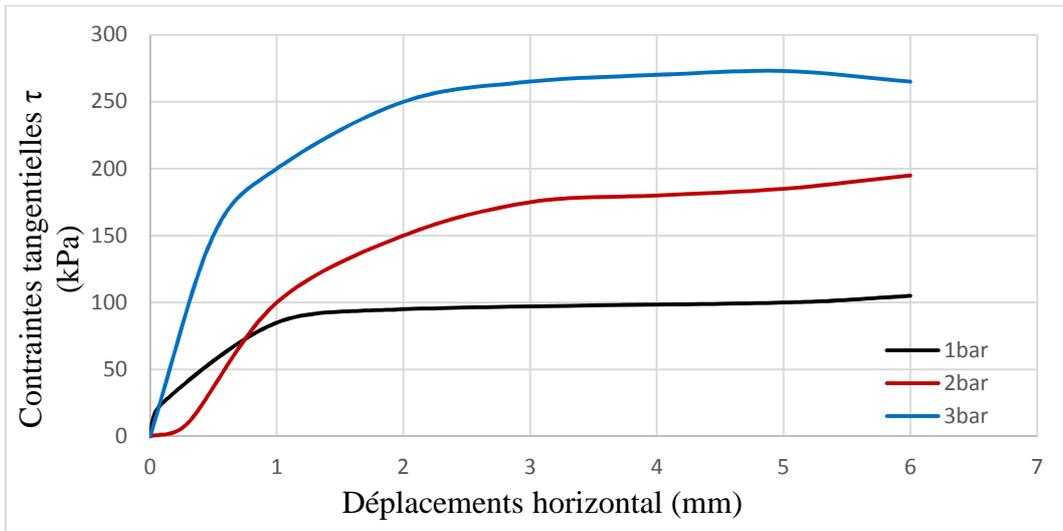


Figure VI.10 : Courbes contraintes-déformations (schiste seul).

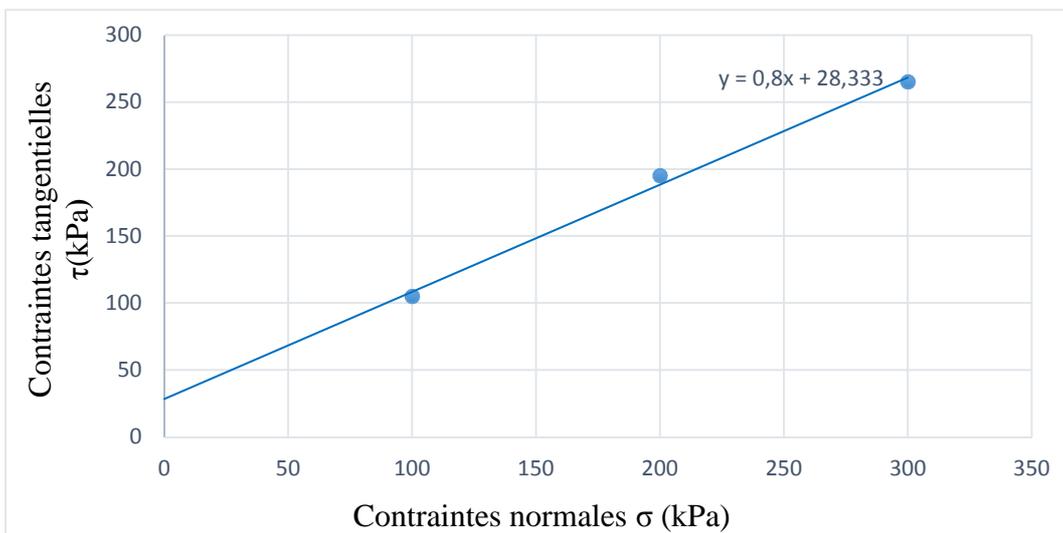


Figure VI.11 : Droite intrinsèque (schiste seul).

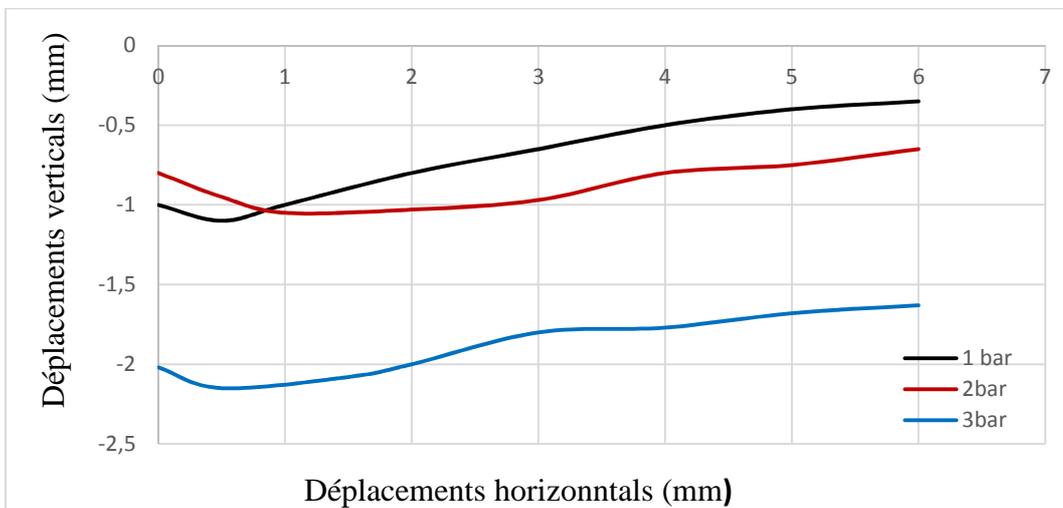


Figure VI.12 : Courbes de variation du volume (schiste seul).

• Schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre

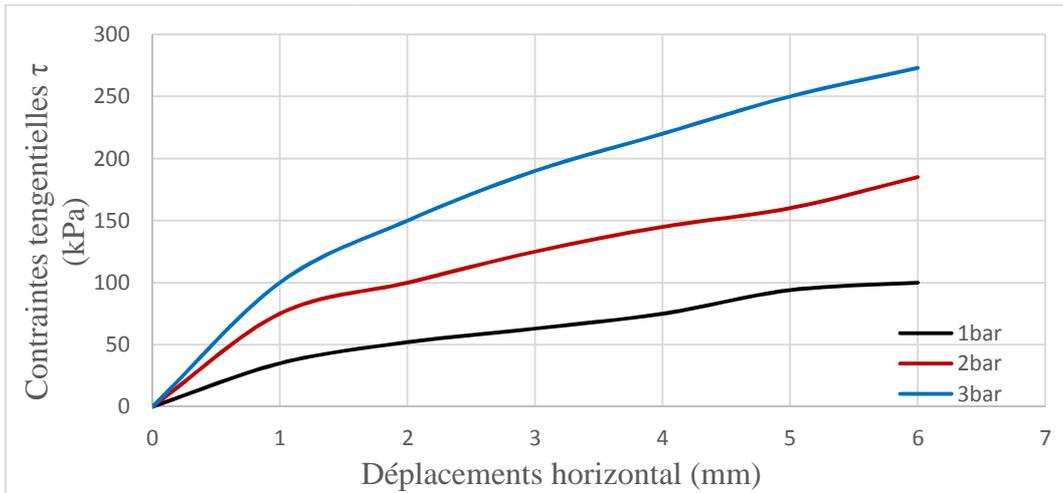


Figure VI.13 : Courbes contraintes-déformations (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

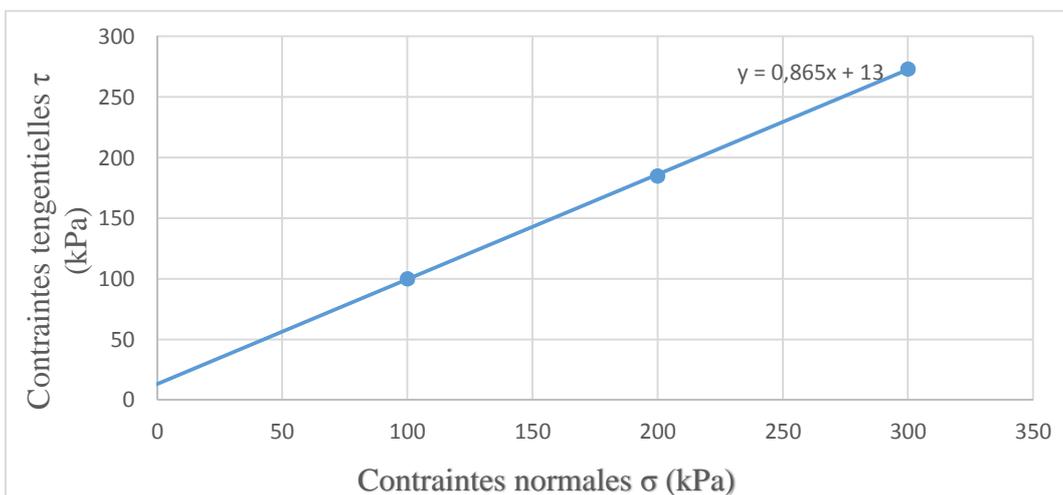


Figure VI.14 : Droite intrinsèque (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

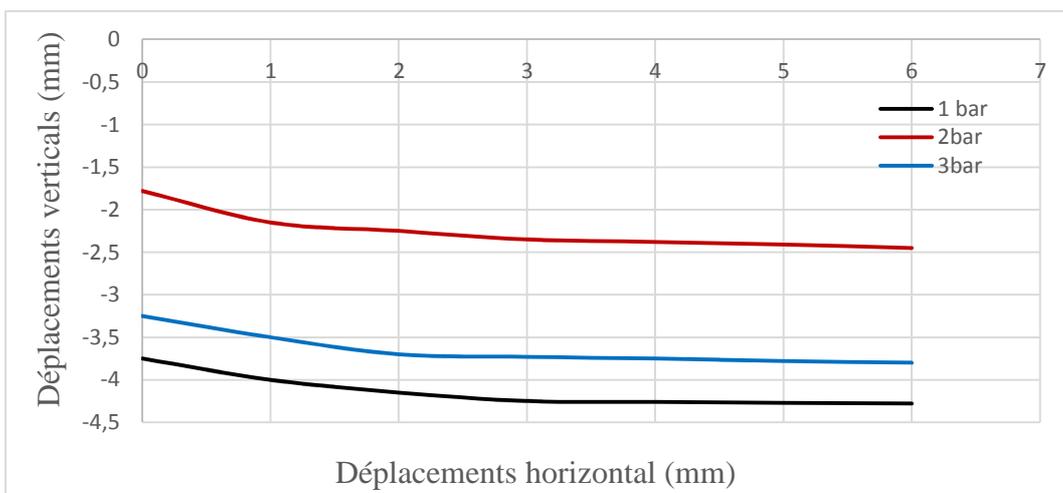


Figure VI.15 : Courbes de variation du volume (schiste + 5% de déchet plastique et débris de verre).

• Schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre

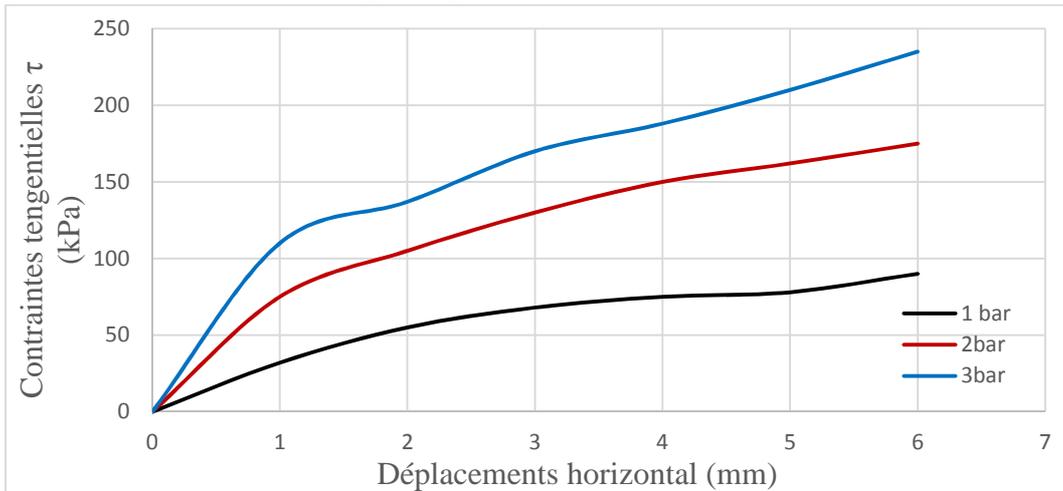


Figure VI.16 : Courbes contraintes-déformations (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

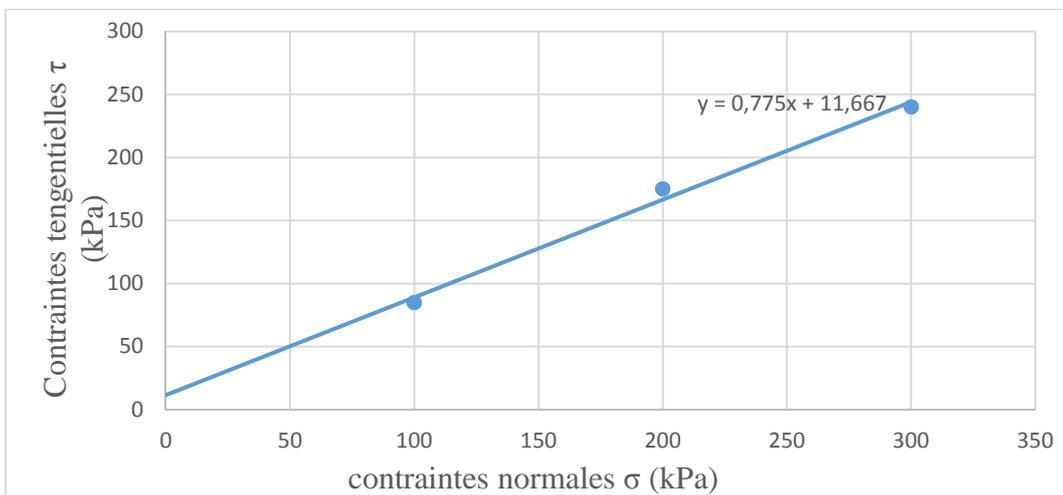


Figure VI.17 : Droite intrinsèque (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

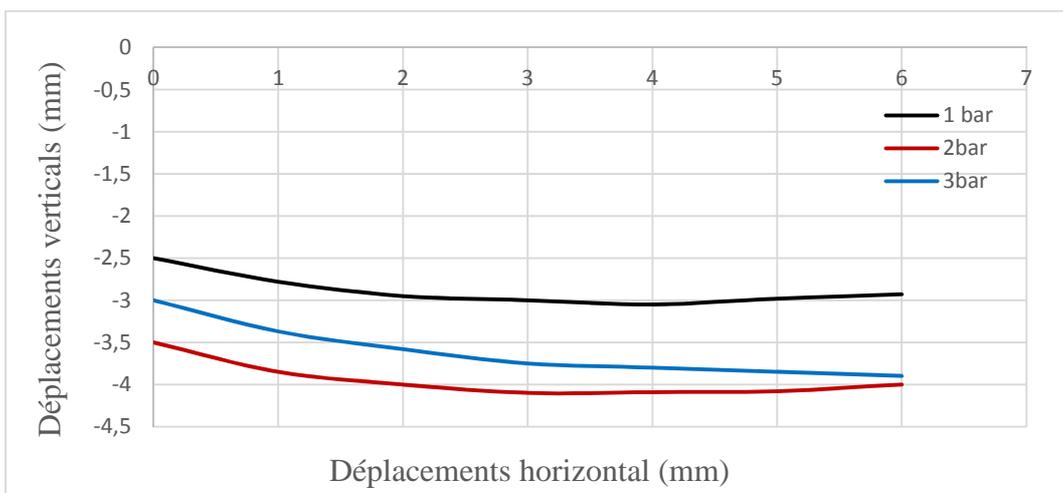


Figure VI.18 : Courbes de variation du volume (schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre).

• Schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre

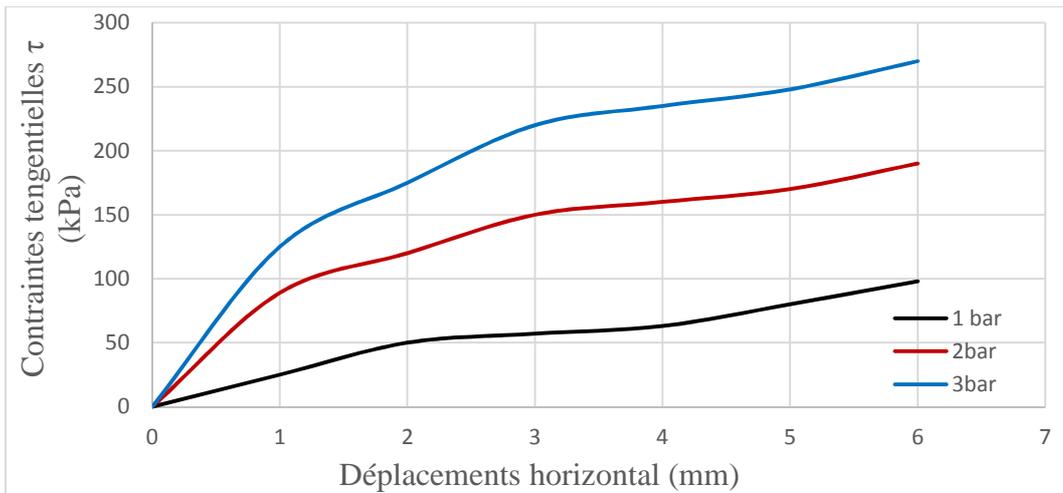


Figure VI.19 : Courbes contraintes-déformations (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

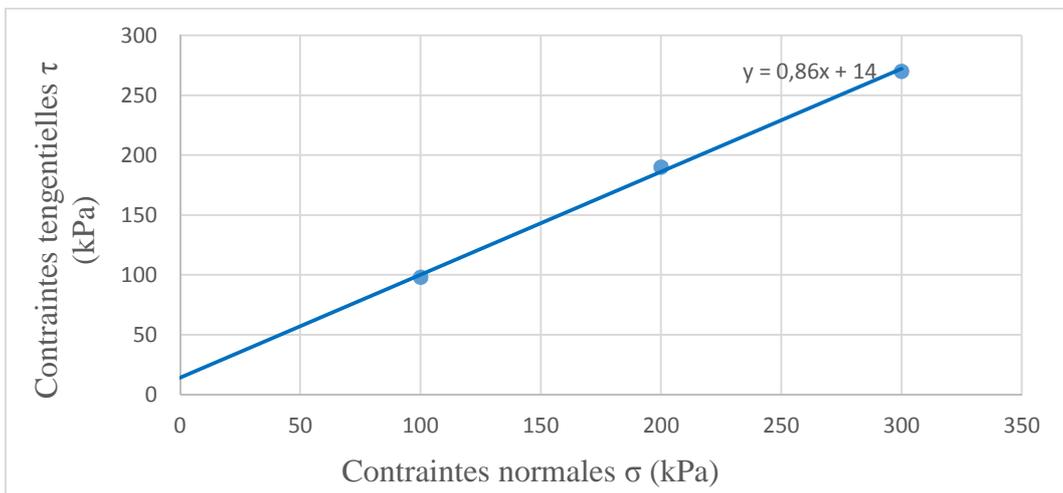


Figure VI.20 : Droite intrinsèque (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

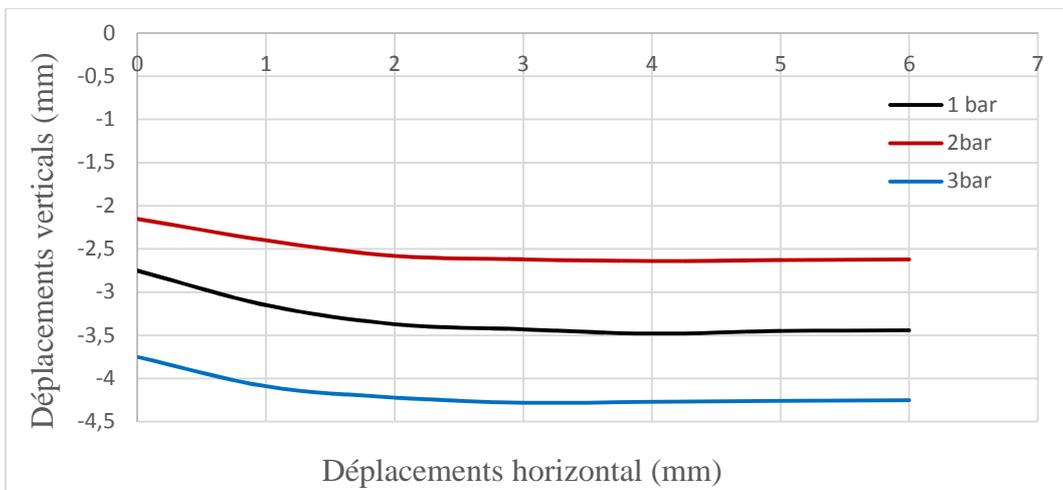


Figure VI.21 : Courbes de variation du volume (schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre).

Les courbes présentées sur les figures VI.10, VI.13, VI.16 et VI.20 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 d'avantage (enchevêtrement important) et le frottement entre eux augmente, ce qui rend leur déplacement plus difficile et fait accroître par conséquent la résistance au cisaillement de l'échantillon.

Tableau VI.1 : Récapitulatif des résultats des essais de cisaillement.

Échantillons	Angle de frottement interne ϕ (°)	Cohésion c (kPa)
Schiste + 0 % de déchet plastique et débris de verre	38.65	28.33
Schiste + 5 % de déchet plastique et débris de verre	40.85	13
Schiste + 10% de déchet plastique et débris de verre	37.77	11.67
Schiste + 15% de déchet plastique et débris de verre	40.69	14

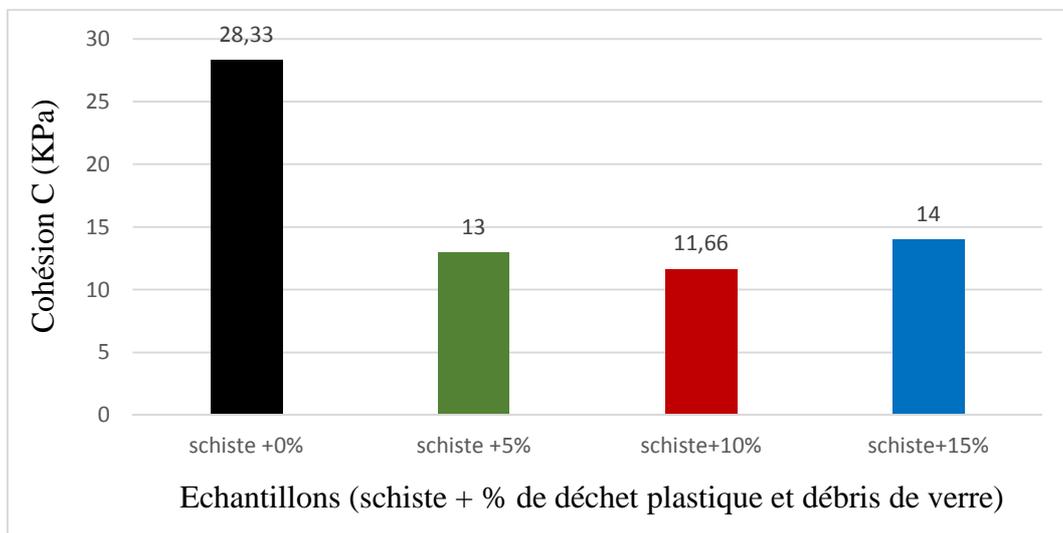


Figure VI.22 : La cohésion des différents mélanges.

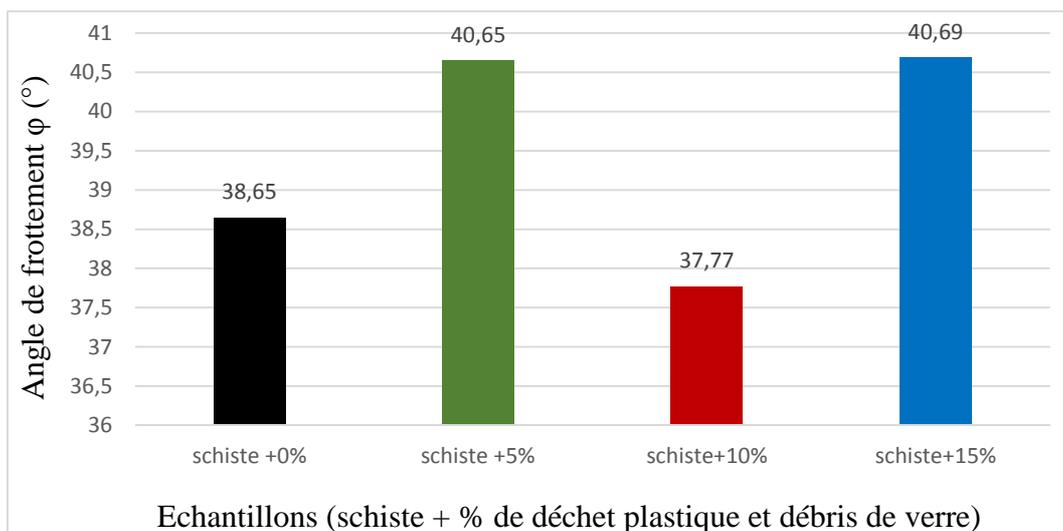


Figure VI.23 : Angle de frottement des différents mélanges.

Les caractéristiques mécaniques de cisaillement obtenues (figures VI.23 ; VI.24), montrent que l'angle de frottement interne et la cohésion ne présentent pas une variation régulière en fonction de la proportion du verre et de plastique contenues dans le mélange.

Cette variation irrégulière est due au réarrangement, à la nature et à la disposition des grains à la surface de la rupture au cours du cisaillement. En effet, la proportion des grains de plastique et du verre de forme plate en particulier, et notamment leur position verticale ou horizontale peut influencer sensiblement la résistance au cisaillement de l'échantillon. Ainsi, l'hétérogénéité des échantillons composés de différents matériaux peut être une problématique à étudier pour limiter l'irrégularité de la variation des résultats.

Toutefois, on peut dire que la cohésion du schiste seul qui est de 28 kPa environ, diminue et varie entre 11 et 14 kPa avec l'ajout des déchets de verre et du plastique. Cette diminution peut être due aux discontinuités créées par ces ajouts dans la matrice globale du matériau naturel étudié (schiste). Tandis que l'angle de frottement interne est au voisinage de 38° pour le schiste seul, alors qu'il varie entre 37° et 41°, ces valeurs sont acceptables et l'intervalle de leur variation est restreint malgré l'hétérogénéité du matériau.

Les courbes comparatives de contraintes-déformations et variation du volume en fonction de la proportion des déchets plastiques et débris de verre sous une même contrainte normale sont regroupées sur la figure ci-dessous :

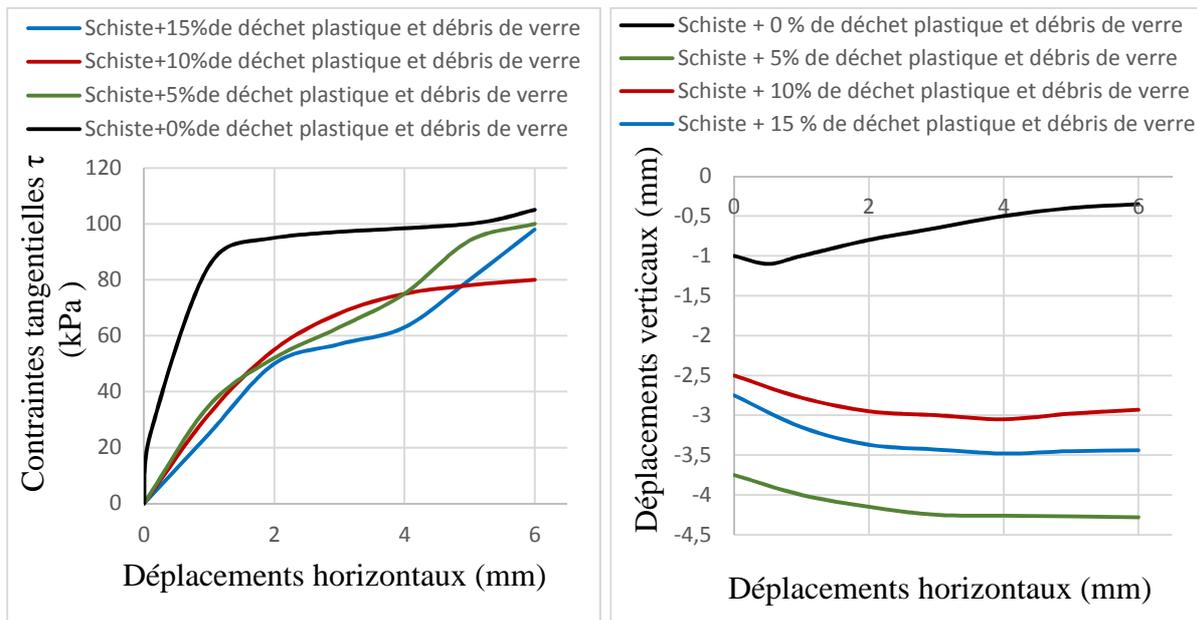


Figure VI.24 : Courbes comparatives à $\sigma = (100$ KPa).

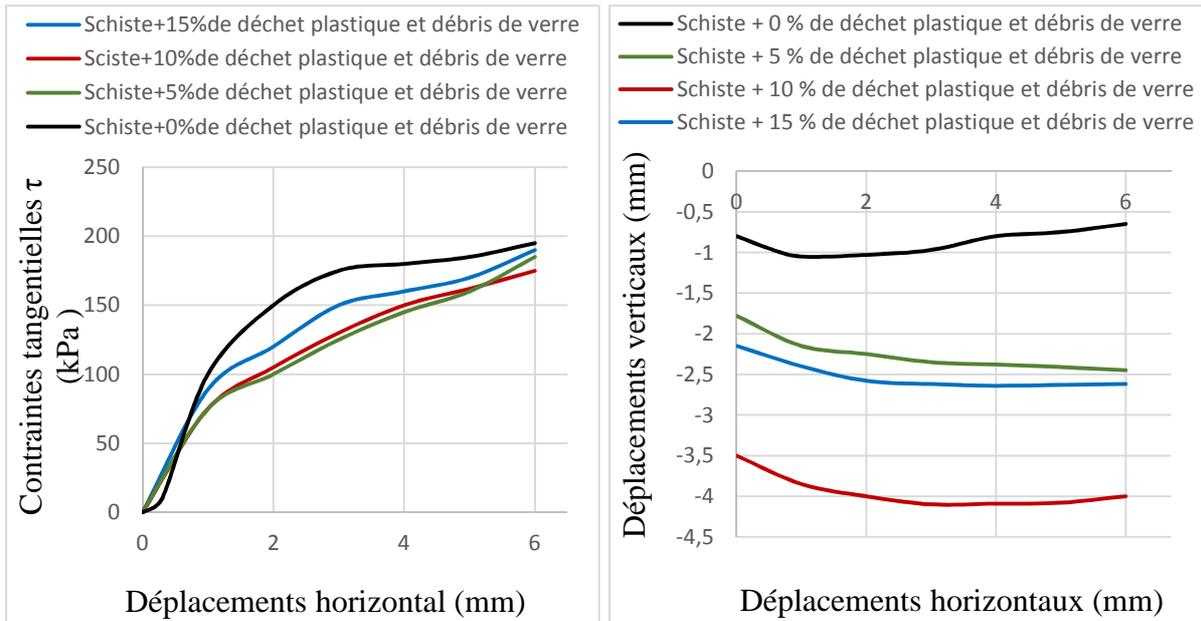


Figure VI.25 : Courbes comparatives à $\sigma = (200 \text{ kPa})$.

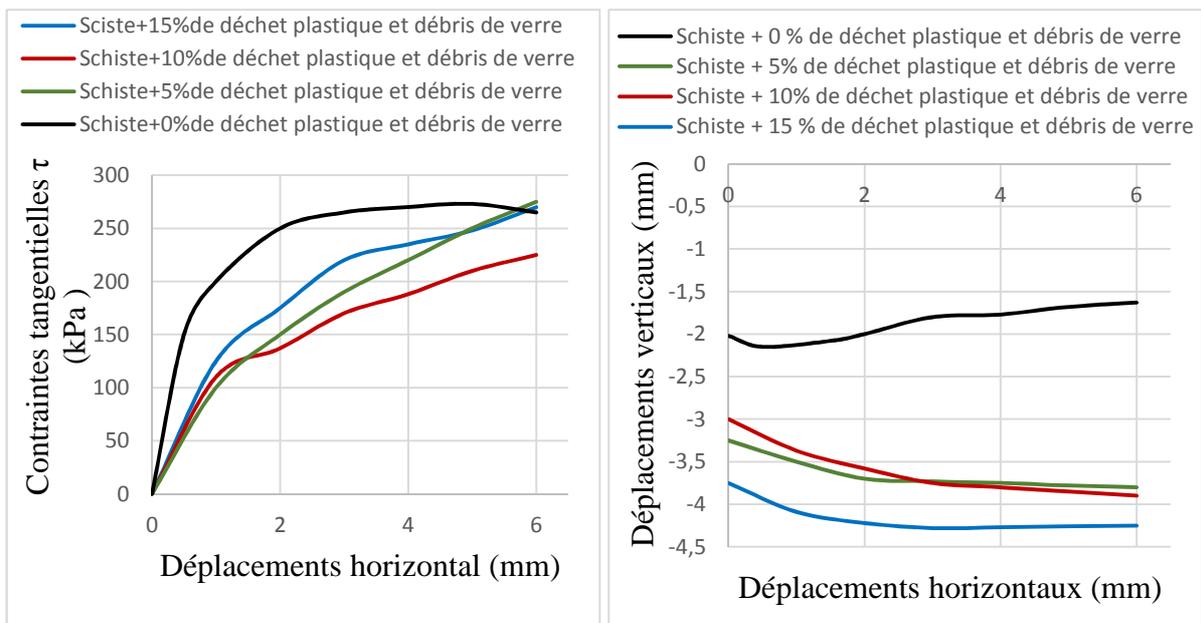


Figure VI.26 : Courbes comparatives à $\sigma = (300 \text{ kPa})$.

En se basant sur les courbes comparatives présentées sur les figures VI.24 ; VI.25 et VI.26, il est à constater d'une manière générale que le schiste seul présente de meilleures résistances au cisaillement sous les différentes contraintes normales appliquées notamment aux premiers déplacements. Après un certain temps de cisaillement les différentes courbes (schiste seul et mélanges) tendent de plus en plus à se converger et à présenter des résistances plus ou moins rapprochées.

VI.13 .Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement au cisaillement des matériaux étudiés, à savoir leurs résistances au cisaillement, leurs variations de volume et l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques en fonction de plusieurs paramètres, à savoir la variation des contraintes normales et des proportions des déchets de verre et de plastique. Dans ce type d'essais, l'hétérogénéité du matériau a fait que les résultats obtenus sont plus ou moins irréguliers en fonction de la variation des différents paramètres cités.

CONCLUSION GENERALE

Dans tous les pays du monde, le tissu urbain ne cesse de consommer des millions de tonnes de matériaux de constructions et de produire en parallèle des millions de tonnes de déchets de différente nature et sources.

Le travail réalisé s'inscrit dans le cadre général du recyclage et de la valorisation des matériaux recyclés dans le domaine du génie civil et des travaux publics. Il traite particulièrement la possibilité d'utiliser les déchets de plastique et les débris de verre (simultanément) comme granulats pour les corps de chaussées (couches de fondation et couches de base). Ceci est fait à base de mélanges constitués de granulats naturels (schiste) avec des déchets de plastiques et de verre à différentes proportions.

Cette pratique permet d'une part, de se débarrasser des quantités importantes des déchets de plastiques et de verre jetés dans des décharges inappropriées et anarchiques dans la nature. D'autre part, le recyclage permet de libérer les espaces occupés par ces matériaux (décharges) et de compenser le manque en granulats dont souffrent certaines régions.

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons reconstitués à base de mélanges de schiste et de déchets plastique et débris de verre permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les mélanges étudiés développent des densités sèches réduites comparativement à celles développées par le schiste seul, néanmoins, elles restent assez importantes (supérieures à 2) et satisfaisantes comparativement aux seuils fixés par les normes dans le cas d'un matériau routier.
- L'ajout des déchets de plastique et des débris de verre améliore par contre sensiblement la portance des mélanges même en présence d'eau (après immersion). Ces résultats sont très intéressants et dépassent les qualités espérées pour ce type de matériaux. En outre, les matériaux étudiés présentent des gonflements nuls en présence d'eau.

Les mélanges étudiés 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, les résultats obtenus pour les échantillons étudiés présentent des résistances faibles à moyennes, comparativement aux matériaux modèles de référence, par contre, la résistance à l'usure s'améliore au fur et à mesure que la teneur en ajouts augmente. Par ailleurs, les essais de dégradabilité et de fragmentabilité révèlent respectivement que les matériaux schiste et déchets de plastique et débris de verre sont peu dégradables sous sollicitations hydriques et peu fragmentables sous sollicitations mécaniques.

Les mélanges étudiés (schiste + déchets plastique et débris de verre) présentent ainsi des comportements et des propriétés mécaniques très intéressantes. Ces résultats permettent de les proposer initialement pour une utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic, notamment en couches de forme et en couches de fondations à condition de ne pas dépasser les 15% d'ajouts de déchets plastique et débris de verre.

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. Et enfin, de les présenter en pratique dans un tronçon de route (tronçon d'essai) afin de vérifier leur comportement réel sous les sollicitations du trafic et des agents climatiques.

Ce travail de recherche peut présenter plusieurs intérêts en géotechnique routière, notamment pour notre région, tant sur l'aspect économique et sur l'aspect écologique et environnemental, entre autres :

- La préservation des gisements alluvionnaires et l'exploitation de nouvelles sources de granulats permettant d'assurer la continuité d'approvisionnement des projets, et par conséquent à économiser du temps et donc de l'argent.
- Pour les acteurs de l'environnement, l'élimination des déchets de plastique et de verre contribue fortement à la préservation des ressources naturelles et à la limitation des risques de pollution.
- La contribution au développement de la filière du recyclage qui est un domaine ouvert à l'innovation en associant les universitaires et les entreprises, notamment dans les pays en voie de développement tels que l'Algérie. Ces derniers offrent un champ fertile de matériaux à recycler (béton, plastique, verre, laitier ...) dont l'utilisation peut être élargie à plusieurs domaines de génie civil, ce qui ouvre de nouveaux postes d'emploi.

Cependant, la voie reste ouverte à d'autres possibilités d'utilisation de ces matériaux et d'autres permettant ainsi d'élargir la gamme des matériaux de construction, de réduire les déchets à la source et de développer l'utilisation des matériaux recyclés dans les chantiers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : **A.N.D**, (Agence Nationale des Déchets), 2015- Schéma Directeur de gestion des déchets ménagers et assimilés de la commune de Tizi Ouzou.
- [2] : **Bense P**, 1987, CETE de l'est, Ministère de l'équipement du logement de l'aménagement du territoire et des transports, Enrobés bitumineux renforcés par addition de déchets plastiques.
- [3] : **Boukhari A et al, Masterials** 01-05 mars 2015. Béton Bitumineux Modifiés en déchets plastiques, Université Kasdi Merbah - Faculté des Sciences Appliqués « FSA ».
- [4] : **Brunel .h**, (2005) cour de route université d'Orléans I.U.T de bourges département génie civil. Bruxelles. 605-619.
- [5] : **Coquand. R**, (1978). Routes (Circulation – Tracé – Construction), livre II, Construction et Entretien, 6eme éditions, Eyrolles.
- [6] : **CTTP, 2001** : Organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics, catalogue de dimensionnement des chaussées neuves.
- [7] : **Degoutte**, cemagref édition, (2002). Petit barrage : recommandation pour la conception, la réalisation et suivi.
- [8] : **Dyer T D et Dhir R K., 2001**. Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component, Journal of Material in Civil Engineering.
- [9] : **El Gonnouni et al, 2005**, Méthode géostatistique pour analyser le déplacement des sols de la construction urbaine souterraine.
- [10] : **Fontanille M et Gnanou Y**, 2014. Chimie et physico-chimie des polymères, Dunod, coll, troisième édition, 576 p.
- [11] : **François. M**, 2016. Projet de la commission Patrimoine géologique de Réserves Naturelles de France.
- [12] : **Henry K S., 1997**. Frost Susceptibility of Crushed Glass Used as Construction Aggregate, Journal of Cold Regions Engineering.
- [13] : **Jerzy Zarzycki**, 1982, Les verres et l'état vitreux, Masson, 391 p.
- [14] : **Kowanou H et al**, 2014, Effets de l'incorporation du fondu de déchets de sachets plastiques sur la consistance du bitume et la stabilité du béton bitumineux, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquées (LEMA), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), Université d'Abomey-Calavi (UAC), Bénin, Afrique SCIENCE.
- [15] : **LCPC 21 ., 1987**. Essai de cisaillement a la boite'' méthodes d'essai n° 21, Laboratoire centrale des ponts et chaussées.

- [16] : **LCPC**, (1987). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Essai de cisaillement a la boite.
- [17] : **LCPC**, (1994). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Guide Technique, Conception et dimensionnement des structures de chaussées.
- [18] : **LCPC**, (1998). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Catalogues des dégradations de surface des chaussées.
- [19] : **LE Monde Afrique**- article de Josiane Kouagneu, Journal du 17.08.2016.
- [20] : **MELBOUCI .B**, (2006). Etude du phénomène d'écrasement des grains de schiste au compactage. RFG, N° 117, 4° trimestre. Revue Française de Géotechnique (France) ISSN : 0181 – 0529.
- [21] : Norme AFNOR C.B.R (NF P 94 – 078).
- [22] : Norme AFNOR dégradabilité des sols (NF P 94-056).
- [23] : Norme AFNOR essai Micro-Deval (NFP 18-572).
- [24] : Norme AFNOR essai los Angeles (NF P 18-573).
- [25] : Norme AFNOR fragmentabilité des sols (NF P 94-066).
- [26] : Norme AFNOR la teneur en eau (NF P 94 – 050).
- [27] : Norme AFNOR le cisaillement (NF P 94-71 - 1).
- [28] : Norme AFNOR Masse volumique des grains solides (NF P 94 - 054).
- [29] : Norme AFNOR Masse volumique sèche (NF P 94 - 064).
- [30] : Norme AFNOR Masse volumique des sols fins (NF P 94-053)
- [31] : NF EN 13-285 (2010). Graves non traités –spécifications.
- [32] : **Peron A**, (1883). Essai d'une description géologique de l'Algérie, G. MASSON, ÉDITEUR
- [33] : **Pierre Bédard**, 2009, Clef d'identification visuelle des minéraux communs.
- [34] : **Public Works, 1994**. Waste Glass Serves as Road Aggregate, Public Works, 52–53 and 94.
- [35] : **Raad L., 1992**. Final report. Potential Utilization of Recycled Waste Glass in Alaska Pavements Transportation Research Center Institute of Northering, School of Engineering, University of Alaska-Fairbanks.

- [36] : **Recherche Routière**, Paris 1977. Utilisation des déchets et sous-produit en technique routière.
- [37] : **Robitaille V, Tremblay D**, (1997). Mécanique des sols (Théorie et pratique).Edition modulo.
- [38] : **Rogel L et Engelke P.**, 1997. Glass as a Road Base Substitute, Garcla and Wright Consultant, Public Works, PP 41-46.
- [39] : **SETRA**, édition(1996). Service technique des routes et autoroutes. Guide pratique, l'entretien courant des chaussées.
- [40] : **Techouani Nana. J.M** (1999). (Cours de mécanique des sols. Tome 1, Propriété des sols).Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Group EIERETSHER
- [41]: **Wartman J, Grubb D G ET Nasim S M**, (2004). Select Engineering, Characteristics of Crushed Glass, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE.
- [42]: **Zeyher A.**, 2002. Viewing the Fill as Half Glass, Idaho Transportation Department, Recycles as Road Fill, PP 12-16.

Cybergraphie

- [43] : <https://docplayer.fr/46208090-Les-essais-de-la-geotechnique-routiere.html>
- [44] : <https://fr.slideshare.net/ceteausarl/entretien-courant-chaussees>
- [45] : <https://geniecivilpdf.com/generalites-sur-les-chaussees/>
- [46] : http://www.cotita.fr/IMG/pdf/Typologies_de_degradation_de_chaussees.pdf
- [47] : <http://www.huissierweb.com/blog/2017/01/30/constat-de-voirie/affaissement-de-rive/>
- [48] : <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/schiste>
- [49] : <http://www.pft-travauxpublics-limousin.com/files/PFE-dossier-1IUTt.pdf>
- [50] : <https://geniecivilpdf.com/generalites-sur-les-chaussees/>
- [51] : <https://www.wikitp.fr/structure-de-chausseeacutes/les-differents-types-de-chaussees>
- [52] : <https://www.wikitp.fr/essais-de-sol/essai-proctor>