

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU (UMMTO)
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Mémoire de Master 2

Spécialité : Génie Civil
Option : Géotechnique et environnement

Thème

Etude du comportement d'un mélange de marne et de déchets plastiques dans les corps de chaussées

Présenté par : *M^{elle} OUALI Leticia*

Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir.....Professeur à l'UMMTO.....Président.
M^{elle} BELHASSANI Ouarda.....Maitre assistante A à l'UMMTO.....Examinatrice.
Mr BOUDLAL OmarMaitre de conférences B à l'UMMTO.....Promoteur.

Promotion : 2016/2017

SOMMAIRE
DEDICACES**REMERCIEMENTS****LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES****LISTE DES FIGURES****LISTE DES TABLEAUX**

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES ET MATERIAUX ROUTIERS	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition et constitution d'une chaussée.....	3
I.2.1. La couche de forme.....	4
I.2.2. La couche d'assise.....	4
I.2.3. La couche de surface.....	5
I.2.4. Accotements.....	6
I.3. Différentes structures de chaussées.....	6
I.3.1. Les chaussées souples.....	6
I.3.2. Les chaussées bitumineuses épaisses.....	7
I.3.3. Les chaussées à assise traité aux liants hydrauliques.....	7
I.3.4. Les chaussées à structure mixte (semi-rigide).....	8
I.3.5. Les chaussées à structure inverse (semi-rigide).....	9
I.3.6. Les chaussées en béton de ciment (chaussées rigide).....	9
I.3.6.1. Chaussée à dalle non goujonnées avec fondation.....	9
I.3.6.2. Chaussée à dalles goujonnées avec fondation.....	10
I.3.6.3. Chaussée à dalles sans fondation.....	10
I.3.6.4. Chaussée en béton armé continu.....	10
I.4. Géométrie et dimensionnement d'une chaussée.....	11
I.5. Dégradations des chaussées.....	11
I.5.1. Les ondulations.....	11
I.5.1. Les ondulations.....	11
I.5.2. Les ornières.....	11
I.5.3. Les fissures de centre.....	11
I.5.4. Les fissures longitudinales.....	12

I.5.5. Les fissures transversales.....	12
I.5.6. Les fissures latérales.....	12
I.5.7. Fissures en Lézard.....	12
I.5.8. Fissurations polygonales.....	12
I.5.9. Nid de poule.....	12
I.6. Matériaux routiers : les granulats.....	13
I.6.1. Définition des granulats.....	13
I.6.2. Caractérisation des granulats.....	13
I.6.2.1. La granularité.....	13
I.6.2.2. Caractéristiques intrinsèques des gravillons.....	14
I.6.3. Types de granulats.....	14
I.6.3.1. Granulats naturels.....	14
I.6.3.1.1. Granulats d'origine minéralogique	14
I.6.3.1.2. Granulats de roches meubles	14
I.6.3.1.3. Granulats de roches massives	15
I.6.3.2. Granulats artificiels.....	16
I.6.3.2.1. Sous-produits industriels, concassés ou pas	16
I.6.3.2.2. Granulats à hautes caractéristiques	17
I.6.3.3. Granulats recyclés.....	18
I.7. Conclusion	18

CHAPITRE II : VALORISATION DES DECHETS

II.1. Introduction.....	19
II.2. Définition des déchets.....	19
II.3. Classification des déchets.....	19
II.3.1. Les déchets ménagers et assimilés	20
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.....	22
II.5.1. Définition du traitement des déchets.....	22

II.5.2. Définition de la valorisation.....	23
II.5.3. Différents types de valorisation des déchets.....	23
II.5.3.1. Valorisation énergétique	23
II.5.3.2. Valorisation organique	23
II.5.3.3. Valorisation de la matière : Le recyclage.....	24
II.5.3.3.1. Les différentes filières du recyclage.....	24
II.6. Valorisation des déchets plastiques.....	26
II.6.1. Pourquoi le plastique?	26
II.6.1.1. Définition des matières plastiques.....	26
II.6.1.2. Les différents types de plastiques et leurs appellations.....	27
II.6.1.3. Propriétés des matières plastiques.....	27
II.6.2. Les valorisation des déchets plastique dans le domaine routier et le génie civil.....	28
II.7. Etude socio-économique du projet.....	30
II.7.1. Aspect historique.....	30
II.7.2. Aspect technique du projet.....	30
II.7.3. Technologie retenue et équipement nécessaire.....	31
II.7.4. Description des travaux de réalisation.....	31
II.7.5. Evaluation socio-démographique.....	31
II.7.6. Evaluation économique.....	32
II.7.6.1. cout du plastique.....	32
II.7.6.2. Cout des granulats naturels.....	32
II.7.7. Evaluation environnementale.....	32
II.7.8. Intégration du projet au sens d'une économie cyclique.....	33
II.8. Conclusion.....	34

CHAPITRE III : PREPARATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1. Introduction.....	35
III.2. Matériaux utilisés.....	35
III.3. Déchets plastique.....	35
III.4. La marne.....	36
III.4.1 Genèse des roches	36
III.4.2. Description de la Marne	37
III.4.3. Type de marne	38

III.4.4. Utilisation divers de la marne	38
III.4.5. Site d'extraction de la marne étudiée.....	38
III.5. Concassage et tamisage de la marne.....	38
III.6. Essais d'identifications	41
III.6.1. La teneur en eau (w)	41
III.6.1.1. Présentation des résultats.....	42
III.6.1.2. Interprétation des résultats.....	42
III.6.2. Masse volumique des sols.....	43
III.6.2.1. Masse volumique des grains solides des sols ρ_s par la méthode du pycnomètre (NF P 94 – 054)	43
III.6.2.1.1. Présentation des résultats	43
III.6.2.2. Masse volumique humide des sols ρ_h par pesée hydrostatique (NF P 94-064)	44
III.6.2.2.1. Présentation des résultats	45
III.6.2.3. Masse volumique sèche ρ_d (NF P 94-064)	45
III.6.2.3.1. Présentation des résultats.....	45
III.6.2.3.2. Interprétation des résultats.....	45
III.6.3. L'indice des vides « e »	46
III.6.3.1. Présentation des résultats	46
III.6.3.1.1. Interprétation des résultats.....	46
III.6.4. le degré de saturation S_r	46
III.6.4.1. Interprétation des résultats.....	47
III.6.5. Limites d'Atterberg (NF P 94-051).....	47
III.6.5.1. Limite de liquidité W_l	47
III.6.5.1.1. Appareillage.....	47
III.6.5.1.2. Présentation des résultats.....	48
III.6.5.2. La limite de plasticité W_p	49
III.6.5.2.1. Présentation des résultats.....	49
III.6.5.2.2. Interprétation des résultats.....	49
III.6.6. Valeur de bleu de méthylène VBS, essai à la tâche (NF P 94-068).....	49
III.6.6.1. Présentation des résultats.....	51
III.6.6.2. Interprétation des résultats	51
III.7. Préparation du mélange de marne et de déchets plastiques.....	51
III.8. Conclusion.....	52

CHAPITRE VI : COMPACTAGE PROCTOR ET CBR

IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Définition et principe de base du compactage	53
IV.3. Facteur influant le compactage.....	53
IV.3.1. L'influence de la teneur en eau.....	54
IV.3.2. L'influence de l'énergie de compactage.....	54
IV.3.3. L'influence de la granulométrie.....	54
IV.4. Les essais de compactage en laboratoire.....	55
IV.5. Les essais Proctor.....	56
IV.5.1. L'essai Proctor normal	56
IV.5.2. L'essai Proctor modifié.....	56
IV.5.2.1. Principe de l'essai Proctor modifié.....	57
IV.5.2.2. Appareillage.....	57
IV.5.2.3. Mode opératoire	58
IV.5.2.4. Présentation des résultats.....	59
IV.5.2.5. Interprétation des résultats	64
IV.6. Essai de portance CBR (California Bearing ratio), (NF P 94-078).....	65
IV.6.1. Principe de l'essai CBR.....	65
IV.6.1. Appareillage.....	65
IV.6.2. Exécution de l'essai CBR.....	66
IV.6.3. Présentation des résultats.....	67
IV.6.4. Interprétation des résultats	70
IV.7. Conclusion	72

CHAPITRE V : FRAGMENTATION ET DEGRADATION DES MATERIAUX ETUDIÉS

V.1. Introduction.....	73
V.2. Essai Los Angeles.....	73
V.2.1. Appareillage.....	73
V.2.2. Mode opératoire	74
V.2.3. Présentation des résultats.....	75

V.2.4. Interprétation des résultats.....	76
V.3. Essai Micro Deval.....	76
V.3.1. Appareillage.....	76
V.3.2. Mode opératoire.....	77
V.3.3. Présentation des résultats.....	78
V.3.4. Interprétation des résultats.....	78
V.4. Classification des matériaux en se basant sur L_A et M_{DE}	79
V.5. Essai de fragmentabilité (NF P 94 – 066).....	79
V.5.1. Appareillage.....	80
V.5.2. Mode opératoire.....	80
V.5.3. Présentation des résultats.....	81
V.5.4. Interprétation des résultats.....	82
V.6. Essai de dégradabilité (NF P 94 – 067).....	82
V.6.1. Appareillage.....	82
V.6.2. Mode opératoire.....	83
V.6.3. Présentation des résultats.....	83
V.6.4. Interprétation des résultats.....	84
V.7. Conclusion.....	84
CHAPITRE VI : CISAILLEMENT A LA BOITE DE CASAGRANDE	
VI.1. Introduction.....	85
VI.2. Notion de résistance au cisaillement.....	85
VI.3. But de l'essai.....	86
VI.4. Paramètres de cohésion c et angle de frottement interne ϕ	86
VI.5. Type d'essais de cisaillement à la boîte (UU, CU, CD).....	87
VI.6. Facteurs influant les paramètres de résistance au cisaillement.....	88
VI.7. Appareillage.....	88
VI.8. Principe de l'essai.....	89
VI.9. Mode opératoire et déroulement de l'essai.....	89
VI.10. Expression des résultats.....	90
VI.11. Présentation des résultats.....	91
VI.12. Conclusion.....	99
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	100

Références bibliographiques

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents.

Mes très chers frères.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement *M^r* BOUDLAL Omar, qui a accepté d'encadrer mon travail, pour son aide précieuse, pour le temps qu'il a bien voulu me consacrer et pour m'avoir accompagné tout au long de ce travail.

Merci à *M^{me}* VAN DER STREATEN Paule, *M^{me}* HOUGARDY Marcy ancienne fonctionnaire du Ministère de l'équipement et du transport, Belgique et *M^r* JANSSENS Benoit géologue du centre de recherches routières de Belgique de m'avoir envoyé de précieux supports de documentations.

Merci à *M^r* SAHRAOUI Amar, Géotechnicien et ancien directeur du Laboratoire de l'Habitat et de la Construction du Centre (L.H.C.C) de Tizi Ouzou, pour ces conseils.

Merci à *M^r* BOUKHERROUB *M^{ed}* Ameziane ancien responsable du laboratoire pédagogique de MDS du département de génie civil de Tizi Ouzou, pour m'avoir orienté et aidé dans mon travail.

Je remercie mes parents pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Je remercie mes camarades et surtout AIT TALEB Kader et AIT MALEK Rahim, pour leurs aides et leurs solidarités dans le travail.

Je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.

Je tiens également à remercier Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (U.M.M.T.O), d'avoir accepté de présider le jury de soutenance du présent mémoire.

J'adresse mes plus vifs remerciements à *M^{elle}* BELHASSANI Ouarda, Maitre assistante A à l'UMMTO d'avoir accepté de juger mon travail.

LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

w : Teneur en eau naturelle ;
wl : Teneur en limite liquidité ;
wp : Teneur en limite de plasticité ;
wr : Teneur en limite de retrait ;
Ip : Indice de plasticité ;
E : Indice des vides ;
ID : Indice de densité ;
Sr : Degré de saturation ;
n : Porosité ;
wsat : Teneur en eau saturée ;
 ρ : Masse volumique total ;
 ρ_w : Masse volumique de l'eau ;
 ρ_s : Masse volumique des grains solide ;
 ρ_h : Masse volumique humide ;
 ρ_d : Masse volumique sèche ;
Ms : Masse des grains solides ;
Mh : Masse humide ;
M : Masse totale ;
Vw : Volume de l'eau ;
Vs : Volume des particules solides ;
Va : Volume de l'air ;
Vv : Volume des vides ;
Vt : Volume total ;
VBS : Valeur au bleu de méthylène ;
Mb : Masse au bleu de méthylène ;
Ms : Masse sèche de la prise d'essai ;
V : Volume de solution de bleu utilisée ;
Wopt : Teneur en eau optimale de l'essai Proctor ;
 $\rho_{d_{opt}}$: Masse volumique optimale ;
G : Gonflement linière relatif ;

τ : Contrainte de cisaillement ;

Δh : Déplacement vertical ;

ΔL : Déplacement horizontal ;

$\bar{\sigma}$: Contrainte normale totale ;

C : Cohésion ;

φ : Angle de frottement interne ;

L_A : Coefficient Los Angeles ;

M_{DE} : Coefficient Micro Deval.

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure.I.1 : Constitution d'une chaussée	3
Figure.I.2 : Charges verticales induites par le trafic.....	4
Figure.I.3 : Constitution d'une chaussée souple.....	6
Figure.I.4 : Fonctionnement d'une chaussée souple.....	6
Figure.I.5 : Constitution d'une chaussée bitumineuse épaisse.....	7
Figure.I.6 : Constitution d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.....	7
Figure.I.7 : Fonctionnement d'une chaussée semi-rigide.....	8
Figure.I.8 : Constitution d'une chaussée à structure mixte.....	8
Figure.I.9 : Constitution d'une chaussée à structure inverse.....	9
Figure.I.10 : Constitution d'une chaussée en béton de ciment.....	9
Figure.I.11 : Joints de dilatation avec goujon longitudinal.....	10
Figure.I.12 : Armature filante d'une dalle en béton armé.....	10
Figure.I.13 : Types de dégradations des chaussées.....	12
Figure.I.14 : Familles de granulats.....	13
Figure.I.15 : Etapes d'extraction des granulats de roches massives.....	16
Figure.I.16 : Schiste houillers.....	17
Figure.I.17 : Laitiers	17
Figure.I.18 : Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères.....	17
Figure.I.19 : Granulats recyclés.....	18

Chapitre II

Figure II.1 : Décharges sauvages dans la commune de Tizi-Ouzou.	22
Figure II.2 : Illustration de la valorisation énergétique.	23
Figure II.3 : Déchets organiques.	23
Figure II.4 : Emblème du recyclage.	24
Figure II.5 : Déchets ménagers.	24
Figure II.6 : les différentes filières du recyclage.	26
Figure II.7 : Matières plastiques.	26
Figure II.8 : Pavés fabriqués à partir de déchets plastiques.	29
Figure II.9 : Taux d'accroissement de la population de la commune de Tizi Ouzou.....	32

Figure II.10 : Les composantes de l'économie circulaire.....	33
Chapitre III	
Figure III.1 : Matériaux utilisés.	35
Figure III.2 : Déchets plastiques broyés.....	36
Figure III.3 : Genèse des roches.....	37
Figure III.4 : Effervescence de la marne.....	38
Figure III.5 : Mise en immersion des échantillons de marnes.....	39
Figure III.6 : Résultats de l'immersion des différents échantillons de marnes.....	40
Figure III.7 : Situation géographique du site.....	40
Figure III.8 : Site d'extraction du matériau naturel (marne) à l'état rocheux.....	40
Figure III.9 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-85(2010).....	41
Figure III.10 : Marne avant et après concassage.....	41
Figure III.11 : Matériels pour essai au pycnomètre.....	43
Figure III.12 : Pesée du pycnomètre contenant le matériau.....	43
Figure III.13 : Echantillons paraffinés et matériels de pesée hydrostatique.....	44
Figure III.14 : Différents états de consistances d'un sol.....	47
Figure III.15 : Appareillages et échantillon pour les limites d'atterberg.....	48
Figure III.16 : Détermination de la limite de liquidité.....	48
Figure III.17 : Rouleau pour déterminer la limite de plasticité.....	49
Figure III.18 : Mise en suspension des particules dans l'eau distillée, ajout du bleu de méthylène et prise de la tâche.....	50
Figure III.19 : Tache de bleu de méthylène négative.....	50
Figure III.20 : Tache de bleu de méthylène positive.....	50
Figure III.21 : Mélange de marne et de déchets plastiques.....	51
Chapitre IV	
Figure IV.1 : Allure d'une courbe de compactage.....	54
Figure IV.2 : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor.....	55
Figure IV.3 : Exemple de l'influence de la granulométrie sur le compactage.....	55
Figure IV.4 : Matériels utilisés pour l'essai Proctor modifié.....	58
Figure IV.5 : Différentes étapes de l'exécution de l'essai Proctor modifié.....	59
Figure IV.6 : Courbe Proctor de la marne.....	60
Figure IV.7 : Courbe Proctor de la marne + 1% de déchets plastiques.....	60
Figure IV.8 : Courbe Proctor de la marne + 3% de déchets plastiques.....	61

Figure IV.9 : Courbe Proctor de la marne + 5% de déchets plastiques.....	62
Figure IV.10 : Courbe Proctor de la marne + 7% de déchets plastiques.....	62
Figure IV.11 : Courbes comparatives des essais Proctor modifié.....	63
Figure IV.12 : Evolution des densités sèches.....	63
Figure IV.13 : Evolution de la teneur en eau des différents mélanges.....	64
Figure IV.14 : Moule CBR et accessoires de compactage Proctor modifié.....	65
Figure IV.15 : Presse à poinçonnement CBR.....	66
Figure IV.16 : Comparateur sur éprouvette mise en immersion.....	67
Figure IV.17 : Epreuve poinçonné.....	67
Figure IV.18 : Courbes comparatives des CBR.....	68
Figure IV.19 : Résultats de l'indice CBR.....	69
Figure IV.20 : Courbes comparatives de l'essai CBR immergé.....	69
Figure IV.21 : Résultats de l'essai CBR immergé.....	69
Figure IV.22 : Déformation du plastique en fonction de la sollicitation.....	70
Figure IV.23 : Gonflement relatif des différents mélanges.....	71
Figure IV.24 : Indice CBR et CBR immergé des différents mélanges.....	71
Chapitre V	
Figure V.1 : Matériels et échantillon de l'essai Los Angeles.....	74
Figure V.2 : Résultats des essais Los Angeles en présence de déchets plastiques.....	75
Figure V.3 : Matériels et échantillon pour l'essai Micro Deval.....	77
Figure V.4 : Ouverture du cylindre après essai en présence de déchets plastiques.....	78
Figure V.5 : Usure des granulats après essai Micro Deval.....	78
Figure V.6 : Différentes étapes de l'essai de fragmentabilité.....	80
Figure V.7 : Courbes granulométriques de la marne + 0% de déchets pastiques.....	81
Figure V.8 : Courbes granulométriques de la marne + 3% de déchets plastiques.....	81
Figure V.9 : Courbes granulométriques de la marne + 5% de déchets plastiques.....	82
Figure V.10 : Différentes étapes de l'essai de dégradabilité.....	83
Figure V.11 : Courbes granulométriques de l'essai de dégradabilité.....	84
Chapitre VI	
Figure VI.1 : Courbe de contraintes-déformations.....	85
Figure VI.2 : Droite intrinsèque.....	86

Figure VI.3 : Droites intrinsèques des différentes catégories de sols.....	87
Figure VI.4 : Appareillages de l'essai de cisaillement à la boîte.....	89
Figure VI.6 : Etapes à suivre pour effectuer l'essai de cisaillement.....	89
Figure VI.7 : Echantillon après cisaillement.....	90
Figure VI.8 : Courbes de contraintes-déformation de la marne+ 0% de déchets plastiques.....	91
Figure VI.9 : Courbes de variation de volume de la marne + 0% de déchets plastiques.....	91
Figure VI.10 : Courbe intrinsèque de la marne + 0% de déchets plastiques.....	92
Figure VI.11 : Courbes de contraintes-déformations marne + 3% de déchets plastiques.....	92
Figure VI.12 : Courbes de variation de volume de la marne + 3% de déchets plastique.....	93
Figure VI.13 : Courbe intrinsèque de la marne + 3 % de déchets plastiques.....	93
Figure VI.14 : Courbes de contraintes-déformations de la marne + 5% de déchets plastiques.....	94
Figure VI.15 : Courbes de variation de volume de la marne + 5% de déchets plastiques.....	94
Figure VI.16 : Courbe intrinsèque de la marne + 5% de plastiques.....	95
Figure VI.17 : Comparaison de la cohésion des différents mélanges.....	95
Figure VI.18 : Angle de frottement des différents mélanges.....	96
Figure VI.19 : Courbes comparatives à $\sigma = 100$ kPa.....	96
Figure VI.20 : Courbes comparatives à $\sigma = 200$ kPa.....	97
Figure VI.21 : Courbes comparatives à $\sigma = 300$ kPa.....	97
Figure VI.22 : Courbes comparatives à $\sigma = 400$ kPa.....	98
Figure VI.23 : Droites intrinsèques des différents mélanges.....	98

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Choix de couche de roulement « M.FAURE, 1997 »	5
Tableau I.2 : Caractéristiques des familles granulaires.	21

Chapitre II

Tableau II.1 : Constitution des déchets de la commune de Tizi Ouzou	22
Tableau II.2 : Quantité des déchets collectés par la commune de Tizi-Ouzou	27
Tableau II.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères.....	31
Tableau II.4 : Taux d'accroissement de la population de la Commune de Tizi Ouzou.....	36

Chapitre III

Tableau III.1 : Récapitulatif de la composition et utilisation des différents types de plastiques.....	38
Tableau III.2. Etude du comportement des matériaux recyclés au compactage.....	39
Tableau III.3 : Présentation des résultats pour le calcul de la teneur en eau.....	42
Tableau III.4 : Résultats des pesées au pycnomètre.....	44
Tableau III.5 : Tableau des résultats des pesées hydrostatiques.....	45
Tableau III.6 : Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche.....	45
Tableau III.7 : Interprétations des degrés de saturations établies par TERZAGHI.....	46
Tableau III.8 : Présentation des résultats pour la limite de liquidité.....	48
Tableau III.9 : Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068).	51
Tableau III.10 : Récapitulatif des résultats de l'essai à la tâche.....	51

Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (AFNOR ,1999).	57
Tableau IV.2 : Résultats de l'essai Proctor du matériau marne.....	59
Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 1% de déchets plastiques.....	60
Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 3% de déchets plastiques.....	61
Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 5% de déchets plastiques.....	61
Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 7% de déchets plastiques.....	62
Tableau IV.7 : Evolution des teneurs en eau et des densités sèches.....	63
Tableau IV.8 : Les classes de portance des sols (CEBTP, 1984).	67
Tableau IV.9 : Résultats de l'essai CBR.....	68

Chapitre V

Tableau V.1 : Charge de boulets pour essais Los Angeles.	74
Tableau V.2 : Appréciation des résultats de l'essai Los Angeles (NF P 18-573)	75
Tableau V.3 : Résultat des essais Los Angeles.....	76
Tableau V.4 : Charges abrasives en fonction de la classe granulaire.....	77
Tableau V.5 : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval (NF P 18-572)	78
Tableau V.6 : Résultats des essais Micro Deval.....	78
Tableau V.7 : Catégories des granulats selon leur résistance aux chocs et à l'usure (Moron, BRGM) ..	79
Tableau V.8 : Valeurs de références de l'essai Miro Deval.....	80

Chapitre VI

Tableau VI.1 : Cohésion des différents mélanges.....	96
Tableau VI.2 : Angle de frottement des différents mélanges.....	96

Introduction générale

Le réseau routier est considéré comme le secteur porteur de croissance dans une économie. Son développement nécessite des ressources naturelles issues généralement de l'exploitation des carrières (granulats naturels). Les routes, autoroutes et voies ferrées consomment près de 30 000 tonnes de granulats par kilomètre. Le développement exponentiel du monde moderne a conduit à une surexploitation de ces derniers, ce qui génère l'épuisement des ressources naturelles, la dégradation de l'environnement et la consommation accrue d'énergie.

La thématique sur la possibilité d'emploi en technique routières des déchets et sous-produit a été créée en 1975 par un groupe de recherche routière à Londres. En ayant recours à de tels matériaux, on préserve les ressources naturelles tout en supprimant ou réduisant le nombre des dépotoirs portant atteinte à l'environnement. L'évaluation environnementale permet de déterminer la manière dont les activités des entreprises affectent la population et l'environnement alentour. Il est important de savoir qu'en Algérie 13,5 millions de tonnes de déchets plastiques sont produits annuellement, ce qui constituerait éventuellement un matériau alternatif et un choix stratégique.

Les propriétés physiques et chimiques du plastique confèrent une aptitude éventuelle à son utilisation en techniques routières. Il est évident que l'emploi de ceux-ci pourrait être une alternative visant à minimiser les effets de la diminution des ressources naturelles et réduire le nombre de décharges.

Le projet proposé viendrait apporter une précieuse contribution à la résolution de ce problème environnemental alarmant en intégrant les déchets plastiques brut sans traitement, juste broyés au matériau naturel en l'occurrence la marne.

Pour mener à terme ce travail, ce manuscrit est structuré en six chapitres :

Le chapitre I présente des 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 présente la valorisation des déchets à savoir, la classification et l'inventaire des déchets de la commune de Tizi Ouzou, les techniques de valorisation, la valorisation des déchets plastiques dans le domaine du génie civil et enfin l'étude socio-économique du projet.

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 hydrométrique 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 et les interprétations correspondantes.

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

Généralités sur les chaussées et matériaux routiers

I.1. Introduction

Le développement d'une civilisation est étroitement lié aux infrastructures routières, celles-ci ont joué un rôle décisif dans l'histoire de l'humanité et ont permis le développement du troc puis du commerce.

À l'époque des chariots en bois, on tapissé les pistes en terre de lits de pierres pour éviter que celle-ci ne se transforme en bourbiers, la pierre étant insensible au changement climatique était une solution prisée. Vint après le dallage, un concept inventé du temps des romains d'où l'appellation « chaussée romaine ».

La révolution industrielle du XVIIIème siècle a permis l'invention de multiples moyens de transport innovants tels que les chemins de fer, mettant en péril l'utilisation des routes. L'apparition des automobiles a toutefois eu un impact majeur dans la réutilisation des chaussées d'où l'apparition du macadam ou route empierrée, une approche plus réfléchie ayant des spécifications pour l'exécution et la mise en œuvre de nos routes d'aujourd'hui puisque celle-ci dispose de résistances mécaniques plus élevés pour supporter des charges plus conséquentes et donc la circulation des véhicules.

I.2. Définition et Constitution d'une chaussée

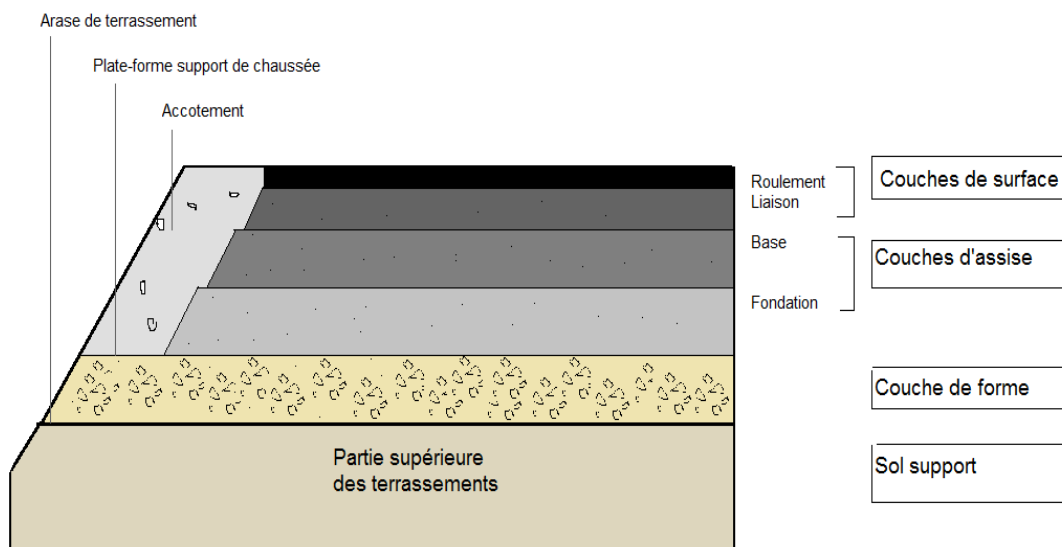


Figure I.1 : Constitution d'une chaussée (Faure, 1997).

Une chaussée a pour rôle de supporter la circulation de véhicule, elle se présente en plusieurs catégories tel qu'une chaussée moyenne ; principale, secondaire ; chaussée à deux, trois, quatre

voies; à grande circulation; et enfin chaussées d'intérêt local. Elle est constituée d'un ensemble de couches dites plate-forme support de chaussées qui assurent la stabilité de l'ensemble, chaque couche a une fonction précise :

I.2.1. La couche de forme

Cette couche supporte la chaussée, elle se situe au-dessus du terrain naturel de l'implantation du projet, elle a pour but le drainage de l'eau et de ce fait limite le phénomène du gel dégel très nuisible à la structure, elle est constituée d'un matériau perméable dit emprunt granulaire et d'une épaisseur variable en fonction du type de sol employé. Elle permet aussi la circulation des engins de chantier et protège le sol support.

La couche de forme diffère et il en existe plusieurs formes, car chaque site étudié et exploité ne représente pas les mêmes caractéristiques telles que l'environnement hydrologique et le climat, si le sol en place comporte toutes les caractéristiques requises alors la couche de forme sera inexistante, si par contre ce sol est médiocre la couche de forme devient obligatoire. Le matériau utilisé pour cette dernière doit satisfaire les conditions suivantes :

- L'insensibilité à l'eau : cette caractéristique limite les altérations du matériau.
- La dimension des plus gros grains : doit permettre un nivellement optimal de la plateforme.
- La résistance au trafic de chantier : cette résistance se mesure grâce aux essais Los Angeles et de fragmentabilité, le matériau employé pour la couche de forme doit supporter l'effet de pression constante des engins (Michel FAURE).

I.2.2. La couche d'assise

Cette couche est généralement constituée d'une fondation et d'une couche de base comme indiqué sur la figure I.1. Celles-ci consistent à supporter et à distribuer les charges du trafic (charges verticales) et doivent maintenir les déformations dans les limites admissibles en répartissant les pressions sur le support. Néanmoins, la couche de base doit être plus résistante que la couche de fondation car elle reçoit directement les contraintes transmises par la couche de surface.

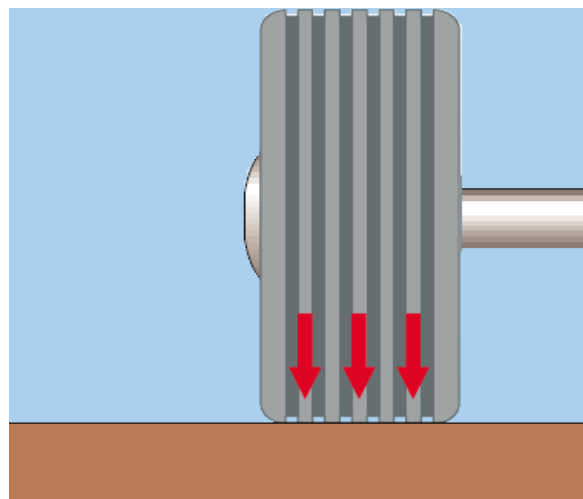


Figure I.2 : Charges verticales induites par le trafic.

I.2.3. La couche de surface

Cette couche est constituée d'une couche de roulement et d'une couche de liaison.

La couche de roulement est la couche supérieure de la structure de chaussée, elle joue un rôle majeur qu'il soit sécuritaire en vue des usagers tel que le confort et l'adhérence du véhicule (texture), et environnemental comme l'impact du bruit de roulement. Elle protège néanmoins les couches plus basses en assurant une étanchéité et une évacuation des eaux de ruissellement vers les accotements, et doit être conçue de telle sorte à limiter les déformations d'usure dues aux efforts transmis par les roues des véhicules.

La couche de surface peut être mise en œuvre de plusieurs manières en fonction des attentes, et des conditions à remplir, parmi ces techniques :

- Les enduits superficiels (ES) ;
- Les bétons bitumineux (BB) :
 - *Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) ;
 - *Les bétons bitumineux drainants (BBDr);
 - *Les bétons bitumineux minces (BBM) ;
 - *Les bétons très minces (BBTM) ;
 - *Les Bétons bitumineux ultra minces (BBUM).
- Les enrobés coulés à froid (ECF) ;
- Le béton de ciment (BC) avec traitement de surface indispensable.

Le tableau suivant résume le choix de la technique employée pour la couche de roulement :

Tableau I.1 : Choix de couche de roulement (Michel FAURE, 1997).

Technique		ES	BBTM	BBDr	BBM	BBSG
Norme NFP		98-160	98-137	98-134	98-132	98-130
Epaisseur (cm)		≈ 1	2 à 3	3 à 4	3 à 5	5 à 9
Sécurité	Adhérence Initiale	++	+	+	+	0
	Adhérence à 5ans	+	+	+	0	0 à -
Confort	Amélioration De l'uni	-	0	+	+	++
	Silence	- à --	+	++	0 à +	0 à +
Apport structurel		-	-	-	+	++
Etanchéité		+	-	--	+	++
Tenue à l'orniérage		-	+	++	+	0 à -
Légende : ++ Très bon + Bon 0 Moyen - Médiocre -- Mauvais						

I.2.4. Accotements

L'accotement est une partie de la chaussée non carrossable, son rôle est de maintenir l'ensemble énuméré précédemment pour limiter les fissures et permet d'évacuer les eaux de pluie. Dans le cas des routes a grandes circulation tel que les autoroutes, les accotements serve aussi d'air de stationnement en cas de panne ou d'urgence.

I.3. Différentes structures de chaussées

On distingue six types de chaussées selon le fonctionnement mécanique de celles-ci :

I.3.1. Les chaussées souples

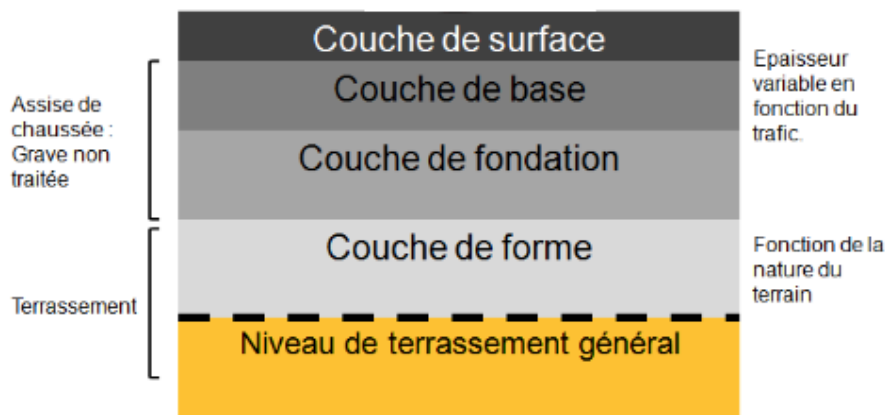


Figure I.3 : Constitution d'une chaussée souple.

Une chaussée souple est généralement d'une épaisseur comprise entre 30 et 60 cm, la couche d'assise est constituée de matériaux granulaires non traités, et la couche de surface est composée d'un revêtement bitumineux mince inférieur à 15cm, et parfois d'un enduit dans le cas des chaussées à faible trafic. La couche de roulement étant fine donne une répartition latérale insuffisante des charges verticales à travers la couche d'assise, cette épaisseur est aussi à l'origine de déformations en surface irréversibles qui se traduisent par des fissures dans le cas de sècheresse prolongée par exemple.

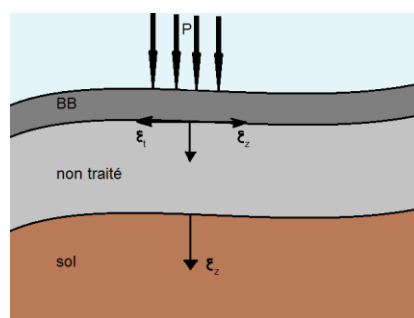


Figure I.4 : Fonctionnement d'une chaussée souple.

I.3.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

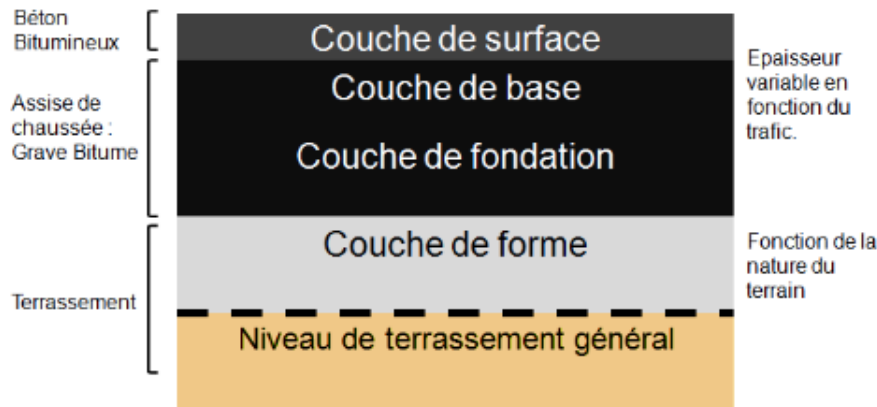


Figure I.5 : Constitution d'une chaussée bitumineuse épaisse.

Ce type de chaussée est constitué d'une couche de roulement bitumineuse, elle se caractérise par une couche d'assise traitée aux liants hydrocarbonés d'épaisseur allant de 15 à 40 cm. Le collage entre les différentes couches joue un rôle essentiel dans le comportement et la dégradation de la chaussée, si celui-ci est bien exécuté, la transmission des charges verticales se fera convenablement vers le sol support et sera atténué grâce à la rigidité suffisante de chaque couche, mais si celles-ci sont décollées la sollicitation se traduira par des tractions dans chaque base de couches et une transmission très faible des charges induisant une rupture à ce niveau.

I.3.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques (semi-rigides)

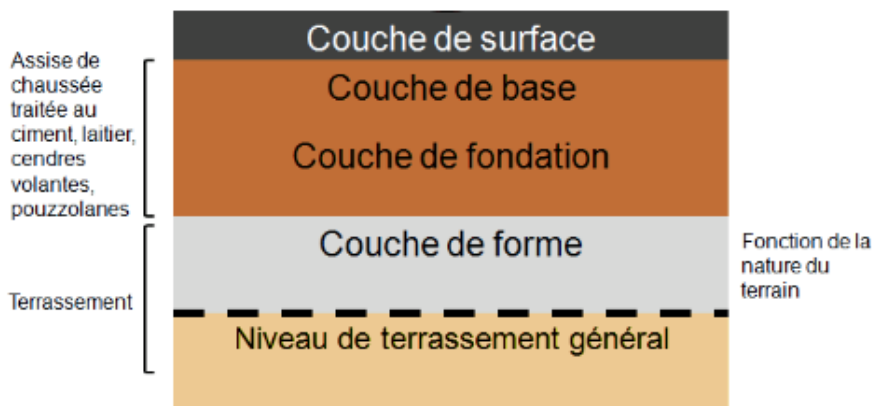


Figure I.6 : Constitution d'une chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques.

Cette structure est composée d'une couche de roulement composée d'un revêtement bitumineux, et d'une couche d'assise traitée aux liants hydrauliques dont l'épaisseur vari de 20 à 50 cm.

Les matériaux traités aux liants hydrauliques dans la couche d'assise présentent une grande rigidité, ce qui entraîne une faible transmission des charges verticales vers le sol support et un risque élevé de retrait (apparition de fissure remontant en surface). On remarque aussi que comme pour les chaussées bitumineuses épaisses, elle présente une forte sensibilité dans les zones interface de couches puisqu'elles sont soumises à de fortes sollicitations (cisaillement horizontal).

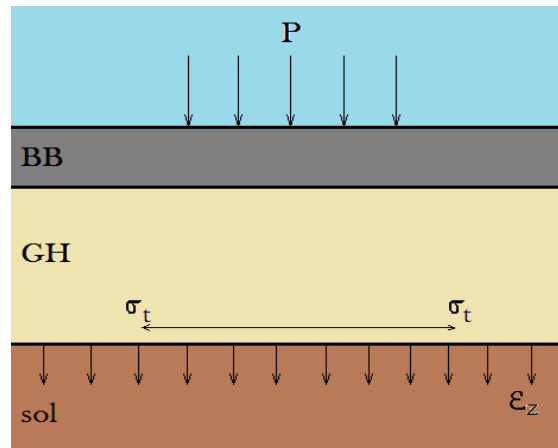


Figure I.7 : Fonctionnement d'une chaussée semi-rigide.

I.3.4. Les chaussées à structure mixte (semi-rigide)

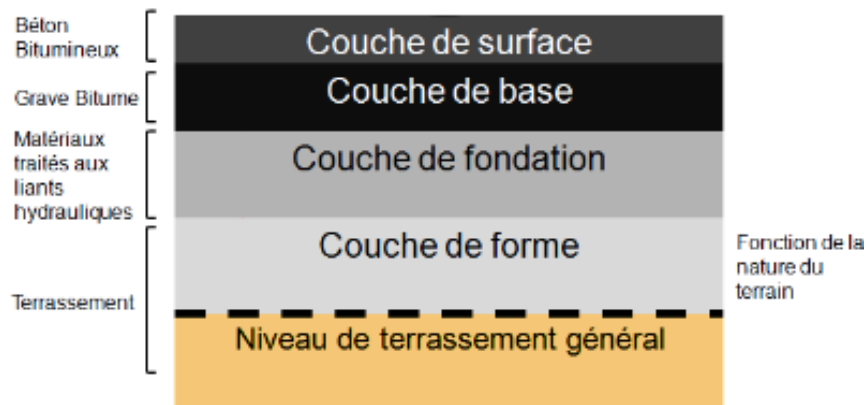


Figure I.8 : Constitution d'une chaussée à structure mixte.

Cette structure est constituée d'une couche de base et de surface composée de matériaux bitumineux, leurs épaisseur varie entre 10 à 20cm, la couche de fondation est composée de matériaux traités aux liants hydrauliques d'une épaisseur allant de 20 à 40cm. La particularité de ce diapositive est de corriger les inconvénients opérant sur les chaussées semi-rigides, soit, de lutter contre les remontées de fissures occasionnées par la forte rigidité de la couche d'assise, ici les couches bitumineuses (souple) jouent le rôle de frein aux déformations, et la couche de fondation intervient pour atténuer les charges transmises vers le sol support.

I.3.5. Les chaussées à structure inverse (semi-rigide)

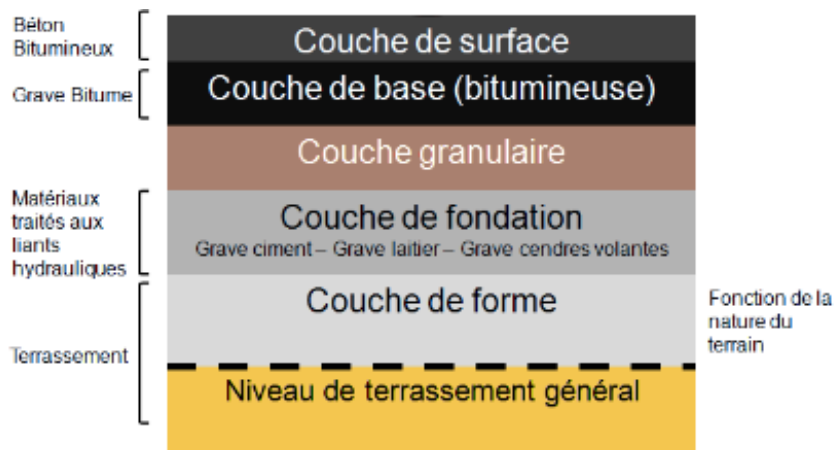


Figure I.9 : Constitution d'une chaussée à structure inverse.

Les chaussées à structure inverse suivent le même principe que les chaussées à structures mixtes, composées elles aussi de couche de surface en revêtement bitumineux assurant l'étanchéité de l'ensemble d'une épaisseur de 15cm, et d'une couche de fondation en matériaux traités au liants hydrauliques, leur particularité est qu'elles sont composées d'une couche intermédiaire granulaire ayant pour fonction d'absorber les fissurations remontants de la couche de fondation rigide vers la couche de surface. L'épaisseur totale de la structure est comprise entre 60 et 80cm.

I.3.6. Les chaussées en béton de ciment (chaussées rigides)

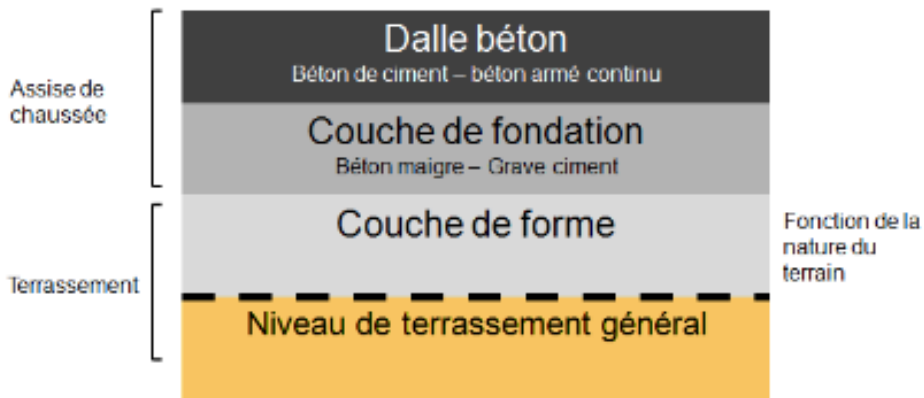


Figure I.10 : Constitution d'une chaussée en béton de ciment.

Cette structure est assez particulière mais ressemble toutefois aux chaussées à assises traitées aux liants hydrauliques, il en existe quatre types :

I.3.6.1. Chaussée à dalle non goujonnées avec fondation

Ce type de chaussée est constitué de dalles de béton de ciment non armaturé d'une épaisseur allant de 20 à 28cm et d'une fondation de béton maigre ou en matériaux traités aux liants hydrauliques d'épaisseur respective de 12 à 18cm et de 15 à 20cm.

I.3.6.2. Chaussée à dalles goudonnées avec fondation

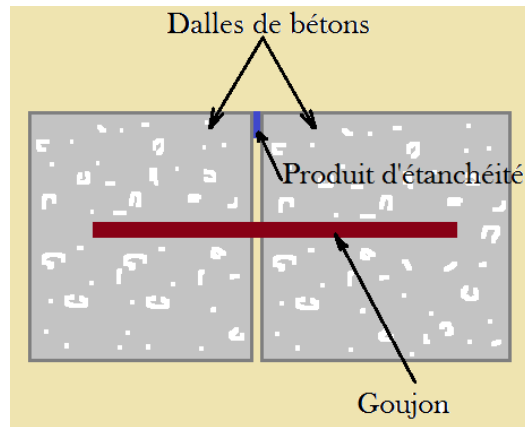


Figure I.11 : Joints de dilatation avec goudon longitudinal.

Constitué de dalles en béton de ciment d'épaisseur comprise entre 17 et 23cm et d'une fondation en béton maigre de 14 à 22 cm d'épaisseur, les dalles sont liées entre elles grâce à des armatures longitudinales appelées goudons.

I.3.6.3. Chaussée à dalles sans fondation

Ces chaussées sont constituées de dalles en béton de ciment de 28 à 39 cm d'épaisseur reposant sur un matériau granulaire ou sur un géotextile ayant comme fonction le drainage de la structure en place.

I.3.6.4. Chaussée en béton armé continu



Figure I.12 : Armature filante d'une chaussée en béton armé.

Il en existe deux types, le type A composé d'une dalle en béton de ciment de 16 à 24cm d'épaisseur et d'une fondation en béton maigre de (12 à 14cm) ; le type B est lui constitué d'une dalle en béton de ciment d'épaisseur comprise entre 18 et 24 cm, d'une assise en matériaux bitumineux de 5cm et d'une fondation en sable traité aux liants hydrauliques de 50 à 60 cm de hauteur. Ces structures sont très rigides et permettent l'absorption des efforts transmis par le trafic, dans ce type de conception il est nécessaire de bien dimensionner et de prévoir des joints de dilatation, car le béton a tendance à se fissurer après retrait. Ces chaussées ont une durée de vie considérable allant jusqu'à 50ans, elles ont par contre posé problème dans le temps au niveau sonore, mais aujourd'hui des enduits spéciaux viennent y remédier.

I.4. Géométrie et dimensionnement d'une chaussée

Une chaussée doit impérativement respecter les conditions géométriques suivantes :

Chaussée à une voie de circulation

- une largeur allant de 3 à 5 mètres ;
- 100 mètres de rayon de courbure d'un point bas, et 30 mètres d'un point haut ;
- Pentes maxi allant jusqu'à 15% maximum.

Chaussée à deux voies de circulation

- Largeur comprise entre 5.5 à 6 mètres ;
- 700 mètres de rayon de courbure d'un point bas, et 500 mètres d'un point haut ;
- D'une pente maximale de 10%.

La construction d'une chaussée s'élabore en prenant compte de plusieurs paramètres de calculs tels que le niveau de trafic, le coefficient d'agressivité qui dépend de l'emplacement géographique du site d'exploitation et donc du climat environnant (forte chaleur, gel...), de la durée de vie souhaitée au projet et de son importance, et enfin de la portance de la plate-forme support.

I.5. Dégradations des chaussées

Les chaussées se dégradent dans le temps pour plusieurs raisons directes ou indirectes, le changement climatique brusque tel que le gel le dégel, les fortes chaleurs, le vieillissement des matériaux utilisés, ou tout simplement à cause de la mauvaise conception d'une couche ou d'un revêtement... Chaque type de chaussée se dégrade différemment et présentent des détériorations diverses.

Après sa mise en service, la chaussée souple vieillira au bout de quelques années, elle présentera alors les déformations irréversibles suivantes :

I.5.1. Les ondulations

Cette dégradation est causée par un retrait ou gonflement des sols, on rencontre souvent ce cas dans les sols argileux, elle est aussi causée par le gel ou par un tassement différentiel.

I.5.2. Les ornières

Les ornières apparaissent lorsque les charges des roues se répètent et se concentrent sur une même partie de la chaussée.

I.5.3. Les fissures de centre

Le centre de la chaussée est une partie fragile, en effet lors de la conception du revêtement ou couche de roulement il est très important de bien faire adhérer les deux couches adjacentes, si la mise en œuvre est défectueuse des fissures au centre apparaîtront laissant passer l'eau dans le corps de chaussée, l'eau connue pour les désastres qu'elle occasionne affaiblira toute la structure routière.

I.5.4. Les fissures longitudinales

Les fissures longitudinales apparaissent après quelques années de service seulement, elles sont dues à une ségrégation des grains dans la couche de base.

I.5.5. Les fissures transversales

Ces fissures sont perpendiculaires à la route, elles se créent suite à un abaissement brusque de la température agressant le revêtement de la couche de roulement, elles apparaissent aussi dans les temps froids suite au gel de l'eau infiltrée dans la structure.

I.5.6. Les fissures latérales

Elles se manifestent aux extrémités des revêtements, elles sont dues à un mauvais dimensionnement de la chaussée, ou dans certains cas à cause des accotements insuffisamment larges.

I.5.7. Fissures en Lézard

Ces fissures sont aléatoires, elles se forment dans le cas de sols compressibles, l'infiltration d'eau est aussi une cause potentielle de ce phénomène.

I.5.8. Fissurations polygonales

Très fréquentes dans le vieillissement d'une chaussée souple, mais ces fissures apparaissent plus tôt lorsque la fondation présente une anomalie, ces fissures forment des polygones allant jusqu'à 20cm de diamètre.

I.5.9. Nid de poule

Les nids de poule sont sous forme de trous ou pelades à la surface de la chaussée (couche de roulement), l'eau qui s'infiltré et le passage des roues à répétition sur les fissures évoquées plus haut donne naissance à ce type de dégradations.



Figure I.13 : Types de dégradations des chaussées.

I.6. Matériaux routiers (les granulats)

Les granulats sont indispensables dans la réalisation des barrages, des enrochements, des ouvrages de protection des côtes, des ports avec digues, des viaducs, des ponts et ouvrages d'art. Les granulats les plus utilisés dans la construction sont les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts tous caractérisés par leur dimensions ... Liés avec du ciment ou du bitume, les granulats représentent 80 à 90% des bétons. Non liés, 100% des drains, filtres et de certaines assises. Nos routes, autoroutes et voies ferrées consomment près de 30 000 tonnes de granulats par kilomètres.

I.6.1. Définition des granulats

Le granulat est constitué d'un ensemble de grains minéraux de dimension comprise entre 0 et 125mm, leurs nature, leurs caractéristiques et leurs formes varient en fonction des sites ou des techniques de production. Il existe sept familles de granulats qui se distinguent en fonction de leurs dimensions (granulométries) comme indiqué sur la figure suivante.

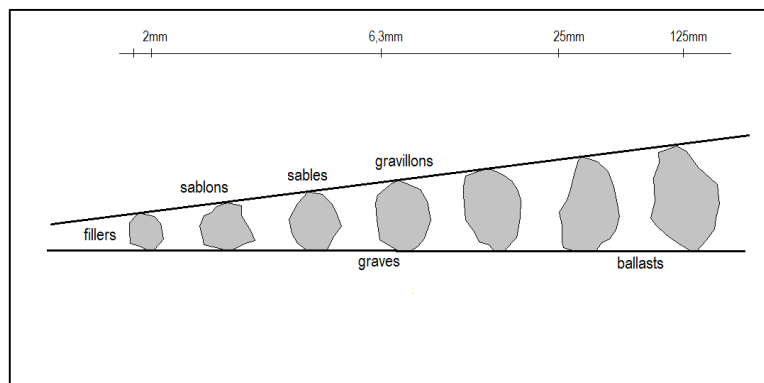


Figure I.14 : Familles de granulats.

I.6.2. Caractérisation des granulats

I.6.2.1 La granularité

Les granulats sont désignés par le couple d/D qui représente leurs classes granulaires, d étant la dimension inférieure du granulat et D la dimension supérieure. Les granulats les plus utilisés sont classés dans le tableau suivant :

Tableau I.2 : Caractéristiques des familles granulaires.

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2\text{mm}$ avec au moins 85% de passant à 1.25mm Et 70% de passant à 0.0063mm
Sables	0/D	$d = 0$ et $D \leq 4\text{mm}$
Graves	0/D	$D \geq 6.3 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 63 \text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d = 31.5 \text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

I.6.2.2.L'état de surface

L'état de surface est un paramètre important jouant un rôle dans le comportement des grains entre eux, il distingue la rugosité, l'angularité et dépend de la structure de la roche. Dans les couches de roulement une angularité plus forte permet une plus grande adhérence des véhicules, pour les couches d'assise il est clair qu'une augmentation de ces caractéristiques favorisent la stabilité de la structure.

I.6.2.3. Caractéristiques intrinsèques des gravillons

Les couches de chaussées sont constituées majoritairement de granulats, les contraintes supportées par cet ensemble sont concentrées sur les grains, d'où intervient l'importance de connaître les caractéristiques de ce dernier qui définit la qualité propre de la roche telle que sa dureté, sa résistance à l'usure et au polissage, son angle de frottement qui doit être notamment élevé pour une résistance plus forte des couches d'assise non liée.

I.6.3. Types de granulats

Il existe trois origines de granulats :

- 1-Les granulats naturels.
- 2-Les granulats artificiels.
- 3-Les granulats recyclés.

I.6.3.1. Granulats naturels

Ils sont issus du milieu naturel, de roches meubles (alluvions) ou de roches massives n'ayant subi qu'une transformation mécanique tels que le concassage, le broyage, le criblage, et le lavage.

I.6.3.1.1. Granulats d'origine minéralogique

Les granulats naturels, les plus utilisés pour le béton proviennent des roches sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quarts et quartzites ou de roches éruptives comme les basaltes, les granites et les porphyres.

I.6.3.1.2. Granulats de roches meubles

Ils sont d'origine sédimentaire, roulés par l'érosion. Ils sont extraits à proximité des lits de rivières ou cours d'eau, dans les fonds marins peu profonds, dans la nappe ou au-dessus, ou dans les lacs, lavés pour éliminer les particules argileuses qui nuisent à la résistance du béton, puis passer au criblage (La séparation des parties fines et des parties grossières) pour obtenir les différentes classes de dimension. On peut distinguer parmi ces granulats :

- Les dépôts alluviaux, les plus importants en tonnages extraits (95 %), exploités dans les lits des rivières (sables et graviers, en général propres), dans les basses vallées (sables et graviers légèrement pollués par des argiles, c'est la source la plus importante) et dans

les terrasses alluviales, en général plus polluées et contenant souvent des éléments altérés ;

- Les dépôts alluviaux immergés exploités en mer (sables et graviers) ;
- Les dépôts laissés par les glaciers ou moraines (argiles, sables, cailloux et blocs) ;
- les dépôts formés par l'action du gel et de la gravité : éboulis de pentes (argiles, sables, cailloux et blocs) ;
- Les dépôts sableux repris par le vent : dunes (sables, sables fins) ;
- Les formations sableuses déposées en mer : sables, sables fins.

Les dépôts des formations marines montrent des couches régulières et fréquemment homogènes. Contrairement aux autres dépôts qui sont hétérogènes en granularité et en épaisseur. Aussi, ces derniers englobent des lentilles argileuses (poches de vases) de dimensions très variables.

Les modalités d'extraction des granulats sont influencées par l'hétérogénéité granulaire de ces formations (nécessité de connaître ces variations)

L'extraction et le transport des granulats (alluvionnaires notamment) est source d'impacts environnementaux. Se faisant dans le sous-sol, elle impose souvent des pompages, responsables de baisse de nappe et de perturbations hydraulique, exacerbant les impacts des sécheresses et inondations et certains risques de pollution. En mer, les extractions peuvent perturber la flore et la faune (la remise en suspension de polluants. Des effets indirects d'érosion côtière ou sous-marine distantes sont possibles).

Dans ce cas de granulats il est judicieux de tenir compte des caractéristiques des grains telles que la propreté et la dureté, pour satisfaire aux exigences routières.

I.6.3.1.3. Granulats de roches massives

Ces granulats sont obtenus par concassage et abattage et sont de forme angulaire. Dans le cas d'un gisement compact, l'extraction des roches nécessite l'emploi d'explosifs. Les tirs de mines sont réalisés par des spécialistes (les mineurs « boute-feux ») et aujourd'hui optimisés par ajustement d'un plan de tir d'une très grande précision.

Les tirs de mines provoquent le foisonnement d'une grande quantité de matériaux (jusqu'à plusieurs dizaines de milliers de tonnes de roche par opération).

Les fragments (dont les plus importants peuvent être réduits sur place) sont chargés et acheminés vers la zone de traitement.

Il est indispensable à ce moment-là de faire un pré-criblage. Les classes granulaires souhaitées sont obtenues après différentes phases de concassage, de criblage et de lavage.

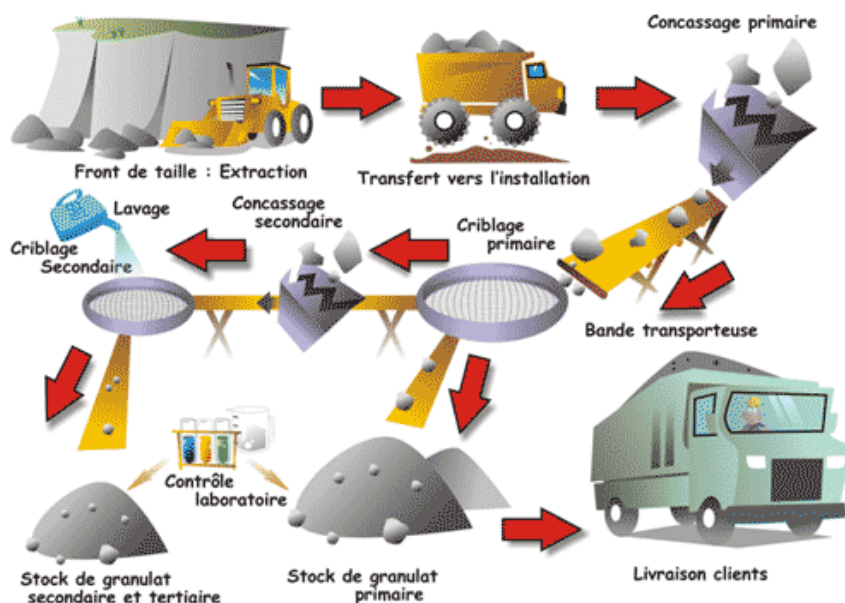


Figure I.15 : Etapes d'extraction des granulats de roches massives.

Leurs caractéristiques dépendent de l'origine de la roche, régularité du banc et du degré de concassage.

À côté des granulats naturels issus des roches, et qui représentent l'essentiel de la production, il existe d'autres granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de coproduits, de déchets ou d'anciens ouvrages.

I.6.3.2. Granulats artificiels

Les granulats artificiels sont souvent utilisés pour réaliser des bétons à usage spécifique, ils sont d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres.

Parmi ces derniers nous citerons :

I.6.3.2.1. Sous-produits industriels, concassés ou pas

Les unités de traitement de ces sous-produits industriels se situent à proximité des gisements en question. Les granulats ainsi produits sont en général employés sur les chantiers routiers, en sous-couches.

Parmi ces granulats issus de sous-produits **industriels** les schistes **houillers** sont des sous-produits de l'industrie minière de la houille. Lors de l'extraction du charbon dans la mine, des bancs intercalaires de matériaux stériles accompagnent inévitablement le charbon. Le terme «schistes houillers» désigne le sous-produit résultant de la séparation entre le charbon et le stérile.



Figure I.16 : Schistes houillers.

Aussi, **les laitiers** de hauts-fourneaux ou d'aciéries font partie de la gamme des coproduits sidérurgiques. Le laitier de haut-fourneau résulte de la production de la fonte : c'est la partie liquide émergeant à la surface du fer en fusion dans le haut-fourneau qui va être concassée après sa solidification. A la sortie du four, le laitier est déposé sur la plateforme de l'usine pour permettre son refroidissement puis sa manipulation.



Figure I.17 : Laitiers.

Le laitier d'aciérie est constitué des impuretés résultant du traitement de la fonte pour obtenir de l'acier.

Enfin **les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères** sont la fraction incombustible des déchets restituée à la sortie du four sous forme d'un matériau solide.



Figure I.18 : Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères.

La masse volumique apparente est supérieure à $1\,250\text{ kg/m}^3$ pour le laitier cristallisé concassé, 800 kg/m^3 pour le granulé.

Ces granulats sont utilisés notamment dans les bétons routiers ou pour les bétons réfractaires.

I.6.3.2.2. Granulats à hautes caractéristiques

Ce sont des granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, granulats durs pour renforcer la résistance à l'usure (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires.

I.6.3.3. Granulats recyclés



Figure I.19 : Granulats recyclés.

Chaque année, les activités du bâtiment et des travaux publics génèrent plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition et de déblais considérés, dans la plupart des cas, comme des déchets inertes.

L'emploi de ces matériaux, aujourd'hui distingué après leur dépollution et leur recyclage, a très vite été considéré comme une priorité, car cela présente au moins trois avantages majeurs que sont les économies de :

- Décharges (volume de stockage des déchets inertes) ;
- Carrières (ressources naturelles de granulats) ;
- Transport.

I.7. Conclusion

Le développement des chaussées à ce jour a par ailleurs entraîné une succession d'améliorations et d'inconvénients comme l'apparition des véhicules de plus en plus sophistiqués, engins lourds abimant les chaussées, trafic routier abondant entraînant des émissions de gaz à effet de serre, pollution de l'environnement... c'est pour cela qu'aujourd'hui l'ingénierie routière continue de chercher des solutions pour des routes durables et économiques.

Aujourd'hui la forte croissance de la population et le développement économique pose problème, de plus, de nouvelles villes voient le jour chaque année et entraînent une demande d'infrastructures routières plus élevée et donc un approvisionnement plus important en granulats naturels, ce qui induit une carence considérable de ces derniers.

L'accroissement constant du besoin en matériaux routiers a suscité l'orientation vers de nouvelles techniques visant à toujours développer les réseaux routiers en expansion. En effet, le principe de valorisation des déchets générés par la consommation accrue du monde moderne est une alternative de taille pour la protection de l'environnement et le développement durable.

Le chapitre suivant intitulé « Valorisation des déchets » portera sur un diagnostic de l'état des déchets et statistique de notre collectivité locale, ainsi que les méthodes de valorisations mises en place.

Chapitre II

Valorisation des déchets

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 est 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 :

1. **Les déchets industriels toxiques** qui doivent être manipulés et traités avec précautions ;
2. **Les déchets industriels banals ou non dangereux** tel que les déchets résultant des industries et des activités commerciales ;
3. **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 (AGENCE NATIONALE DES DECHETS, avril 2015).

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 (A.N.D, 2015).

Mois	Quantité de déchets (tonnes)
-------------	-------------------------------------

	2010	2011	2012	2013
Jan	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.

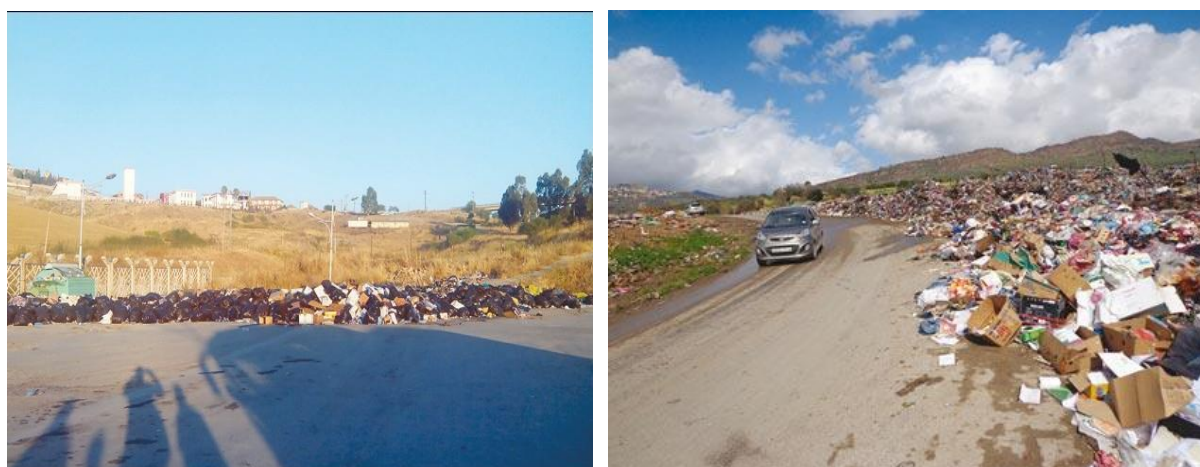


Figure II.1 : Décharges sauvages dans la commune de Tizi-Ouzou.

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



Figure II.2 : Illustration de la 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.

II.5.3.2. Valorisation organique



Figure II.3 : Déchets organiques.

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.

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 :

1- Le verre : le verre a 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.

2- 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.

3-L'aluminium et le fer : ces deux matières première sont récupérées après recyclage des boîtes de conserves usagées et des emballages en tôle d'acier.....

4-L'électronique : la récupération et la valorisation des déchets de type téléviseurs ou ordinateurs est très importante, de par cette filières 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.

5-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.

6-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 légumes, 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.

7-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 (voir chapitre I Matériaux routiers). Cette opération permet de préserver la matière première des carrières.

8-Déchets de chantiers : comme précédemment ces déchets sont issus des démolitions des constructions et des routes, hormis les déchets de type gravât cette filière valorise toutes les autres matières, un tri est effectué pour isoler les matériaux qui seront redirigés vers leurs filières respectives.

9-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 :

1. Les déchets domestiques dangereux : piles, solvants, pneus...
2. Les appareils électroniques : appareils photos, téléphones, électroménagers...
3. 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 subiront plusieurs traitements pour en réduire la toxicité et les risques de contamination.

10-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.

11-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.

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 0.23 Mt/an sont réutilisés, 133 000 t sont valorisés en énergie et seulement 7 000 t ne sont effectivement recyclés (Faurie *et al*, 2006).



Figure II.6 : Les différentes filières du recyclage.

II.6. Valorisation des déchets plastiques

II.6.1. Pourquoi le plastique ?

Avant de présenter l'outil mère de notre recherche (les déchets plastiques), il est indispensable de prédéfinir ce qu'est le plastique utilisé dans nos ménages.



Figure II.7 : Matières plastiques.

II.6.1.1. 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.

Il est important aussi de savoir que les polymères ont toujours existé car ils sont présents dans la structure même de l'être vivant sous forme de cellulose ou d'amidon dans les arbres, dans nos cheveux et nos ongles tel que le collagène.

II.6.1.2. 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.6.1.3. 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 plastiques :

Tableau II.3 : Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques polymères (Fontanille, 2014).

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.6.2. 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 (Recherche Routière, 1977) ;

-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) (Recherche Routière, 1977).

-En France : deux recherches sont effectuées par la Recherche Routière (Paris, 1977) :

1-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.

2-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, (Recherche Routière, 1977) ; 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 plasploc.

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

D'après Bense (1987) 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 (Kouagneu, 2016) 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.

-**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 (Afrique SCIENCE, 2014)

-**En Algérie**, des travaux ont été réalisés par Boukhari, Kebaili et Boucherba (2015) 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.7. Etude socio-économique du projet

Une bonne connaissance des caractéristiques géographiques et ou sociaux démographiques sont nécessaires pour apprécier quantitativement et qualitativement la pertinence du projet proposé.

II.7.1. Aspect historique

Alexander Parkes (1813-1890) est l'inventeur de la Parkesine, c'est un nouveau matériau obtenu par la dissolution de la nitrocellulose dans l'alcool. C'est une matière imperméable et pouvant être usinée comme les métaux ou moulé par compression ce qui a séduit les industrielles mais ce matériau se révèle trop onéreux.

En 1869, John Wesley Hyatt découvre un substituant appelé celluloïd qu'il obtient en mélangeant le collodion avec le camphre. Ce premier plastique se révèle trop fragile pour résister aux chocs.

En 1907, la bakélite fût découverte par le belge Leo Baekeland obtenu par la réaction chimique entre le formol et phénol et le formaldéhyde sous une pression et une température élevée. Ce premier plastique entièrement synthétique sera adopté par les industriels pour fabriquer toute sorte d'objets.

Apprécié pour ses qualités d'isolant électrique, la Bakélite connaît un grand succès dès 1920 dans la fabrication des téléphones et des premiers appareils électroménagers.

En 1949 les plastiques « mélamine-formol, MF » (Formica) découverts en 1941 envahissent les cuisines et le mobilier.

En 1950 le polyester. Le plus connu est le poly téréphtalate d'éthylène : PET, PETE (John Rex Whinfield et James Tennant Dickson). Puis en 1953, découverte du polyéthylène haute densité (PEHD) par polymérisation de l'éthylène sous pression modérée (chimiste allemand Karl Ziegler, prix Nobel de chimie en 1963)

Une succession de découverte de différentes matières plastiques ont continué à apparaitre grâce au développement de l'industrie pétrolière.

II.7.2. Aspect technique du projet

La production mondiale du plastique augmente chaque année (+2,9% en 2012) et pose des problèmes liés à la pétrochimie et au devenir des plastiques usagers. (MobiScience.Briand, 2014).

La prise de conscience des enjeux environnementaux se développe et incite à une amélioration du recyclage pour l'utilisation de matières premières renouvelables.

Le caractère résistant des matières plastiques usagers constitue un choix rationnel permettant leurs intégrations en filière industrielle en complément de matériau peu onéreux en technique routière.

II.7.3. Technologie retenue et équipement nécessaire

La technique de construction des routes à base du mélange de la marne et du plastique demeure la même que la mise en œuvre classique des chaussées souples.

II.7.4. Description des travaux de réalisation

La réalisation d'une chaussée à base du mélange de marne et des déchets plastiques comprend quatre étapes :

-Etape 01 : terrassement de la couche support (terrain naturel ou éventuellement le remblai)

-Etape 02 : Réalisation de la couche de forme à base du mélange de marne et de plastique.

-Etape 03 : Réalisation de la couche d'assise.

-Etape 04 : Réalisation de la couche de surface. . (Babilotte, 2014)

II.7.5. Evaluation socio démographique

L'accroissement de la population et la mondialisation de la consommation locale, se traduit par une augmentation significative du volume des déchets plastiques générés.

L'absence d'un schéma directeur pour une collecte rationnelle des déchets ménagers et assimilé, est à l'origine d'une déperdition dans la nature de la matière plastique considérée comme matière intégrée dans la conception routière.

Tableau II.4 : Taux d'accroissement de la population de la Commune de Tizi Ouzou (Agence nationale des déchets, 2015).

Années	1987	1998	2008	2010	2012	2014
Population (habitants)	92 412	117 259	135 088	139 171	143 377	147 711
Taux d'accroissement (%)	2,14	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

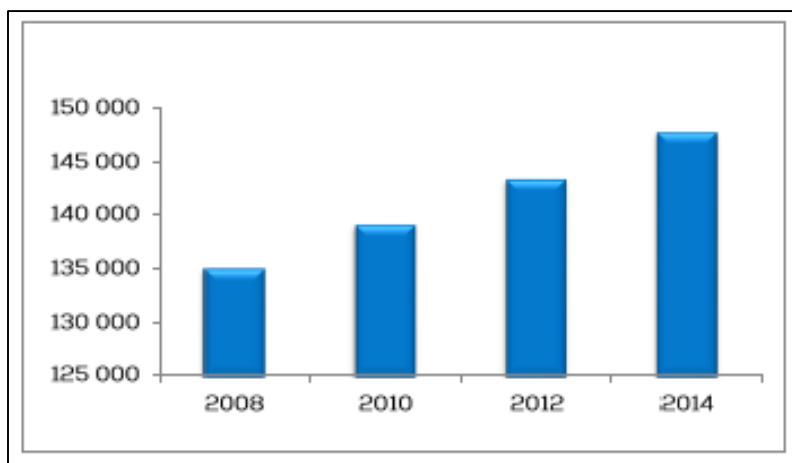


Figure II.9 : Taux d'accroissement de la population de la Commune de Tizi Ouzou (Agence nationale des déchets, 2015).

II.7.6. Evaluation économique

La politique environnementale pour le développement durable concernant la prise en charge des déchets solides en générale et des déchets plastiques en particulier est étroitement liée à la concrétisation du projet.

La méthodologie de la réussite du projet doit obéir à un schéma directeur de collecte des déchets mise en place par les collectivités locales.

L'incontournable tri sélectif à la source des déchets plastiques usagers offre une opportunité de taille à la conception et à la réalisation des ouvrages routiers.

II.7.6.1. Cout du plastique

Les unités de broyage des plastiques usagers sans lavage et sans transformation se développent de plus en plus dans notre pays.

Le cout de son exploitation se résume à sa collecte, son acheminement vers les centres de tri, son broyage et son ballotage.

II.7.6.2. Cout des granulats naturels

L'exploitation des carrières nécessite des moyens humains et matériels très lourd et couteux (engins, explosifs...), des ressources en eaux très importante utilisée dans les étapes de concassages et de criblages. En plus des nuisances générés par l'impact environnemental, la problématique liés à la disponibilité des carrières s'intensifie, d'où le prix onéreux du granulat.

II.7.7. Evaluation environnementale

En 2014, le taux de recyclage des déchets plastique devait dépasser 17% selon le ministère de l'environnement.

D'après le ministère de l'environnement seul 5% des 13,5 millions de tonnes de déchets plastiques produits annuellement sont recyclés, essentiellement pour récupérer le plastique, alors que 60 % sont potentiellement recyclables.

Le traitement des déchets en Algérie est encore loin des normes conclus par les autorités, en plus des nombreuses lacunes dans la collecte des déchets domestiques et industriels.

L'objectif semble toutefois difficilement réalisable, car les progrès paraissent longs alors que le recyclage des déchets est devenu un impératif économique, social et environnemental.

Le gouvernement affiche pourtant la volonté d'aller vite et de travailler sur tous les tableaux, alors que les collectivités locales peinent à suivre.

Maitriser les déchets c'est inciter la création d'entreprises spécialisé dans leur gestion et leur recyclage.

II.7.8. Intégration du projet au sens d'une économie cyclique

Le système économique est basé sur une logique linéaire qui consiste à extraire de la matière première puis la transformer pour fabriquer des produits qui sont ensuite consommés et jetés.

Ce modèle actuel n'est pas durable puisqu'il conduit vers un épuisement des ressources naturelles, il est donc nécessaire d'optimiser l'utilisation des ressources tout en diminuant les impacts environnementaux.

Le passage d'une économie linéaire vers une économie circulaire constitue une réponse à cette problématique. (Marcoux et al, 2016).

L'économie circulaire repose sur trois domaines d'action :

1. Agir sur l'offre au travers des acteurs économiques.
2. Agir sur la demande et le comportement du consommateur.
3. Intervenir sur la gestion des déchets.

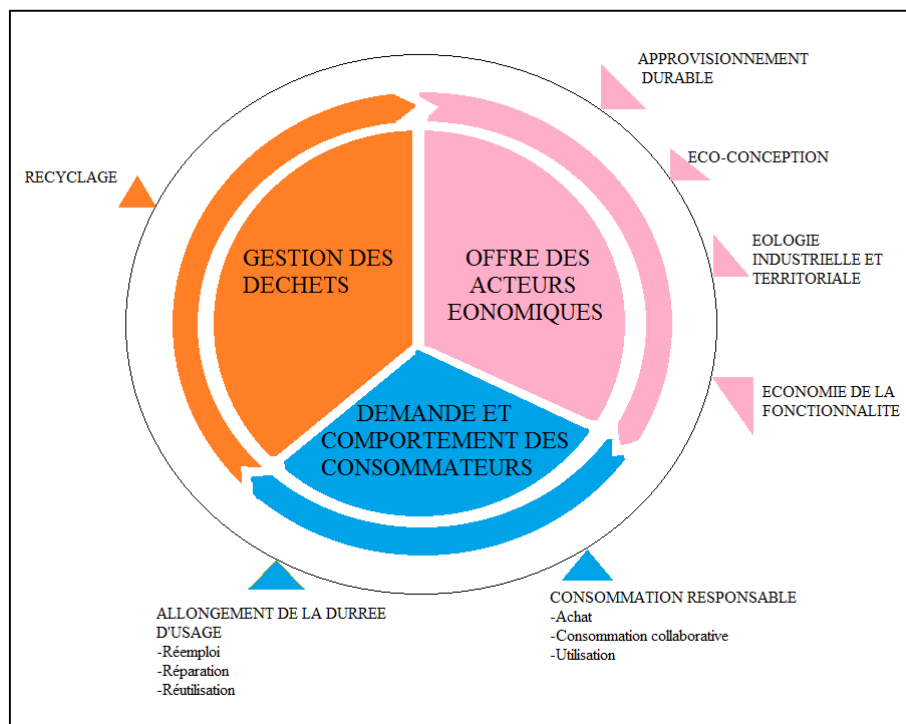


Figure II.10 : Les composants de l'économie circulaire (Saublet, 2015).

Aujourd'hui, gérer les déchets plastiques c'est les préparer en vue de leurs réutilisations à travers leurs valorisations en technique routières.

II.8. Conclusion

La valorisation des déchets plastiques, est une perspective indéniable pour la prise en charge des nuisances et conséquences désastreuses que peut générer ces déchets.

Les avantages de leurs recyclages en termes écologique apporteront une solution durable à notre environnement d'où la préférence à leurs incinérations, solution la plus privilégiée aujourd'hui.

Le recyclage peut aussi constituer une action clef pour la mise en œuvre de la stratégie du gouvernement Algérien, avec notamment l'initiative d'une transition vers une croissance économique et durable.

La prise en charge des déchets ménagers et assimilés non encore maîtrisée par les collectivités locales, constitue une contrainte dans la mise en œuvre du procédé de réutilisation du plastique broyé dans les techniques routières.

La politique déployée par les pouvoirs publics en matière de développement durable et la prise en charge des impacts sur l'environnement constitue un avantage et une opportunité dans la mise en œuvre du projet et répondre ainsi à la problématique des déchets plastiques, par optimisation des matières premières plus coûteuses.

Les prochains chapitres, porteront sur la faisabilité de la mise en œuvre et de la valorisation des déchets plastiques comme granulats dans le domaine routier.

Chapitre III

Préparation et identification des matériaux

III.1. Introduction

L'origine, l'identification des matériaux et la préparation des échantillons sont des opérations très importantes et très significatives. Elles permettent par la suite l'interprétation correcte du comportement des matériaux sous les différentes sollicitations mécaniques auxquelles ils seront soumis.

Dans ce chapitre sont identifiés et présentés les différents matériaux naturel et industriel utilisés (marne et déchets plastiques).

III.2. Matériaux utilisés



Figure III.1 : Matériaux utilisés.

Nous étudierons dans ce travail le comportement du mélange de granulats naturel de type marne et industriel de type déchets plastiques sous plusieurs séries d'essais de laboratoire pour une éventuelle utilisation dans les corps de chaussées.

III.3. Déchets plastique

Les déchets plastiques utilisés proviennent d'une usine de recyclage situé dans la Daira de Boghni, commune de Mechtras. 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.2 : Déchets plastiques broyés.

Tableau III.1 : Récapitulatif de la composition et utilisation des différents types de plastiques (L'industrie plastique, 1988).

Type de plastique	Composition chimique	Utilisation
PET	Poly téréphtalate d'éthylène	Bouteilles d'eau, jus, sodas...
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....

III.4. La marne

III.4.1 Genèse des roches

Il y'a des milliards d'années, ce sont formés principalement par refroidissement du magma en fusion des silicoaluminates de potassium, sodium, calcium, magnésium et fer, associés à l'oxygène ils constituent les minéraux.

La variation de la composition chimique du magma d'origine entraine des formations différentes d'association minéralogiques que l'on appelle roches magmatiques. Elles sont en général massives, ou dans certain cas meubles comme certaines projections volcanique (cendres, pouzzolanes,...)

Il existe trois types de roches magmatiques :

- Les roches volcaniques ou extrusives qui apparaissent lors du refroidissement brutal du magma en surface, après l'éruption volcanique.
- Les roches plutoniques ou intrusives, issues du refroidissement du magma en profondeur, lentement et sans dégazage dans la chambre magmatique, dites holocristallines.

- Les roches filoniennes ou hypo abyssales qui sont des roches ayant subi un dégazage partiel.

Les événements climatiques semblables à ceux actuels et l'apparition de l'eau a entraîné une altération de surface de ces roches, une dissolution des minéraux, une désagrégation, transport de dépôt ou sédimentation dans les lits de rivières, les lacs, les mers de sables, l'accumulation de graviers, argiles, vases et boues. Mais on remarquera surtout l'apparition de nouveaux minéraux tels que les carbonates, calcites ou la dolomite... Cette sédimentation ne concerne pas uniquement les roches, en effet il y'a eu sédimentation de la faune et la flore après leurs apparition, ce phénomène est à l'origine des charbons et pétroles.

Ces nouveaux éléments peuvent se consolider par précipitation chimique de la silice et du calcium, et parfois du magnésium dissous, et donner les grès, calcaires, dolomies, marnes... Ce sont les roches sédimentaires.

Ces roches magmatiques et sédimentaire sont elles aussi soumises à une autres transformation qui se fait sous l'action des contraintes et des températures élevées qui conduit aux roches métamorphiques. Elles se caractérisent par un feuilletage ou une schistosité (schistes, ardoises,...) ou cristallisation. (Loumachi, 2011)

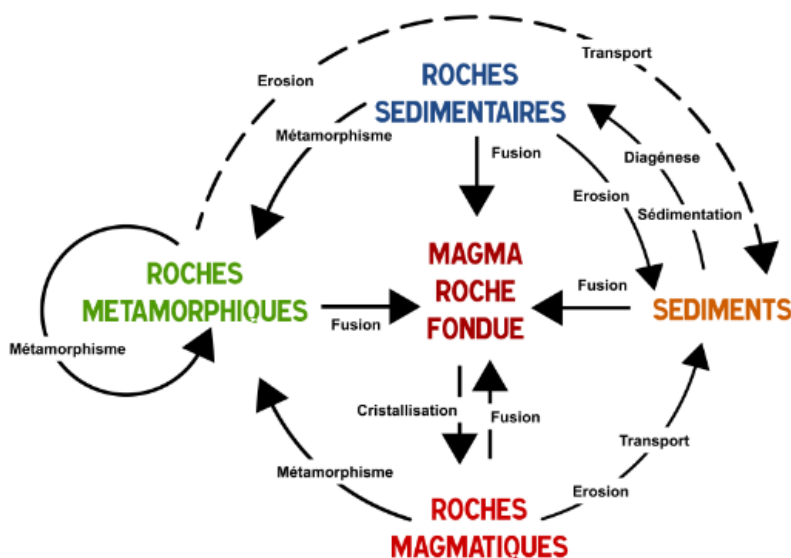


Figure III.3 : Genèse des roches.

III.4.2. Description de la Marne

La marne est une roche sédimentaire qui résulte du dépôt de matériaux, ayant subi un certain transport sous forme de particules en suspension ou de substances dissoutes dans l'eau.

Elle est constituée d'un mélange de calcaire CaCO_3 et d'argile de proportion variant de 35% à 65%. Elle peut être argile-calcaireuse si les proportions d'argile sont de 65%, et inversement, si le calcaire est à son tour du même pourcentage, il s'agit alors d'une marne calcaire-argileuse.

Elle est aussi dite carbonatée et cohérente à cassure terne à l'état sec. Elle se caractérise par une résistance plus faible à l'érosion que le calcaire, due à sa teneur en argile assez présente,

et contrairement à cette dernière (argile) réagit à l'acide chlorhydrique (HCl) en manifestant une effervescence à son contact (présence de calcaire).

En chimie l'équation s'écrit : $CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + H_2CO_3$



Figure III.4 : Effervescence de la marne.

III.4.3. Type de marne

Il existe plusieurs types de marne selon sa constitution chimique et son origine. On distingue les variétés suivantes : les magnésiennes, gypseuses, marne bleu, dolomitiques, marne blanches, noires, marnes sableuses, marne glauconieuses...

III.4.4. Utilisation divers de la marne

La marne a longtemps été convoitée pour les constructions en pierres, sa facilité d'extraction a permis l'élaboration de nombreux bâtiments anciens. Ce matériau a au fil du temps quitté l'estrade, par défaut d'identification de ses particularités déterminants son usage.

Aujourd'hui, les caractéristiques de la marne déterminent ses utilisations dans plusieurs domaines, l'agriculture pour fertiliser les terres grâce à sa grande teneur en calcaire qui permet de remonter le pH des sols acides. Elle est aussi utilisée pour la fabrication du ciment de Portland car elle constitue l'ingrédient principal de ce dernier.

III.4.5. Site d'extraction de la marne étudiée

Le territoire de la wilaya de Tizi-Ouzou (Grande Kabylie) s'inscrit du point de vue géologique, dans l'orogénèse alpine périméditerranéenne de la chaîne littorale de l'Afrique du nord. Les formations qui affleurent sur ce territoire sont le socle Kabyle (schistes, micaschiste, gneiss et granite), la dorsale Kabyle (chaînes calcaires avec des calcaires dolomitiques), l'oligo-miocène Kabyle (conglomérats à la base puis des calcaires et des schistes), le Quaternaire (dépôts d'alluvions anciens et récents sous forme de terrasses alluviales emboîtées et étagées), les nappes de flyschs (Alternance marno-calcaires avec des bancs de grés et mélange de bancs marno-calcaires et de grés) et le Miocène post-nappe dans lequel s'inscrit le bassin de Tizi-Ouzou. Ce dernier est une cuvette synclinale dans laquelle s'est empilée une série marneuse très épaisse comportant dans certains cas des conglomérats et des molasses grés-marneuses. L'ensemble est d'âge Burdigalien basal (Langhien) à Serravalien (Benhassaine, 1980).

L'identification lithologique du périmètre dont fait partie le site de prélèvement des échantillons réalisée par le laboratoire de l'habitat et de la construction centre de Tizi-Ouzou (LNHCC, 2014), a montré que la composition rencontrée consiste en une couche superficielle d'argile sableuse ou caillouteuse de faible épaisseur (environ 2 m) suivie de couches marneuses plus profondes. Ces couches se présentent sous forme de dépôts massifs de natures presque homogènes. Cependant, leurs épaisseurs très importantes dépassant parfois les 1000 mètres font qu'elles soient de plus en plus compactes en

allant en profondeur. Par conséquent, elles présentent une certaine hétérogénéité du point de vue compacité. Ces marnes présentent plus de 40% des sols de la Grande Kabylie et affleurent en surface, ce qui facilite leur extraction (Raymond, 1976).

La constitution géologique de la Grande Kabylie montre une grande abondance des marnes, étant des roches sédimentaires de différentes régions, elles ne présentent pas toutes les mêmes caractéristiques physiques chimiques et mécaniques.

Exemple de caractéristiques chimiques de différentes marnes de la Grande Kabylie :

Tableau III.2. Etude du comportement des matériaux recyclés au compactage (Boudlal, 2007).

Sites	Krim-Belkacem	Habitat	Les chaabanes	M'douha	Boukhalfa
VBS	02,50	02,35	02,28	01,67	05,57
CaCO ₃ (%)	14,87	44,04	52,21	57,53	20,88
MO (%)	01,51	00,99	01,30	01,77	00,99
SO ₄ ⁻ (%)	04,00	01,19	01,80	01,58	01,02
Cl ⁻ (%)	trace	trace	trace	trace	Trace

Pour ce fait, le choix de la marne étudiée c'est établie après avoir immergé plusieurs échantillons recueillis sur quatre sites différents :

- Deux échantillons éloignés issus du village de Thala Mensour, Tizi-Ouzou ;
- Un échantillon de l'avenue Terbouche Mourad, Tizi-Ouzou ;
- Un échantillon du village de Ouaguenoun, Tizi-Ouzou.

Le but de l'immersion est de déduire les dégradations engendrés par l'eau, puisque comme indiqué précédemment, la marne est peut résistante à l'érosion (en présence d'eau).

Après un environ un mois d'immersion, l'échantillon du village de Ouaguenoun est resté intacte en aspect mais, très fragile et friable ; l'échantillon de l'avenue Terbouche Mourad a par contre gardé son aspect, mais surtout sa dureté et n'a pas été touché par l'érosion, contrairement aux deux échantillons du village de Thala Mensour qui se sont littéralement dégradés en ayant un aspect argileux et une très faible résistance.



Figure III.5 : Mise en immersion des échantillons de marnes.

Résultats après un mois d'immersion :



Marne Ouaguenoun

Marne Thala Mensour

Marne Avenu Terbouche Mourad

Figure III.6 : Résultats de l'immersion des différents échantillons de marnes.

Le site choisi est donc situé dans la ville de Tizi-Ouzou comme indiqué sur la carte si dessous :

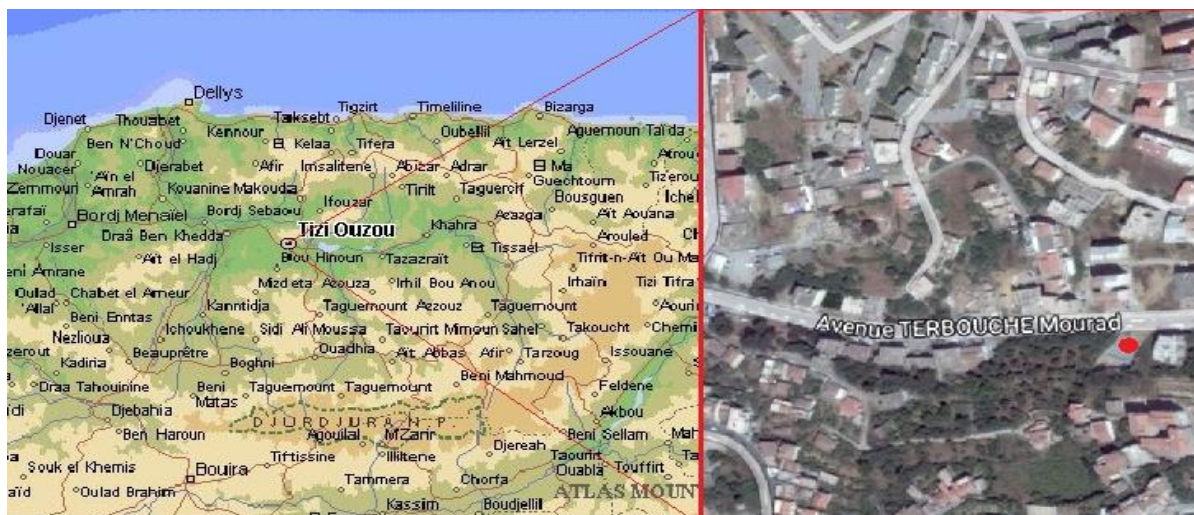


Figure III.7 : Situation géographique du site.



Figure III.8 : Site d'extraction du matériau naturel (marne) à l'état rocheux.

La quantité nécessaire est donc collectée et amenée au niveau du laboratoire de mécanique des sols de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO) pour établir les essais d'identifications et les essais mécaniques essentiels à la réalisation de notre projet.

III.5. Concassage et tamisage de la marne

Avant de procéder à la préparation des échantillons ; les éléments de marne prélevés sous formes de blocs rocheux sont soumis à plusieurs opérations au laboratoire, à savoir : un concassage mécanique, un séchage à étuve, et puis un tamisage (NF P 18-560), 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 (2010).

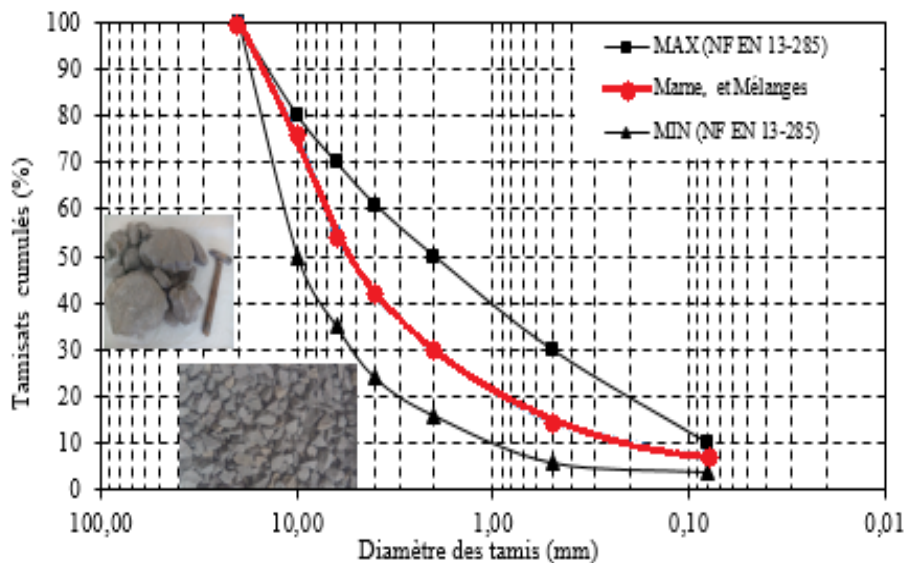


Figure III.9 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-85(2010).



Figure III.10 : Marne avant et après concassage.

III.6. Essais d'identifications

III.6.1. La teneur en eau (w)

La teneur en eau est obtenue par pourcentage d'eau contenue dans le sol rapporté au poids du sol sec, elle est déterminée selon la norme française NF P94-050.

Cela consiste à étuver une quantité représentative de matériau à l'état naturel à une température de 75°C (cas des marnes) pendant 24 heures.

L'échantillon est alors pesé avant et après étuvage. On détermine alors sa teneur en eau par l'équation suivante :

$$w = \frac{M_w}{M_d} \times 100 \quad \text{avec} \quad M_w = M_h - M_d$$

Avec :

M_w : Masse de l'eau ;

M_d : Masse du matériau sec ;

M_h : Masse du matériau humide ;

w : Teneur en eau.

III.6.1.1. Présentation des résultats

Tableau III.3 : Présentation des résultats pour le calcul de la teneur en eau.

N° de la tare	1	2
Masse de la tare(g)	26.8	40.8
Masse totale humide(g)	137.6	102.3
Masse total sèche(g)	135.6	101.8
Masse de l'eau (g)	2	0.5
Masse de l'échantillon sec(g)	108.8	61
Teneur en eau(%)	1.84	0.82

Nous obtenons donc une teneur en eau égale à : $w = 1.33\%$.

III.6.1.2. Interprétation des résultats

La marne étudiée présente une teneur en eau très faible malgré son extraction en période hivernale. Ceci est dû à sa forte compacité (blocs) et à sa très faible perméabilité empêchant l'infiltration d'eau.

III.6.2. Masse volumique des sols

III.6.2.1. Masse volumique des grains solides des sols ρ_s par la méthode du pycnomètre (NF P 94 – 054)



Figure III.11 : Matériels pour essai au pycnomètre.

L'essai au pycnomètre permet de déterminer la masse volumique des grains solides des sols ' ρ_s ', cette masse volumique concerne uniquement les particules solide qui constituent l'élément du sol sans inclure les vides qu'il contient.

Pour exécuter l'essai, on procède à la préparation de l'échantillon de sol en prenant 50g de passant au tamis 2mm. Cette quantité est étuvée à 105°C pendant 24 heures, puis introduite dans le pycnomètre. On y ajoute alors de l'eau distillé de sorte qu'il n'y est plus de bulles d'air.



Figure III.12 : Pesée du pycnomètre contenant le matériau.

La formule employée pour déterminer la masse volumique des grains solide est la suivante :

$$\rho_s = (M_2 - M_1) \rho_w / [(M_4 - M_1) + (M_2 - M_3)]$$

Avec :

- M_1 : Masse du pycnomètre vide ;
- M_2 : Masse du pycnomètre avec particules solides ;
- M_3 : Masse du pycnomètre avec particules solides et eau ;
- M_4 : Masse du pycnomètre avec eau ;
- ρ_w : Masse volumique de l'eau ($1g/cm^3$).

III.6.2.1.1. Présentation des résultats

Les résultats obtenus se présentent dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Résultats des pesées au pycnomètre.

Paramètre	Masse (g)
M_1	202
M_2	252
M_3	796,1
M_4	764,8

$$\rho_s = (249.9 - 202) * 1 / (764.8 - 202 + 252 - 796.1) = 2.56 \text{ g/cm}^3$$

La masse volumique sèche après calcul est donc égale à 2.56 g/cm^3 .

III.6.2.2. Masse volumique humide des sols ρ_h par pesée hydrostatique (NF P 94-064)

La pesée hydrostatique permet de déterminer la masse volumique humide du sol, pour ce fait il est nécessaire de se munir d'une balance de précision et équipement à pesée hydrostatique, d'un bac à paraffine et d'un récipient d'eau.

L'essai consiste à peser les échantillons de sols à l'air libre, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage, et enfin, repeser le tout plongé dans l'eau.

Il sera simple de déduire par la suite le degré de saturation « S_r » et l'indice des vides du sol « e », car les masses volumiques et la teneur en eau sont reliées à ces paramètres à travers plusieurs équations simples.



Figure III.13 : Échantillons paraffinés et matériels de pesée hydrostatique.

La formule employée pour déterminer la masse volumique humide du sol est :

$$\rho_h = \frac{M_r}{\frac{M_{rp} - M'_{rp}}{\rho_w} - \frac{M_{rp} - M_r}{\rho_p}}$$

Avec : M_r : Masse de la roche ;

M_{rp} : Masse de la roche paraffinée à l'air libre ;

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

ρ_p : Masse volumique de la paraffine = 0.88 g/cm^3 ;

ρ_w : Masse volumique de l'eau = 1 g/cm^3 .

III.6.2.2.1. Présentation des résultats

Tableau III.5 : Tableau des résultats des pesées hydrostatiques.

Paramètres	Echantillons				Moyenne
	1	2	3	4	
M_r	14	13.5	12.3	14.7	13.63
M_{rp}	15.7	15.3	14	15.9	15.23
M'_{rp}	8.3	7.9	6.5	8.1	7.7

$$\rho_h = \frac{13.63}{\frac{15.23 - 7.7}{1} - \frac{15.23 - 13.63}{0.88}} = 2.39$$

La masse volumique humide après calcul est de 2.39 g/cm³.

III.6.2.3. Masse volumique sèche ρ_d (NF P 94-064)

La masse volumique sèche du sol se déduit par l'équation suivante désignant le rapport de la masse du matériau à l'état sec au volume total du sol :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t}$$

Après transformation de l'équation, et en connaissant la relation reliant la masse volumique sèche à la masse volumique humide nous obtenons :

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{(1+w)}$$

La classification des masses volumiques sèches sont donnée par la norme NF P 94-064 comme suivant :

Tableau III.6 : Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche (NF P 94-064).

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

III.6.2.3.1. Présentation des résultats

$$\rho_d = \frac{2.39}{(1+0.0133)} = 2.36$$

Après calcul, on obtient une masse volumique sèche $\rho_d = 2.36$ g/cm³.

III.6.2.3.2. Interprétation des résultats

La masse volumique de l'échantillon de marne étudié est supérieure à 1.8 g/cm³ avec une valeur de 2.36 g/cm³, ce qui signifie que nous sommes en présence d'une marne dense.

III.6.3. L'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 :

$$e = \frac{V_v}{V_s} \text{ avec } e = \left(\frac{\rho_s}{\rho_d} \right) - 1$$

III.6.3.1. Présentation des résultats

$$e = \left(\frac{2.88}{2.36} \right) - 1 = 0.22$$

Après calcul on obtient un indice des vides égal à 0.22.

III.6.3.1.1. Interprétation des résultats

L'indice des vides de l'échantillon est très petit, ce qui confirme que nous sommes en présence de marne dense.

III.6.4. le degré de saturation S_r

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.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \text{ Et aussi: } S_r = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(\frac{w}{e} \right)$$

Avec

- w : Teneur en eau ;
- e : indice des vides ;
- ρ_s : Masse volumique sèche ;
- ρ_w : Masse volumique de l'eau ;
- V_w : Volume de l'eau ;
- V_v : Volume des vides.

TERZAGHI définit six états de sols en fonction de leurs degrés de saturations :

Tableau III.7 : Interprétations des degrés de saturations établies par TERZAGHI.

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

Dans notre cas nous obtenons :

$$S_r = \left(\frac{2.88}{1} \right) \left(\frac{1.33}{0.22} \right) = 17.41\%$$

III.6.4.1. Interprétation des résultats

La valeur du degré de saturation de notre échantillon est comprise entre 1 et 25 %. Conformément au tableau précédent d'appréciation de TERZAGHI, notre marne est légèrement humide. Ce résultat est justifié par la présence d'une roche dense donc très peu perméable.

III.6.5. Limites d'Atterberg (NF P 94-051)

Les limites d'atterberg permettent de prévoir le comportement des sols lors des opérations de terrassements sous l'action des variations de teneurs en eaux. Elles définissent les indicateurs qualifiants de la plasticité du sol.

Le principe suivant la norme NF P94-051 consiste à récupérer les éléments fins de notre échantillon en le faisant passer à travers un tamis de dimensions de 400 μm . Le but est de calculer la limite de liquidité à la coupelle et la limite de plasticité au rouleau, puis de calculer la teneur en eau pondérale correspondante aux différents états de sol.

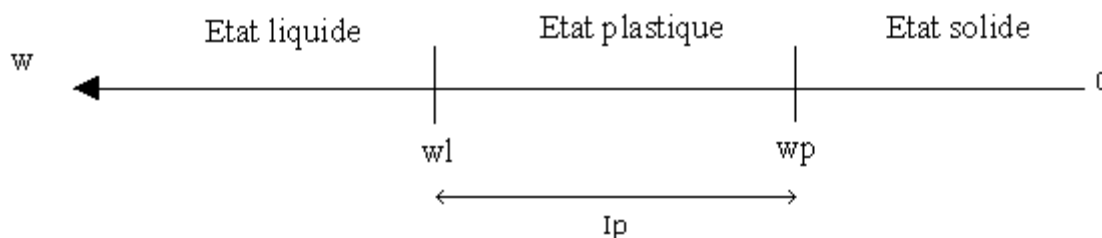


Figure III.14 : Différents états de consistances d'un sol.

III.6.5.1. Limite de liquidité W_l

La limite de liquidité est exprimée en pourcentage, elle définit la teneur en eau équivalent au seuil entre l'état plastique et l'état liquide d'un sol. La teneur en eau recherchée correspond à une fermeture d'un centimètre de la rainure au bout de 25 chocs à l'aide de l'appareil de Casagrande.

L'essai de détermination de la limite de liquidité s'effectue conformément à la norme NF P 94-051, laquelle consiste à imbiber pendant 24h notre échantillon pour permettre la saturation de toutes les particules de sol. Ensuite s'effectue un tamisage par lavage de l'échantillon au tamis 0.4 mm, on récupère alors les passants du tamis (environ 300g) et l'eau de lavage dans un bac. Enfin, le matériau est laissé pendant 12h pour décanter, et les particules solides sont récupérées pour en faire une pâte homogène.

III.6.5.1.1. Appareillage

La réalisation de cet essai nécessite :

- Une balance de précision ;
- Appareillage de Casagrande avec accessoires (coupelles, outil de rainure) ;
- Spatules ;

- Etuve ;
- Tamis de 400 µm de maille ;
- Tares.



Figure III.15 : Appareillages et échantillon pour les limites d'Atterberg.

III.6.5.1.2. Présentation des résultats

Tableau III.8 : Présentation des résultats pour la limite de liquidité.

N° d'essai	1	2	3	4
Nombre de coups	18	19	24	35
Teneur en eau %	25	24.7	24.2	22.6

Une droite présentée sur une échelle semi-logarithmique de la teneur en eau en fonction du nombre de chocs permet de déduire la teneur en eau à 25chocs.

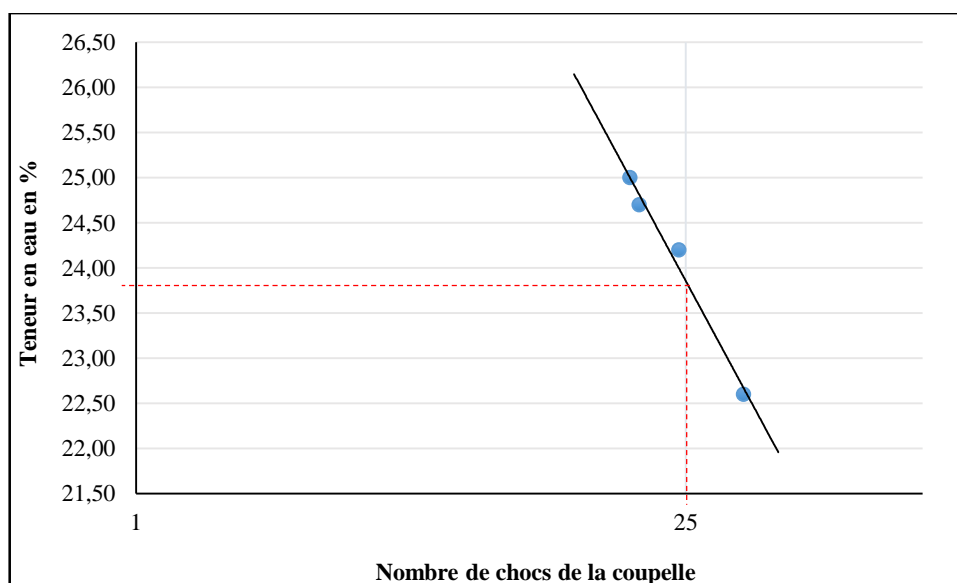


Figure III.16 : Détermination de la limite de liquidité.

La limite de liquidité obtenue est de $w_l = 23.8\%$

III.6.5.2. La limite de plasticité w_p

La limite de plasticité représente la teneur en eau transitoire de l'état plastique à l'état semi-solide. Cette limite est déterminée en prélevant une petite quantité d'échantillon de pâte qu'on roulera délicatement sur une plaque en verre ou un plan de travail en marbre. La limite de plasticité sera atteinte lorsque le rouleau se fissurera aux alentours de 3mm de diamètre. La partie centrale sera alors prélevée pour déterminer de nouveau sa teneur en eau.



Figure III.17 : Rouleau pour déterminer la limite de plasticité.

III.6.5.2.1. Présentation des résultats

Après plusieurs tentatives, la limite de plasticité n'a pas pu être déterminée, ce qui signifie que la limite de plasticité du matériau étudié est non mesurable.

III.6.5.2.2. Interprétation des résultats

La difficulté observée lors de l'exécution de l'essai, est expliquée par la présence d'une fraction sableuse dans le matériau.

III.6.6. Valeur de bleu de méthylène VBS, essai à la tâche (NF P 94-068)

L'essai consiste à mesurer la capacité d'absorption du bleu de méthylène dans un échantillon de sol mis en suspension dans l'eau, cette valeur définit l'argilosité du matériau.

L'essai à la tâche s'effectuera conformément à la norme NF P 94-068. Ayant un matériau rocheux faiblement argileux (sans limite de plasticité) il nous faudra prélever une masse d'échantillon supérieur à 60g de classe 0/5.

Le matériau sera alors introduit dans un récipient avec 500ml d'eau distillée, puis agité à 700t/mn pendant 5mn. Une fois l'opération terminée on introduira dans le mélange à 400t/mn des volumes de bleu de méthylène de l'ordre de 5 cm^3 à 10 cm^3 progressivement, en prenant soin d'effectuer une tâche à l'aide d'une tige en verre sur un papier filtre pour évaluer nos résultats.



Figure III.18 : Mise en suspension des particules dans l'eau distillée, ajout du bleu de méthylène et prise de la tâche.

L'essai sera terminé lorsque cinq tâches seront dites positives sans ajout de bleu, en effet, une tache positive est parsemée d'une auréole bleu claire, ce qui signifie que les particules sont saturées en bleu de méthylène. Tandis qu'une tache négative restera bleu foncé (absorption total de la matière).

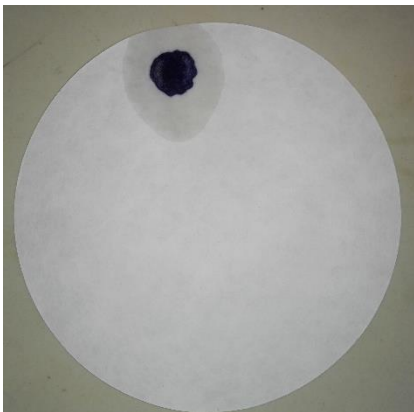


Figure III.19 : Tache de bleu de méthylène négative.

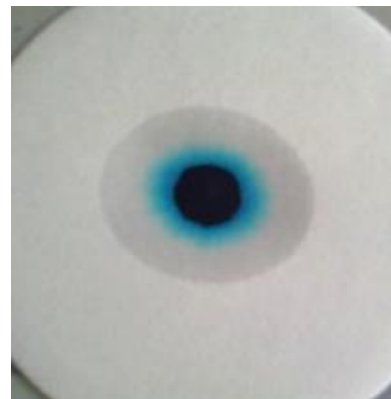


Figure III.20 : Tache de bleu de méthylène positive.

-La masse du bleu de méthylène se détermine à l'aide de l'équation :

$$B = V \cdot 0.01$$

-Le VBS est égal à :

$$VBS = (B / M_0) \cdot 100$$

Avec :

M_0 : Masse sèche de la prise d'essai.

La valeur du bleu de méthylène VBS permet de classer les sols selon leur teneur en argile comme suivant :

Tableau III.9 : Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068).

Valeur du VBS	Interprétation
VBS < 0.1	Sol insensible ou peu sensible à l'eau
0.1 < VBS < 0.2	Apparition de la sensibilité à l'eau
0.2 < VBS < 1.5	Sol sablo-argileux
1.5 < VBS < 2.5	Sol sablo-limoneux
2.5 < VBS < 6	Sol limoneux
6 < VBS < 8	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

III.6.6.1. Présentation des résultats

Tableau III.10 : Récapitulatif des résultats de l'essai à la tâche.

Paramètre	Valeur
Masse sèche de la prise d'essai après calcul	98.68g
Volume de la solution de bleu de méthylène	33cm ³
Masse de bleu de méthylène B	0.33g
Valeur au bleu VBS	0.334

III.6.6.2. Interprétation des résultats

Nous avons obtenu après calcul un VBS égal à 0.334, cette valeur est comprise entre 0.2 et 1.5 ce qui signifie que l'échantillon est un sol sablo-argileux.

III.7. Préparation du mélange de marne et de déchets plastiques



Figure III.21 : Mélange de marne et de déchets plastiques.

Les déchets plastiques présentent une légèreté très importante contrairement à la marne. Les proportions sélectionnées pour les différents échantillons en fonction de la masse totale seront donc de :

- Un échantillon de marne seule ;
- Un échantillon de marne + 1 % de déchets plastiques ;
- Un échantillon de marne + 3 % de déchets plastiques ;
- Un échantillon de marne + 5 % de déchets plastiques ;
- Un échantillon de marne + 7 % de déchets plastiques.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'origine, identification ainsi que la préparation des échantillons reconstitués de granulats de marne et de déchets plastiques, ce qui permettra par la suite une meilleure interprétation des résultats d'essais mécaniques réalisés. En effet, la marne étudiée est argilo-sableuse et dense, elle contient une proportion sableuse non négligeable étant donnée la difficulté à déterminer sa limite de plasticité.

Sera entamée dans le prochain chapitre la première série d'essais mécaniques à savoir, les essais de compactage Proctor et les essais de portance CBR, permettant d'étudier l'aptitude au compactage ainsi que la portance des mélanges présentés (marne + déchets plastiques).

Chapitre IV

Compactage et portance des matériaux étudiés

IV.1. Introduction

La stabilité des ouvrages est liée directement à la nature du sol support. Ce dernier, présente des caractéristiques mécaniques lui procurant une capacité portante bien précise.

Autrefois, lors de la conception d'un projet et de la recherche du site d'implantation, le sol possédant une faible portance était abandonné et changé, une opération tout à fait faisable vue l'étendue et la disponibilité des sites. Aujourd'hui, de par l'exploitation croissante est née un déficit de ces derniers, d'où l'importance de les traiter pour les améliorer.

L'amélioration de la portance d'un sol peut se faire à travers plusieurs procédés.

D'une part, grâce aux adjonctions de liants, tel que l'ajout de bitume, ciment, chaux ou autres, un procédé connu pour être relativement coûteux.

D'autre part, par le compactage mécanique, qui demeure la méthode la plus utilisée, principalement dans la mise en œuvre sur chantiers.

Dans ce chapitre sera exposée la méthode de compactage mécanique et l'évaluation de la portance des échantillons de sol, essais indispensables pour la conception d'ouvrages routiers.

IV.2. Définition et principe de base du compactage

Le compactage consiste à appliquer suffisamment d'énergie au sol pour y réduire l'indice des vides et ainsi en accroître la compacité. La masse volumique sèche d'un sol compacté sera donc supérieure à celle d'un sol non compacté (Robitaille, 1997).

En effet, la masse volumique sèche est un paramètre permettant d'étudier l'évolution du compactage et son efficacité. Cette grandeur est utile car significative même dans le cas de sols humides. Ce principe reste applicable grâce aux équations reliant la teneur en eau aux masses volumiques entre elles (sèche et humide).

Le compactage contribue à l'augmentation de la densité, de la résistance au cisaillement, à la diminution du retrait et de la perméabilité et enfin à la diminution de la compressibilité.

IV.3. Facteur influant le compactage

Le compactage est influencé par plusieurs paramètres. La masse volumique du sol varie en fonction de :

- La teneur en eau ;
- L'énergie de compactage ;
- La granulométrie.

IV.3.1. L'influence de la teneur en eau

En 1933, l'ingénieur américain Proctor a mis au point l'essai de compactage « essai Proctor » à travers lequel est apparue l'influence de la teneur en eau sur la compacité d'un sol.

Ces résultats ont montré que la hausse de la teneur en eau dans l'échantillon compacté augmentait sa masse volumique sèche « ρ_s » jusqu'à l'obtention d'une densité maximum du sol, une fois ce seuil atteint, l'augmentation de la teneur en eau réduisait alors la masse volumique sèche, et donc en résultait une compacité plus faible.

La courbe de compactage Proctor, résume parfaitement ce phénomène. Cette courbe est sous forme de cloche avec un sommet qui définit l'optimum Proctor. Cette valeur correspond à la densité maximale ainsi qu'à la teneur en eau optimum nécessaire. Cette allure est due à la qualité lubrifiante de l'eau dans le processus de compactage.

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.

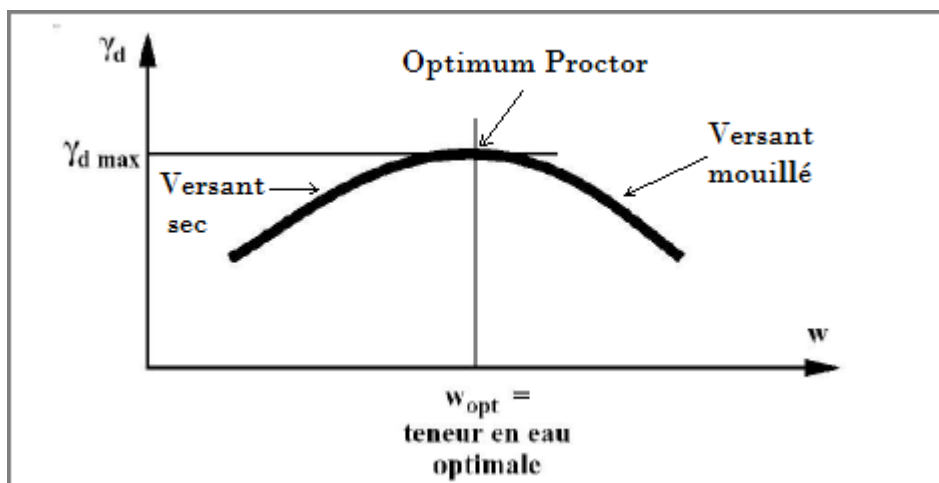


Figure IV.1 : Allure d'une courbe de compactage.

IV.3.2. L'influence de l'énergie de compactage

L'énergie de compactage est l'énergie mécanique transmise à un volume de sol pour y réduire l'indice des vides (Robitaille, 1997).

Si l'on observe à droite de la courbe précédente, on remarque la partie du versant mouillée, cette partie étant l'extrémité de la courbe Proctor est limitée par l'abscisse de teneur en eau $w = w_{\text{sat}}$, cette limite suit l'allure de la courbe de saturation (partie où le sol est saturé).

Pour compacter un sol, il est nécessaire de lui appliquer des coups avec une hauteur de chute précise, le compactage optimise les vides d'air et décroît lorsque les vides sont saturés, on conclut alors qu'une augmentation de l'énergie de compactage améliore la compacité mais surtout que les nouvelles courbes seront sensiblement parallèles à la courbe de saturation ' S_r '.

On obtient alors l'allure suivante :

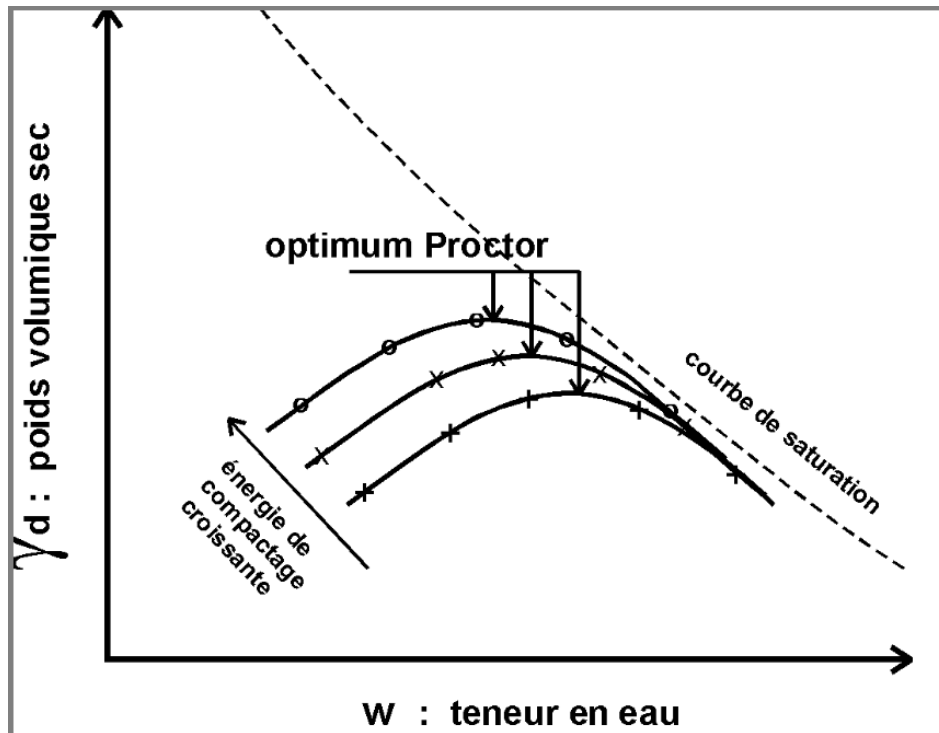


Figure IV.2 : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor.

IV.3.3. L'influence de la granulométrie

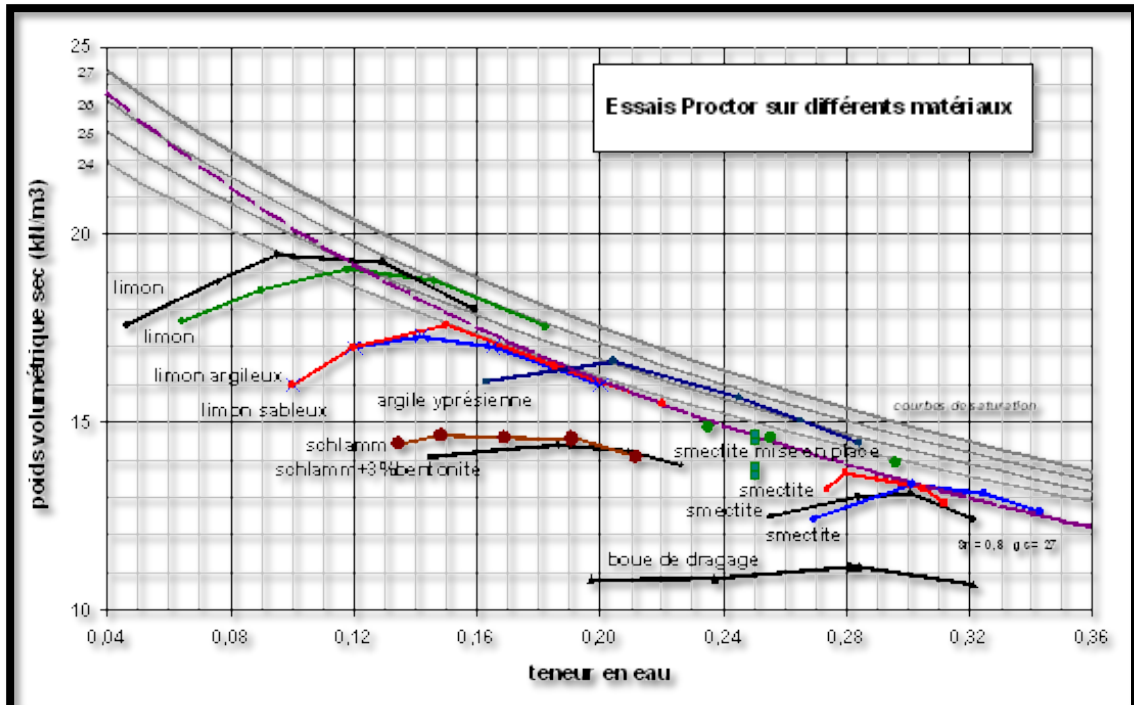


Figure IV.3 : Exemple de l'influence de la granulométrie sur le compactage (Office wallon des déchets, juin 2000).

La granulométrie d'un sol joue un rôle radical dans le compactage. Un matériau soumis au compactage de granulométrie grossière et graduée présentera une masse volumique sèche maximale bien plus élevée qu'un matériau de granulométrie plus petite et graduée. La teneur en eau quant à elle, sera plus grande pour un matériau fin que pour un matériau grossier.

IV.4. Les essais de compactages en laboratoire

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

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

IV.5. Les essais Proctor

Les essais Proctor consistent à simuler le compactage en laboratoire pour déterminer les conditions optimales de mise en œuvre d'un matériau sur chantier et donc d'évaluer le comportement de ce dernier. Ils déterminent la masse volumique sèche maximale pour une énergie de compactage donnée. Ces essais s'effectuent conformément à la norme française NF P 94-093.

Il existe deux types d'essai Proctor :

- L'essai Proctor normal ;
- L'essai Proctor modifié.

IV.5.1. L'essai Proctor normal

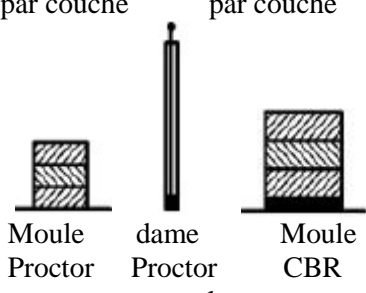
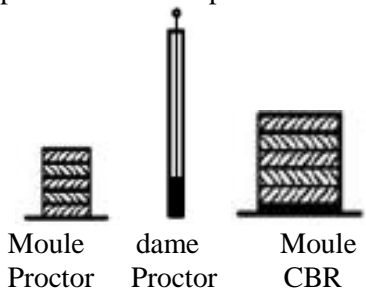
L'essai Proctor normal est utilisé dans le cas des remblais. Il consiste à mesurer la masse volumique sèche d'un échantillon de sol en trois couches, dans un moule de volume spécifique à celui-ci. On effectuera le compactage à l'aide d'une dame ayant un mouton de 2.49 kg et une hauteur de chute égale à 305 mm. Chaque couche sera compactée par un nombre de coups donnés en fonction du moule utilisé.

IV.5.2. L'essai Proctor modifié

L'essai Proctor modifié est caractérisé pour son énergie de compactage intense, il est utilisé pour les couches de chaussées, pistes d'aérodromes...

Il comporte les mêmes étapes que l'essai Proctor normal, néanmoins le nombre de couches est de cinq, les coups pour chaque couches dépendent du moule employé et la dame possède un mouton de 4.54 kg ainsi qu'une hauteur de chute de 457 mm.

Tableau IV. 1 : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (AFNOR ,1999).

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.5.2.1. Principe de l'essai Proctor modifié

L'essai consiste à soumettre cinq échantillons du même matériau à un compactage sous différentes teneurs en eau variant de 1 à 2.5%. Le but est de pouvoir tracer la courbe Proctor, à l'aide de ces cinq points obtenus pour déterminer l'optimum Proctor.

IV.5.2.2. Appareillage

L'exécution de l'essai se fait comme indiqué par la norme NF P 94-093, en utilisant le matériel suivant :

- Socle de compactage en béton ;
- Moule CBR ;
- Dame Proctor modifié ;
- Règle à arasé ;
- Dispositif d'extraction des éprouvettes ;
- Etuve ;
- Bac ;
- Truelles pour malaxer ;

- Balance de précision.



Figure IV.4 : Matériels utilisés pour l'essai Proctor modifié.

IV.5.2.3. Mode opératoire

Il existe plusieurs conditions pour le choix du moule à utiliser afin d'effectuer l'essai. Ces conditions dépendent du diamètre du plus gros grain constituant le matériau à étudier.

- Si $D \leq 5$ mm (et seulement dans ce cas), moule PROCTOR, mais le moule C.B.R. conseillé ;
- Si $5 \text{ mm} < D \leq 20$ mm, utiliser le moule C.B.R ;
- Si $D > 20$ mm, il faut tamiser à 20 mm et peser le refus ;
- Si refus ≤ 30 %, effectuer l'essai dans le moule C.B.R. sans le refus (échantillon écrêté à 20 mm) et appliquer une correction sur les valeurs trouvées ;
- Si refus > 30 %, l'essai Proctor ne peut être fait.

Chaque essai se fera en prélevant 5 kg de matériaux préalablement étuvé à 105°C pendant 24h. La teneur en eau sera calculée en fonction du poids total. L'échantillon est humidifié et mélangé en prenant soin d'homogénéiser le tout.

Dans un bac le mélange est étalé et partagé en cinq couches identiques, qui seront soumises une par une à 56 coups de dame. Une fois les cinq couches compactées, on arase le surplus pour obtenir une éprouvette ayant le même volume que le moule CBR (connu).

On effectue alors l'extraction de l'éprouvette à l'aide du dispositif hydraulique, celle-ci sera pesée pour déterminer sa masse humide M_h , étuvée puis repesée pour déduire sa masse sèche M_s .



Figure IV.5 : Différentes étapes de l'exécution de l'essai Proctor modifié.

La masse volumique sèche et la teneur en eau sont alors obtenues grâce aux équations suivantes :

- Calcul de la teneur en eau : $w = (M_h - M_s).100 / M_s$
- Calcul de la masse volumique sèche :

$$\rho_d = \frac{M_s}{V} \quad \text{avec } V : \text{volume du moule CBR} = 2124\text{cm}^3.$$

IV.5.2.4. Présentation des résultats

1. Echantillon de marne seule

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai Proctor du matériau marne.

Teneur en eau initiale w (%)	Masse humide M_h (g)	Masse sèche M_s (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
5	4330,71	4120,56	5,1	1,940
6	4453,65	4205,52	5,9	1,98
8	4647,96	4332,96	7,27	2,04
10	4574,76	4205,52	8,78	1,98
12	4522,32	4099,32	10,32	1,93

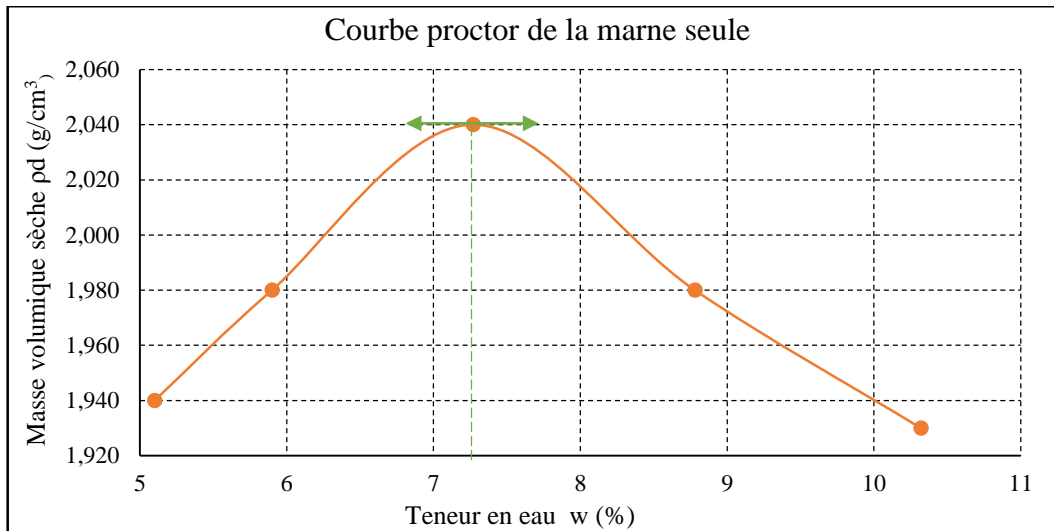


Figure IV.6 : Courbe Proctor de la marne.

2. Echantillon de marne + 1% de déchets plastiques

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 1% de déchets plastiques.

Teneur en eau initiale w (%)	Masse humide $M_h(g)$	Masse sèche $M_s(g)$	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
6	4525,390	4269,240	6,000	2,010
7	4747,000	4426,000	7,250	2,083
8	4794,000	4431,000	8,190	2,086
10	4667,800	4263,000	9,500	2,000

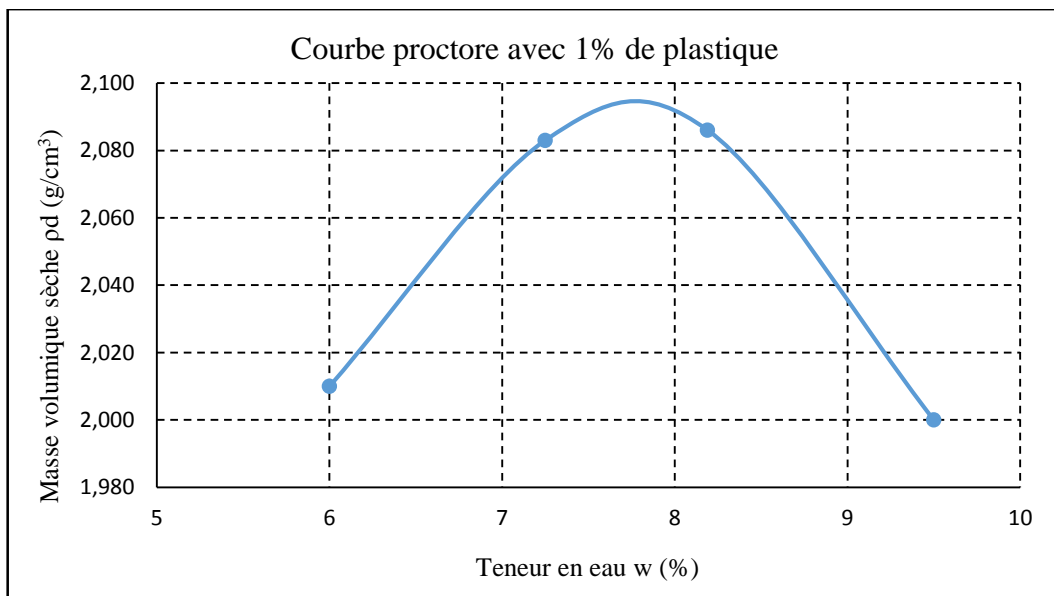


Figure IV.7 : Courbe Proctor de la marne + 1% de déchets plastiques.

3. Echantillon de marne + 3% de déchets plastiques

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 3% de déchets plastiques.

Teneur en eau initiale w (%)	Masse humide M_h (g)	Masse sèche M_s (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
5	4312,48	4099,32	5,2	1,930
6	4390	4139	5,8	1,953
8	4557	4238	7,53	2
10	4627	4132	10,98	1,93

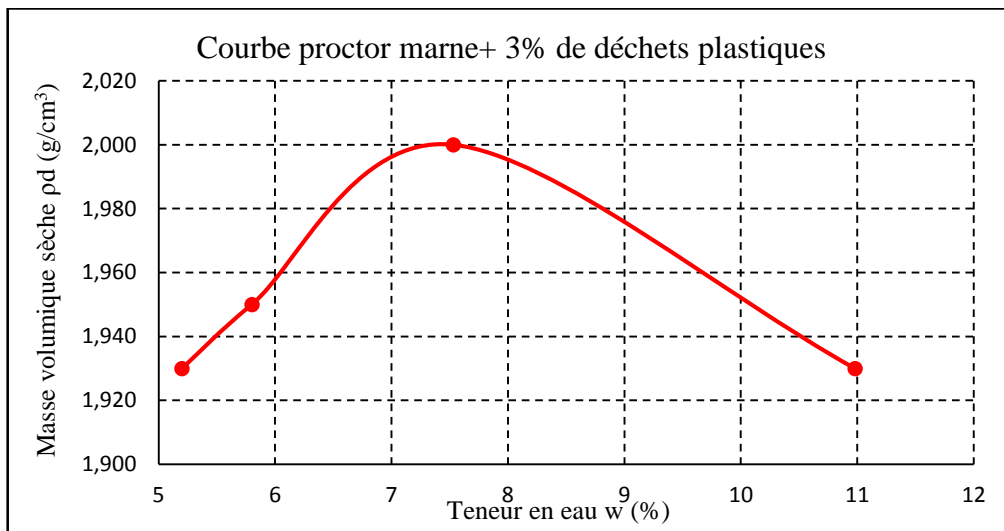


Figure IV.8 : Courbe Proctor de la marne + 3% de déchets plastiques.

4. Echantillon de marne + 5% de déchets plastiques

Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 5% de déchets plastiques.

Teneur en eau initiale w (%)	Masse humide M_h (g)	Masse sèche M_s (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
6	4191	3944	6,26	1,86
8	4398	4067	8,138	1,92
10	4454	4062	9,65	1,91
12	4428,64	3971,88	11,5	1,87

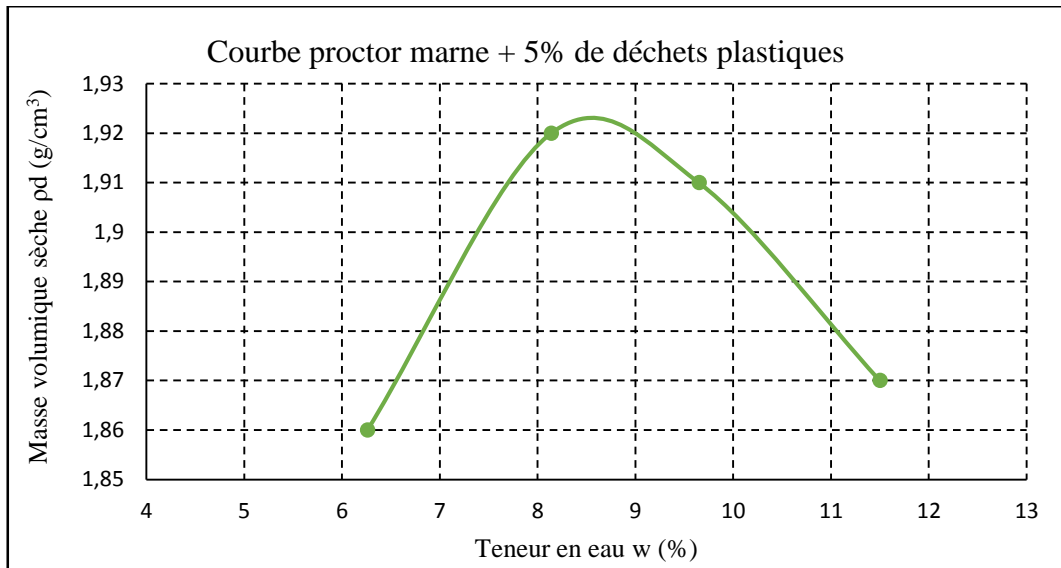


Figure IV.9 : Courbe Proctor de la marne + 5% de déchets plastiques.

5. Echantillon de marne + 7% de déchets plastiques

Tableau IV.6 : Résultats de l'essai Proctor de la marne + 7% de déchets plastiques.

Teneur en eau initiale w (%)	Masse humide M_h (g)	Masse sèche M_s (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
6	4187	3946	6,50	1,855
8	4270	3963	7,75	1,87
10	4370	4000	9,25	1,88
12	4363	3902	11,8	1,85

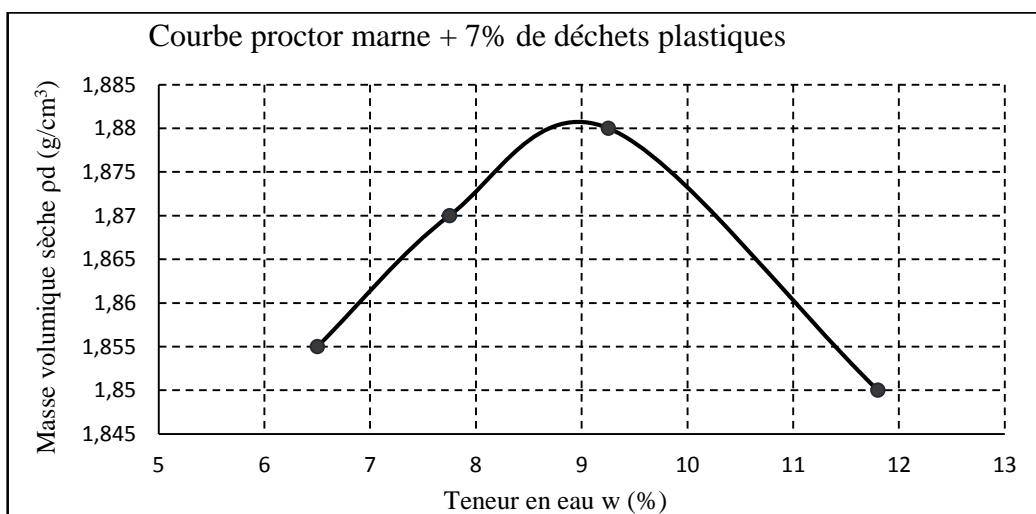


Figure IV.10 : Courbe Proctor de la marne + 7% de déchets plastiques.

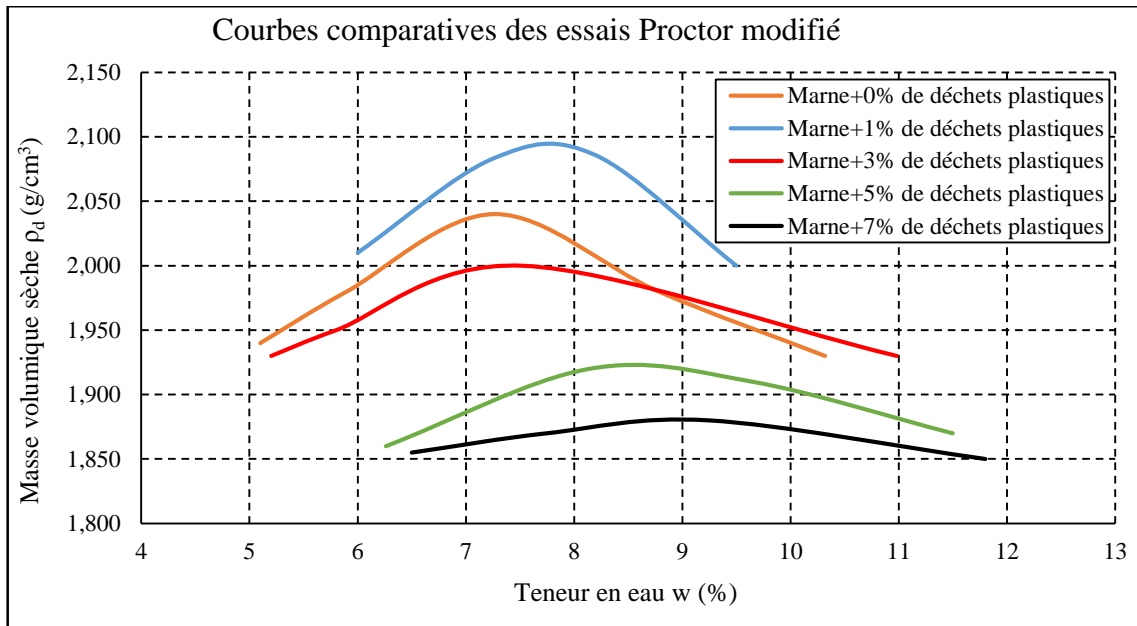


Figure IV.11 : Courbes comparatives des essais Proctor modifié.

Tableau IV.7 : Evolution des teneurs en eau et des Masses volumiques sèches.

Echantillon	Teneur en eau w (%)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm^3)
Marne + 0% de déchets plastiques	7,27	2,04
Marne + 1% de déchets plastiques	7,75	2,09
Marne + 3% de déchets plastiques	7,53	2,00
Marne + 5% de déchets plastiques	8,50	1,92
Marne + 7% de déchets plastiques	8,99	1,88

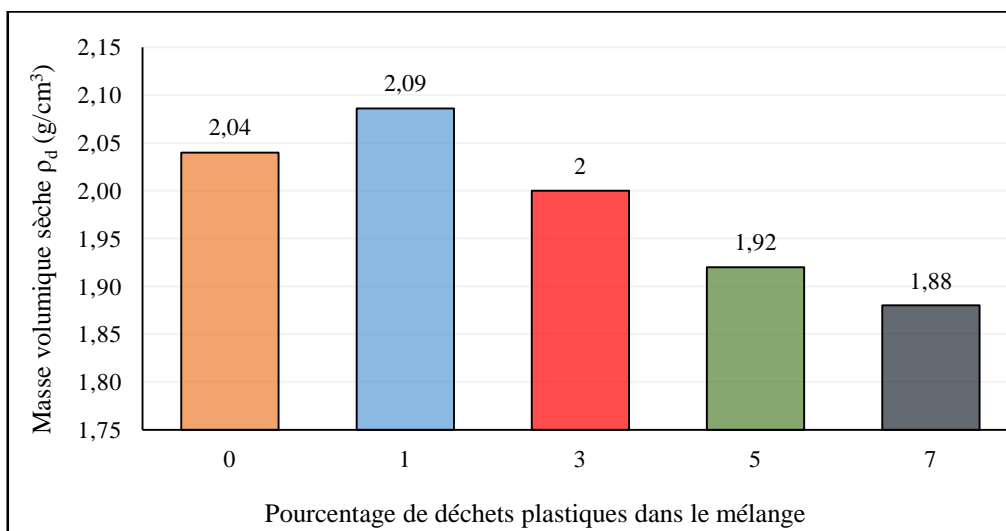


Figure IV.12 : Evolution des masses volumiques sèches.

Teneur en eau optimales des différents mélanges

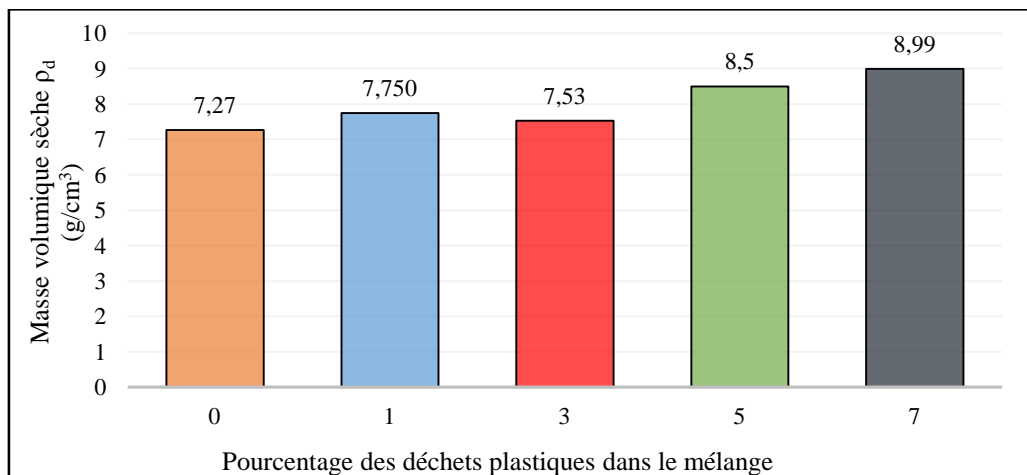


Figure IV.13 : Evolution de la teneur en eau des différents mélanges.

IV.5.2.5. Interprétation des résultats

A première vue, nous pouvons constater que les courbes Proctor présentées sur la figure IV.11 présentent une allure moins bombées avec l'ajout du plastique. Ceci traduit que les échantillons étudiés sont de plus en plus moins sensibles à l'eau, pour des pourcentages de plastique supérieurs à 1%. Ceci peut être expliqué par le fait que le plastique connu insensible à l'eau (matériau non absorbant) qui occupe une proportion de plus en plus importante dans les mélanges.

Les figures IV.6 et IV.7, montrent que les premiers ajouts du plastique (1%) influe légèrement sur les caractéristiques à l'optimum des échantillons étudiés. En effet, la densité sèche s'améliore légèrement en passant de 2,04 à 2,09 pour des teneurs en eau de 7,25% à 2,75% respectivement.

Nous pouvons dire dans ce cas, que la proportion de 1% de plastique permet de combler précisément les vides existants dans la structure marneuse de classe (0/20) pour rendre les mélanges relativement plus denses à des teneurs en eau légèrement plus réduites.

Au-delà de 1% de plastique, les mélanges commencent à perdre de plus en plus de leurs densités pour des teneurs en eau de plus en plus importantes. En effet, pour des teneurs en plastique de 7%, les densités sèches passent à 1,88 et les teneurs en eau correspondantes sont de l'ordre de 9%.

Un excès de plastique provoque une désorganisation de la structure granulaire des mélanges, notamment avec l'aspect feuilleté des déchets plastiques, ce qui produit plus de vides dans les échantillons. Ces vides sont évidemment occupés par l'eau de compactage.

Toutefois, les densités sèches obtenues au compactage des mélanges sont globalement supérieures à 1,80, obtenues à des teneurs en eau n'excédant pas 10%. Ces résultats permettent de qualifier les mélanges étudiés du point de vue compactage comme matériaux acceptables et intéressants pour une utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic, relativement aux matériaux de chaussées utilisés dans la pratique par différentes entreprises présentant généralement, des densités variant de 1.8 à 2.6 selon la nature et l'intensité du trafic supporté par la chaussée.

IV.6. Essai de portance CBR (California Bearing ratio), (NF P 94-078)

L'essai CBR a été mis au point en 1929, par les ingénieurs T.E Stanton et O.J Poter du département des routes de Californie. Il sert à déterminer expérimentalement les indices portants « IPI et CBR » d'un sol, afin d'établir sa classification GTR (Guide des terrassements Routiers) et de déterminer l'épaisseur des chaussées. Il mesure la résistance à l'effort tranchant du sol et son gonflement lorsqu'il est immergé dans l'eau. Pour résumer, l'essai CBR estime la résistance au poinçonnement d'un sol en déterminant l'indice CBR, qui représente le pourcentage de la charge unitaire standard.

IV.6.1. Principe de l'essai CBR

L'essai CBR s'effectue à partir d'éprouvettes compactées à l'essai Proctor modifié, avec leurs teneurs en eau optimales.

Ces éprouvettes seront ensuite poinçonnées à l'aide d'un piston de section de $19,35\text{cm}^2$, enfoncé à une vitesse constante de $1,27\text{ mm/mn}$.

- L'indice CBR immédiat sera évalué sur une éprouvette compactée à sa teneur en eau optimale.
- L'indice CBR immergé sera évalué après une durée d'immersion de l'éprouvette préalablement compactée à la teneur en eau optimale. Cette durée peut atteindre 96 heures soit, quatre jours d'immersion pour simuler les conditions hydrologiques les plus défavorables.

IV.6.1. Appareillage

Pour le compactage des éprouvettes à l'essai Proctor modifié :

- Moule CBR ;
- Disque d'espacement ;
- Accessoires de compactage Proctor (dame Proctor modifié, règles à araser) ;
- Surcharges annulaires (simule la charge due au trafic).



Figure IV.14 : Moule CBR et accessoires de compactage Proctor modifié.

Pour la mise en immersion :

- Bac suffisamment profond pour immerger 100 % des éprouvettes ;
- Disque de gonflement perforé et papier filtre ;
- Comparateur de mesure du gonflement.

Pour le poinçonnement :

- Presse de poinçonnement CBR.



Figure IV.15 : Presse à poinçonnement CBR.

IV.6.2. Exécution de l'essai CBR

La première étape consiste à compacter les éprouvettes d'essai. L'essai est réalisé de la même manière qu'un essai Proctor modifié classique, néanmoins, il est important de placer au fond du moule un disque d'espacement. Ce disque servira plus tard à créer un vide pour y placer les surcharges annulaires censées reproduire les surcharges dues au trafic, car l'éprouvette sera retournée pour le poinçonnement.

La deuxième étape consiste à poinçonner les éprouvettes. Dans le cas de l'indice CBR immédiat, l'éprouvette est directement placée sur la presse. Dans celui de l'indice CBR immergé, celle-ci sera plongée dans l'eau pendant 96 heures.

On effectue alors les lectures indispensables sur les deux comparateurs de la presse. L'un indiquant l'enfoncement du poinçon, l'autre correspondant aux lectures de l'anneau qui seront converties par la suite en forces (KN).

L'indice CBR est la plus grande valeur obtenue à travers les équations suivantes correspondantes aux enfoncements de 2.5 mm et de 5 mm :

$$I_{(2.5)} = \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement(KN)}}{13,35}$$

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

Plus l'indice CBR sera élevé, plus la capacité portante du sol sera meilleure.

Dans le cas de l'indice CBR après immersion, le gonflement linéaire relatif G sera calculé :

$$G = \frac{\Delta h}{H} \times 100$$

Avec :

Δh : Gonflement mesuré en millimètre ;

H : Hauteur initiale de l'éprouvette = 116,4 mm



Figure IV.16 : Comparateur sur éprouvette mise en immersion.

Les classes de portances sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Les classes de portance des sols (CEBTP, 1984).

Essieu équivalent de 13 tonnes	Classe de la plate forme
$CBR < 5$	S1 (portance très faible)
$5 < CBR < 10$	S2 (portance faible)
$10 < CBR < 15$	S3 (portance moyenne)
$15 < CBR < 30$	S4 (portance élevée)
$CBR > 30$	S5 (portance très élevée)

IV.6.3. Présentation des résultats



Figure IV.17 : Eprouvette poinçonné.

Dans notre cas, nous avons déterminé les indices immédiats CBR et CBR immergés, pour chaque mélange de marne et de déchets plastiques.

Tableau IV.9 : Résultats de l'essai CBR.

Echantillons	Gonflements relatifs G (%)	Indice CBR immédiats (%)			Indices CBR après immersion (CBR_{imm}) (%)		
		$I_{(2.5)}$	$I_{(5)}$	IPI	$I_{(2.5)}$	$I_{(5)}$	CBR_{imm}
Marne seule	0,189	41,067	55,396	55,396	38,11	105,303	105,303
Marne +1% de déchets plastiques	0.12	36,078	55,625	55,625	34,53	72,907	72,907
Marne +3% de déchets plastiques	0.103	24,224	56,167	56,167	31,43	70,044	70,044
Marne +5% de déchets plastiques	0.095	12,885	33,114	33,114	10,31	28,947	28,947
Marne +7% de déchets plastiques	0.077	5,669	12,277	12,041	9,277	25,43	25,43

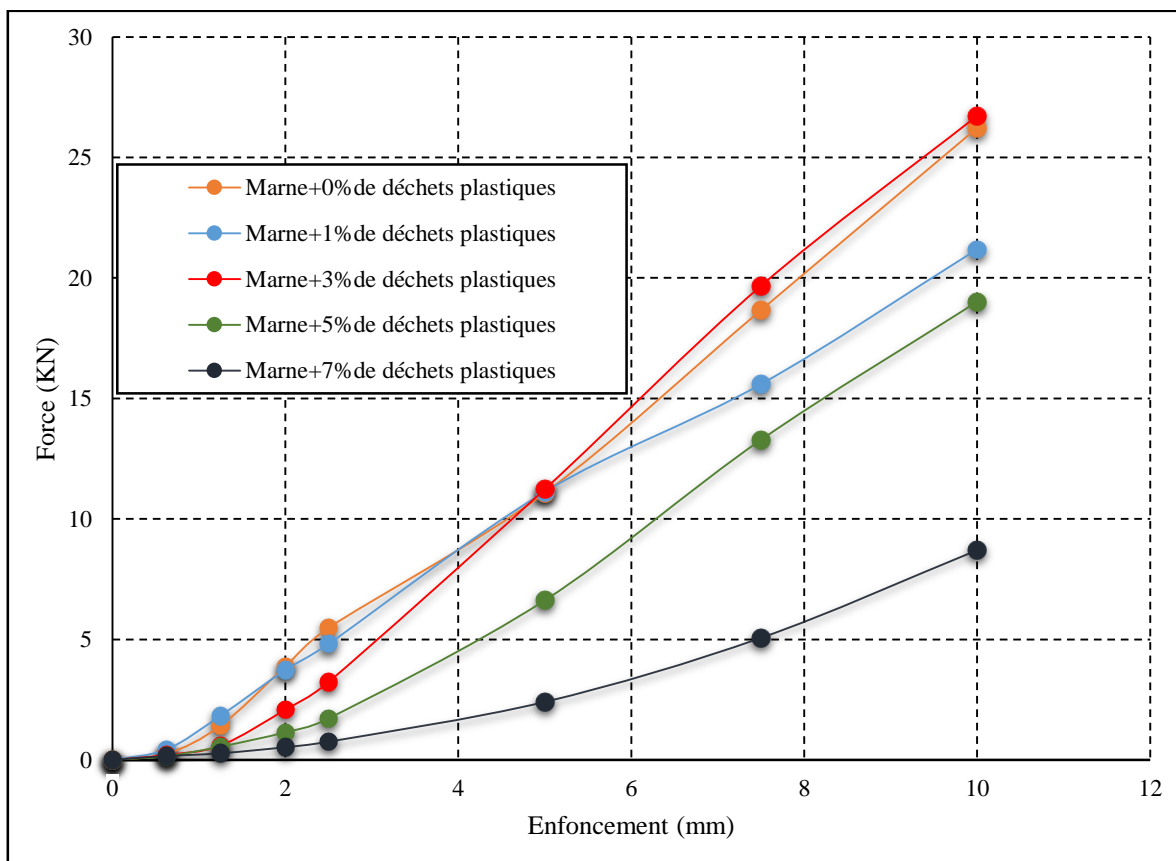


Figure IV.18 : Courbes comparatives des CBR.

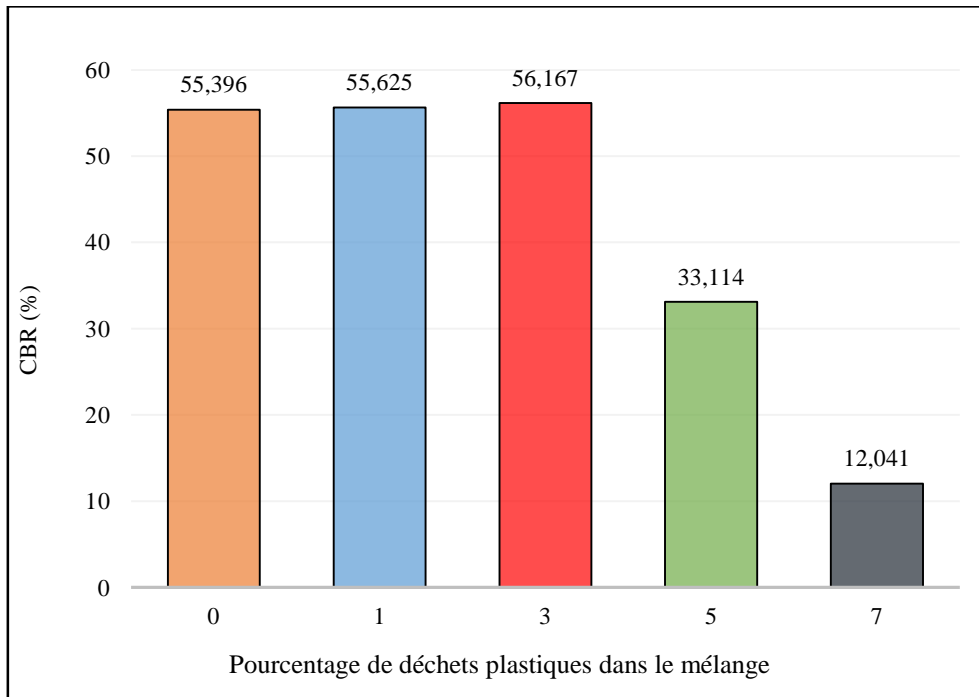


Figure IV.19 : Résultats de l'indice CBR immédiat.

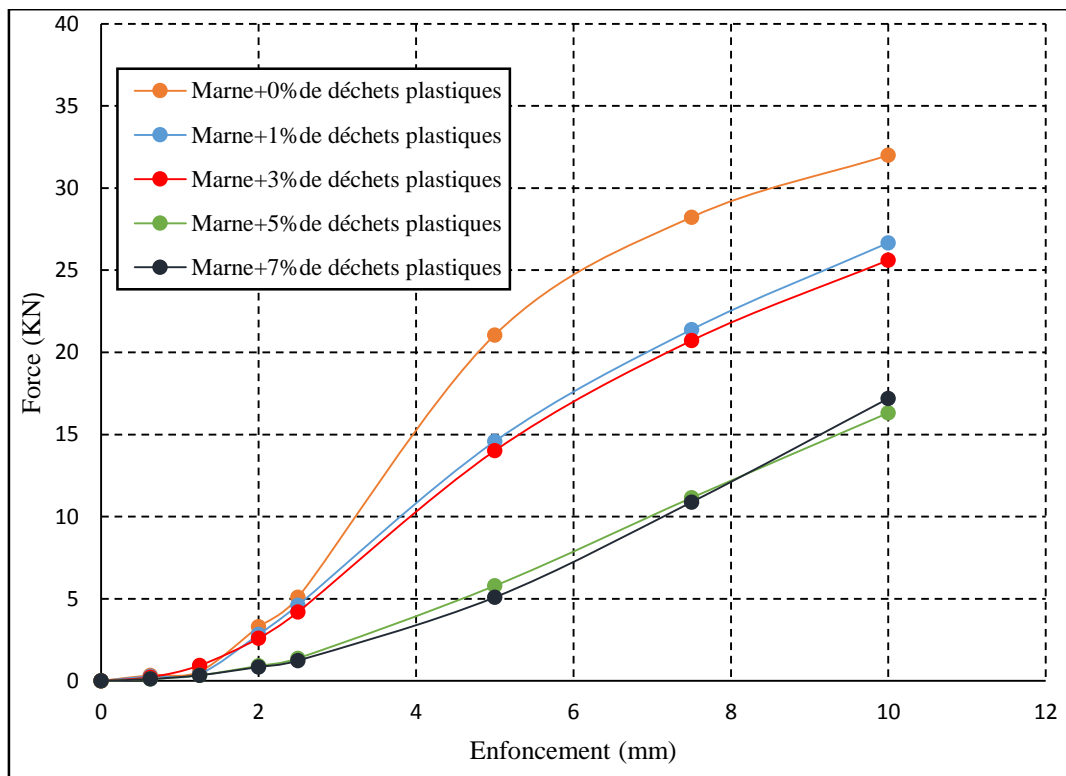


Figure IV.20 : Courbes comparatives de l'essai CBR immergé.

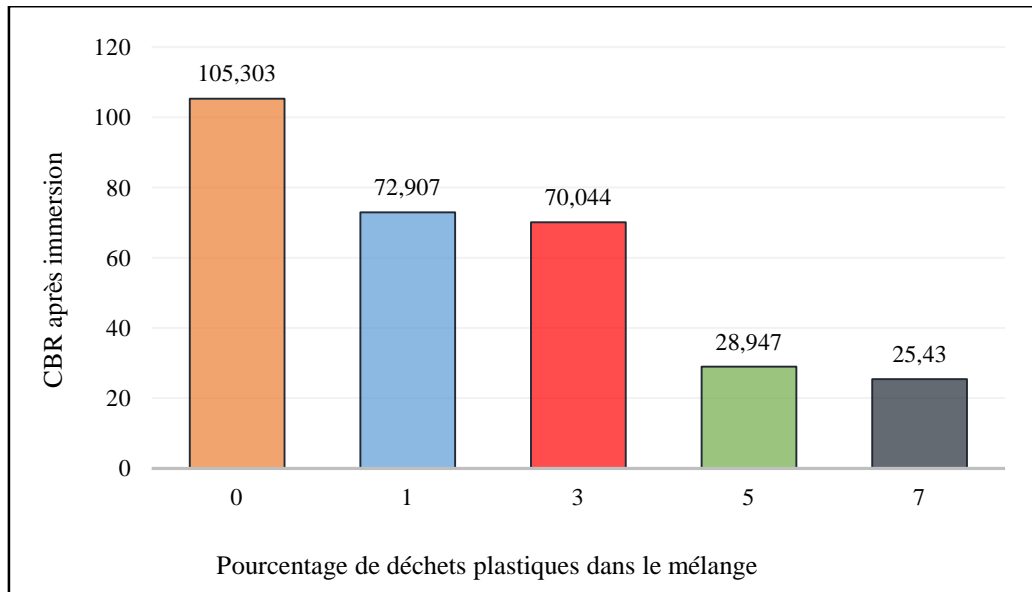


Figure IV.21 : Résultats de l'essai CBR immergé.

IV.6.4. Interprétation des résultats

a) L'indice immédiat CBR

Les résultats obtenus au poinçonnement des échantillons étudiés montrent une légère amélioration de l'indice CBR suite à l'ajout de déchets plastiques à des proportions n'excédant pas 3%. En effet, cette dernière développe la portance maximale avant immersion estimée à 56,17%, ce qui fait une augmentation d'environ 0,7% relativement aux échantillons de marne seule.

Au-delà de 3% de plastique, les mélanges perdent sensiblement de leurs portances. En effet, ces dernières passent de 56,17%, à 33,11% ensuite à 12,04% pour des pourcentages en plastique de 5% et 7% respectivement. Ceci peut être expliqué par la propriété du plastique à être facilement déformable sous chargement. En effet, contrairement à la marne qui présente un matériau rocheux résistant notamment à l'état sec, le plastique se déforme facilement lorsqu'il est soumis à une sollicitation mécanique.

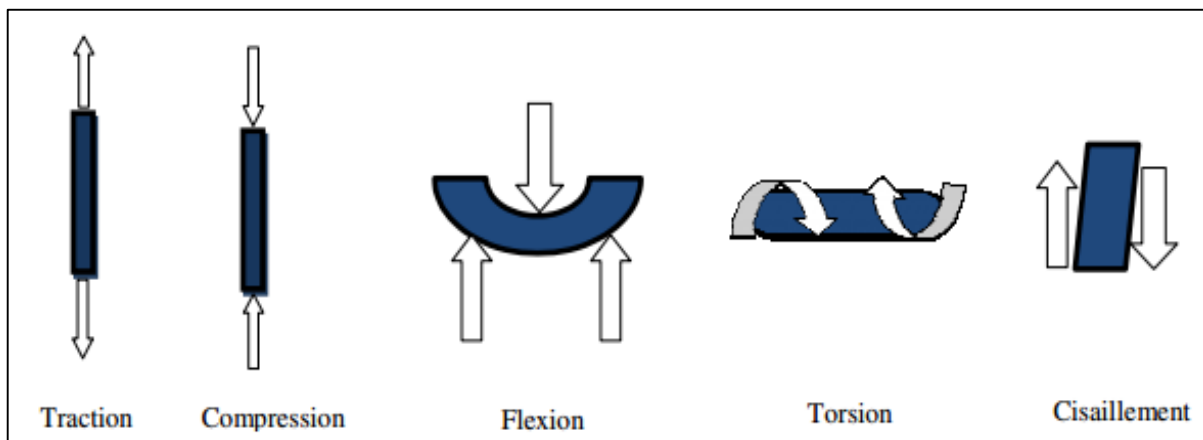


Figure IV.22 : Déformation du plastique en fonction de la sollicitation (Seyni, 2008).

Une quantité élevée de plastique favorise la compressibilité de l'ensemble. On en conclut alors qu'il est plus facile de poinçonner une éprouvette contenant une plus grande proportion de déchets plastiques, d'où la chute de portance.

Toutefois, les portances développées par les différents mélanges sont supérieures à 10%, ce qui permet de classer les échantillons étudiés dans la catégorie de sols de classe S3 à S5, de portances moyennes à très élevées.

b) CBR après immersion

Les échantillons (marne avec ou sans plastique) poinçonnés après immersion ont développé des portances très importantes de l'ordre de 105%. Ceci peut être expliqué par la cimentation des particules de marne en présence d'eau. Cependant, les indices CBR après immersion enregistrés sont de plus en plus décroissants dès le premier ajout de plastique pour atteindre une portance minimale de 25,43% dans le cas des échantillons à 7% de plastique. Toutefois, ces portances sont très intéressantes et très importantes dépassant les 15% ce qui permet de les classer selon CEBTP (1984) dans la catégorie des sols de portances élevées à très élevées.

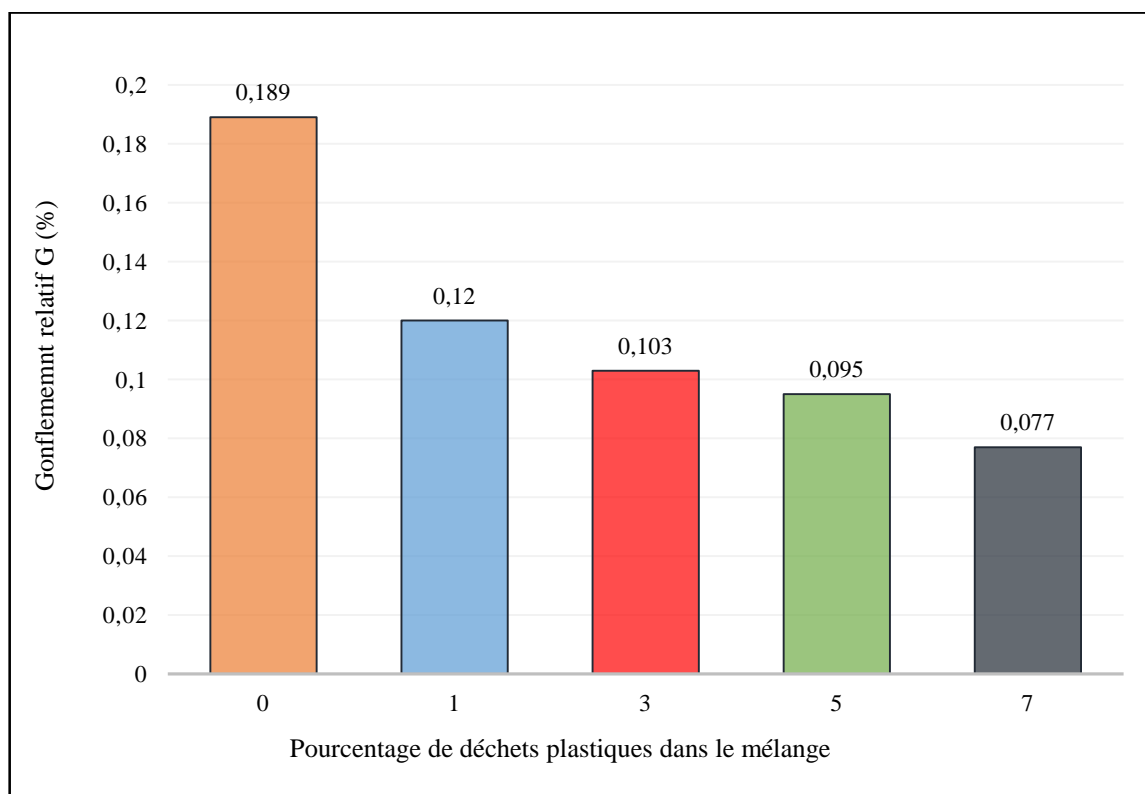


Figure IV.23 : Gonflement relatif des différents mélanges.

Le gonflement enregistré après immersion diminue de plus en plus avec l'ajout de déchets plastiques vu que ces derniers sont insensibles à l'eau et donc non gonflants. Ainsi les mélanges deviennent moins gonflants en augmentant la proportion du plastique.

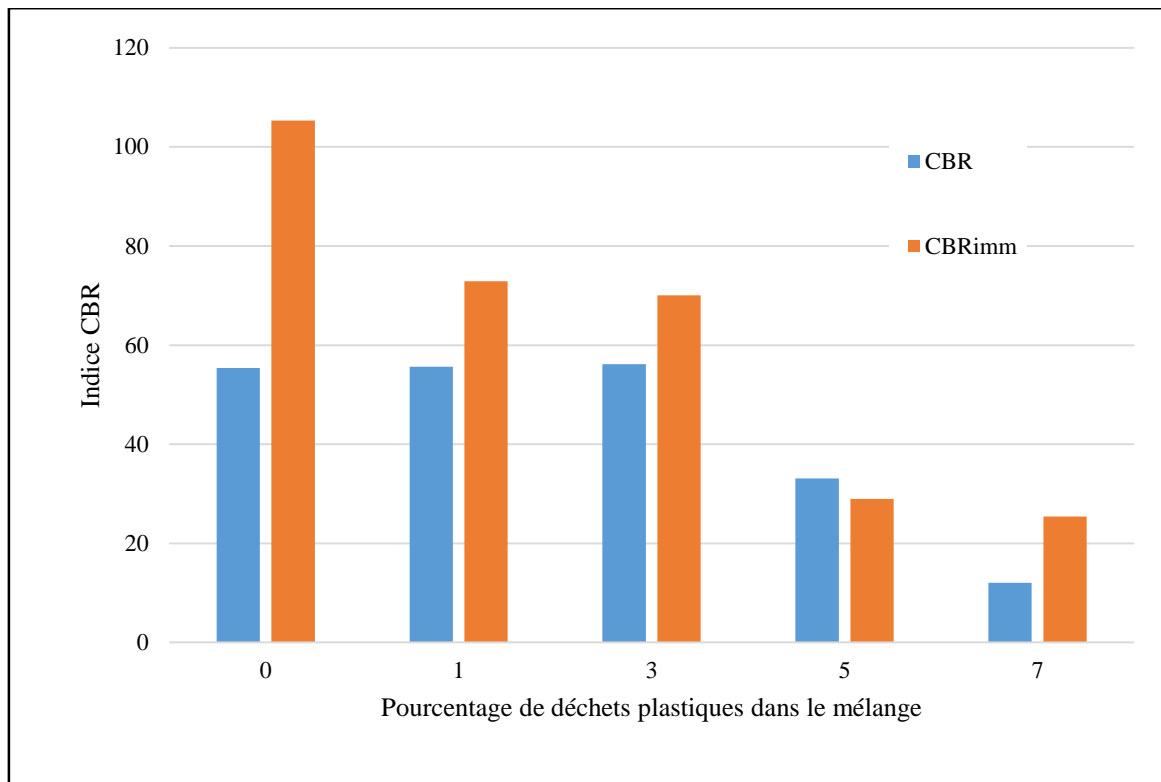


Figure IV.24 : Indice CBR et CBR immergé des différents mélanges.

Nous constatons un écart sensible entre les deux indices CBR (CBR et CBR_{imm}) sur la plupart des échantillons. En effet, à l'exception des mélanges à 5% de plastique, les portances après immersion sont largement supérieures à celles développées avant immersion. Ce qui ne correspond pas au comportement habituel des sols (notamment argileux) qui perdent généralement de leur résistance en présence d'eau. Cette amélioration de portance en présence d'eau ne peut être expliquée que par la cimentation du matériau naturel étudié en présence d'eau.

IV.7.Conclusion

En se basant sur les résultats obtenus aux essais Proctor et CBR avant et après immersion, nous pouvons conclure que les mélanges étudiés développent des densités sèches assez élevées, permettant une bonne aptitude au compactage à des teneurs en eau acceptables.

Ils développent également des portances acceptables, notamment après immersion et pour des teneurs en plastique ne dépassant pas 5% avec une certaine stabilité par rapport au gonflement.

Ainsi, il est tout à fait possible d'introduire les déchets plastiques dans la conception routière. Toutefois, il est indispensable de confirmer l'aptitude de ces mélanges à travers d'autres essais routiers qui feront l'objet d'étude dans les chapitres qui suivent.

Chapitre V

Fragmentation et dégradation des matériaux étudiés

V.1. Introduction

Beaucoup d'essais viennent approfondir la connaissance des caractéristiques mécanique des granulats. En traction, en compression ou en cisaillement. Ces essais ne reproduisent pas toujours les sollicitations attendues.

Les constructions routières ont élaboré plusieurs types d'essai ayant la particularité de mesurer la résistance à l'usure aux chocs et donc sa fragmentation ainsi que la dégradation des matériaux. Dans ce chapitre seront exposés ces différents essais routiers. Les mélanges de marne et de déchets plastiques seront étudiés à travers ces derniers.

V.2. Essai Los Angeles

L'essai Los Angeles permet de mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des granulats. Cet essai est utilisé dans le domaine routier et établi selon la norme française NF P 18-573. Il s'agit de mesurer la quantité d'éléments passant au tamis 1,6 mm produite après avoir soumis l'échantillon aux chocs de boulets normalisés.

V.2.1. Appareillage

Pour effectuer l'essai, nous devons nous munir du matériel suivant :

- Une série de tamis (1.6-4-6.3-10-14-16-20-25-40 et 50mm) ;
- Machine Los Angeles ;
- Boulets en acier de 47mm de diamètre, pesant entre 420 et 445g ;
- Bac ;
- Balance de précision ;
- Etuve.



Figure V.1 : Matériels et échantillon de l'essai Los Angeles.

V.2.2. Mode opératoire

Le matériau étuvé au préalable à 105°C, est tamisé en fonction de la classe granulaire choisie. On choisira celle-ci de telle façon à obtenir une fraction significative de l'ensemble du matériau.

L'essai exige une masse d'échantillon de 5000 g, l'ensemble est mis dans le tambour accompagné du nombre de boulets correspondant à la classe granulaire choisie. Le tambour est alors lancé pour effectuer 500 rotations. Toutefois, dans le cas de la classe 25-50 mm, il est exigé de lancer le tambour pour 1000 rotations.

Tableau V.1 : Charge de boulets pour essais Los Angeles.

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)
4 – 6,3	07	3080
6,3 - 10	09	3960
10 - 14	11	4840
10 - 25	11	4840
16 – 31,5	12	5280
25 - 50	12	5280

Une fois les tours effectués, le matériau et les boulets sont recueillis dans un bac prévu à cet effet. On tamise alors le tout par lavage au tamis de 1,6 mm en prenant soin de retirer les boulets abrasifs, cette nouvelle masse sera alors étuvée pendant 24h et pesée.

Dans notre cas, nous soumettrons à l'essai la classe 10/14, avec un nombre de 11 boulets, à 500 rotations.

La résistance à la fragmentation s'exprime par l'équation suivante :

$$L_A = \frac{(M-M')}{M} \cdot 100$$

Avec :

L_A : Coefficient Los Angeles ;

M : Masse sèche totale de l'échantillon soumis à l'essai M=5000g ;

M' : Masse sèche du refus au tamis de 1,6 millimètre.

Les résultats seront interprétés en se basant sur les valeurs de référence présentées dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : Appréciation des résultats de l'essai Los Angeles (NF P 18-573).

Coefficient Los Angeles (L_A)	Appréciation
< 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
> 40	Médiocre

V.2.3. Présentation des résultats



Figure V.2 : Résultats des essais Los Angeles en présence de déchets plastiques.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus des mélanges de marne et de déchets plastiques :

Tableau V.3 : Résultat des essais Los Angeles.

Echantillons	Masse avant essai M (g)	Masse après essai M' (g)	Coefficient L_A
Marne + 0% de déchets plastiques	5000	2742,36	45,15
Marne + 1% de déchets plastiques		2923	41,54
Marne + 3% de déchets plastiques		2899	42,02
Marne + 5% de déchets plastiques		2933	41,34

Remarque : le mélange de marne + 7% de déchets plastiques n'a pas été soumis à l'essai, car il représente le mélange le plus faible en termes de portance.

V.2.4. Interprétation des résultats

Les essais Los Angeles réalisés sur les échantillons de marne seule ont présenté des coefficients L_A supérieur à 40, ce qui signifie que nous sommes en présence de matériau médiocre. En effet, la marne se fragmente sensiblement, sous les chocs des boulets en rotation.

Tandis qu'une certaine amélioration du coefficient Los Angeles est constatée après l'ajout du plastique. Ce dernier amorti relativement les chocs produits par les boulets sur les granulats. En effet, L_A passe de 45,15 pour la marne seule à 41,35 avec l'ajout de 5% de plastique.

Ceci est encourageant car en présence de granulats de bonnes qualités, la résistance à la fragmentation sera encore meilleur avec l'ajout du plastique ce qui permettra davantage l'utilisation de ce type de mélanges dans un large éventail de construction routière.

V.3. Essai Micro Deval

Selon la norme française NF P 18-572, 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 avec les autres, avec le cylindre de la machine en rotation et sur les billes (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau.

V.3.1. Appareillage

L'exécution de l'essai nécessite le matériel suivant :

- Une série de tamis (1.6-4-6.3-10-14-16-20-25-40 et 50mm) ;
- Machine Micro Deval ;
- Charges abrasives en acier inox ;
- Bac ;
- Balance de précision ;
- Etuve.



Figure V.3 : Matériels et échantillon pour l'essai Micro Deval.

V.3.2. Mode opératoire

Pour effectuer l'essai Micro Deval, il est nécessaire de préparer 500g de matériau préalablement étuvé à 105°C pendant 24h, de classe granulaire bien précise. Comme pour l'essai Los Angeles la classe granulaire est choisie en fonction de la granularité du matériau.

On introduit dans le cylindre l'échantillon et les billes abrasives. Dans le cas humide, on ajoute 2,5 litres d'eau. La machine est alors lancée pour 12 000 tours. Une fois les rotations terminées, le contenu du cylindre est vidé sur une série de tamis de 8 et 1,6 mm, le premier servant à retenir les billes abrasives et le second tamis retenant le matériau.

Le coefficient M_{DE} est calculé comme suit :

$$M_{DE} = \frac{M - M'}{M} \cdot 100$$

Avec :

M_{DE} : Coefficient Micro Deval ;

M : Masse sèche totale de l'échantillon soumis à l'essai $M = 500g$;

M' : Masse sèche du refus au tamis de 1,6 millimètre.

Tableau V.4 : Charges abrasives en fonction de la classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
04 – 6.3	2 000 ± 5
6,3 – 10	4 000 ± 5
10 - 14	5 000 ± 5

Nous avons choisi dans notre cas la classe granulaire 10/14, avec une masse de charge abrasive de 5000g.

Les résultats sont interprétés en se référant aux valeurs présentées dans le tableau suivant :

Tableau V.5 : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval (NF P 18-572).

Coefficient M_{DE}	Valeur
< 10	Très bon à bon
10 à 20	Bon à moyen
20 à 35	Moyen à faible
>35	Médiocre

V.3.3. Présentation des résultats



Figure V.4 : Ouverture du cylindre après essai en présence de déchets plastiques.



Figure V.5 : Usure des granulats après essai Micro Deval

Tableau V.6 : Résultats des essais Micro Deval.

Echantillons	Masse avant essai M (g)	Masse après essai M' (g)	Coefficient M_{DE}
Marne + 0% de déchets plastiques	500	65	87
Marne + 1% de déchets plastiques		50	90
Marne + 3% de déchets plastiques		59,9	88,02
Marne + 5% de déchets plastiques		67,2	86,56

V.3.4. Interprétation des résultats

Les essais Micro-Deval réalisés sur les échantillons de marne seule ont présenté des coefficients M_{DE} supérieur à 40, ce qui signifie que nous sommes en présence de matériau

médiocre. En effet, la présence de fractions argileuses et sableuses dans le matériau marne (essais d'identification) accentue le frottement et la dégradation des grains en présence de l'eau et de la charge abrasive en rotation.

Dans le cas de ce type d'essai, l'ajout du plastique n'a apporté pratiquement aucune amélioration au comportement des mélanges. L'effet du plastique sera peut être constaté pour des proportions plus importantes qui réduiront le frottement entre les grains et la charge abrasive. Ceci n'est évidemment pas intéressant du fait que l'ajout d'une forte proportion en plastique agit négativement sur le comportement des mélanges sous d'autres essais (Proctor, CBR,...) comme il a été constaté précédemment.

V.4. Classification des matériaux en se basant sur L_A et M_{DE}

Les essais présentés précédemment (Los Angles et Micro Deval) combinés, permettent de classer les matériaux selon leurs résistances aux chocs et à l'usure (voir tableau V.6).

Tableau V.7 : Catégories des granulats selon leur résistance aux chocs et à l'usure (Moron, BRGM).

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

Avec :

Catégorie A : Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, sauf couches de roulement à trafic important.

Catégorie B : Matériau utilisable pour toutes couches de chaussées, tout trafic, y compris les couches de roulement à trafic important.

Catégorie C : Matériau utilisable pour couches de fondations, et couches de base tout trafic.

Catégorie D : Matériau utilisable pour couches de fondations toutes chaussées, et couches de base pour chaussées à moyen trafic.

Catégorie E : Matériau utilisable pour couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.

Catégorie F : Matériau utilisable en couches de chaussées avec un traitement éventuel en fonction de l'intensité du trafic.

En se basant sur les valeurs de références présentées dans le tableau V.6, les matériaux étudiés peuvent être classés dans les catégories **E** à **F**.

V.5. Essai de fragmentabilité (NF P 94 – 066)

L'essai de fragmentabilité permet de traduire l'évolution continue de la granularité de certains matériaux rocheux. Chaque matériau évolue et se dégrade différemment sous l'effet du

trafic de chantier, c'est pour cela qu'on détermine le coefficient de fragmentabilité noté FR permettant de classer l'échantillon par rapport aux valeurs de référence données par la norme française NF P 94 – 066.

V.5.1. Appareillage

L'essai se réalise en utilisant le matériel suivant :

- Moule CBR ;
- Dame Proctor normal ;
- Tamis de différents diamètres ;
- Balance de précision.

V.5.2. Mode opératoire

On réalise l'essai de fragmentabilité sur un échantillon de 2 kg de classe granulaire 10/20. La fraction du matériau est déduite par pesées des refus à travers plusieurs tamis (10,16 et 20mm) constituant cette classe. Le matériau est ensuite mélangé et ré-homogénéisé pour être introduit dans le moule CBR et pilonné en 100 coups de dame Proctor normal. Une fois l'opération terminée, l'échantillon est récupéré et tamisé au tamis 1, 2, 5 et 10mm.

Les courbes granulométriques des deux fractions avant et après essai sont alors représentées sur un même graphique.

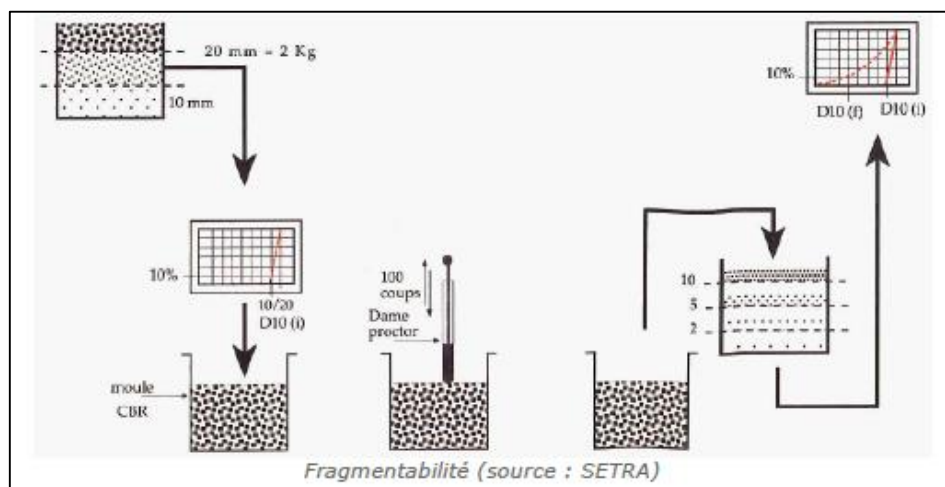


Figure V.6 : Différentes étapes de l'essai de fragmentabilité.

Le coefficient de fragmentabilité FR sera déduit de la courbe comme suit :

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant pilonnage}}{D_{10} \text{ du matériau après pilonnage}}$$

Les seuils de référence établis par la norme sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.8 : Valeurs de références.

Valeur de FR	Appréciation
FR < 7	Roche peu fragmentable
FR > 7	Roche Fragmentable

V.5.3. Présentation des résultats

Les courbes granulométriques relatives aux essais réalisés sur les différents mélanges de marne et de déchets plastiques sont les suivantes :

- **Marne + 0% de déchets plastiques**

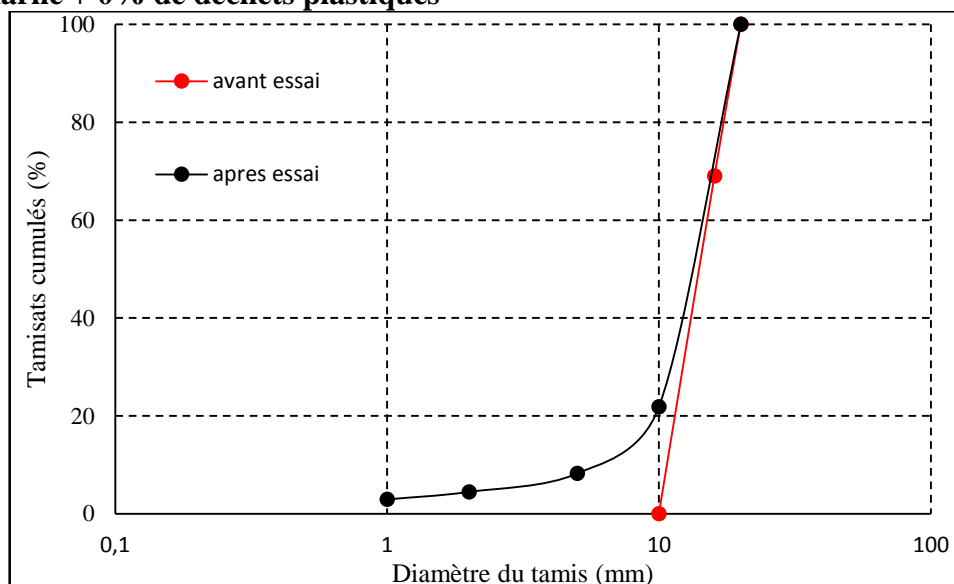


Figure V.7 : Courbes granulométriques de la marne + 0% de déchets pastiques.

$$FR = \frac{12}{7} = 1.71$$

- **Marne + 3% de déchets plastiques**

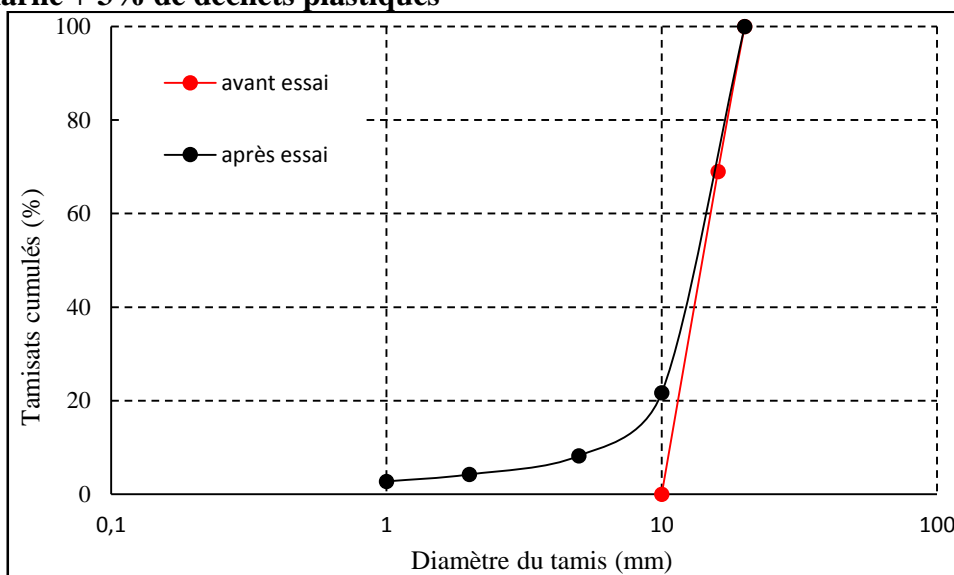


Figure V.8 : Courbes granulométriques de la marne + 3% de déchets plastiques.

$$FR = \frac{12}{7,5} = 1.6$$

- **Marne + 5% de déchets plastiques**

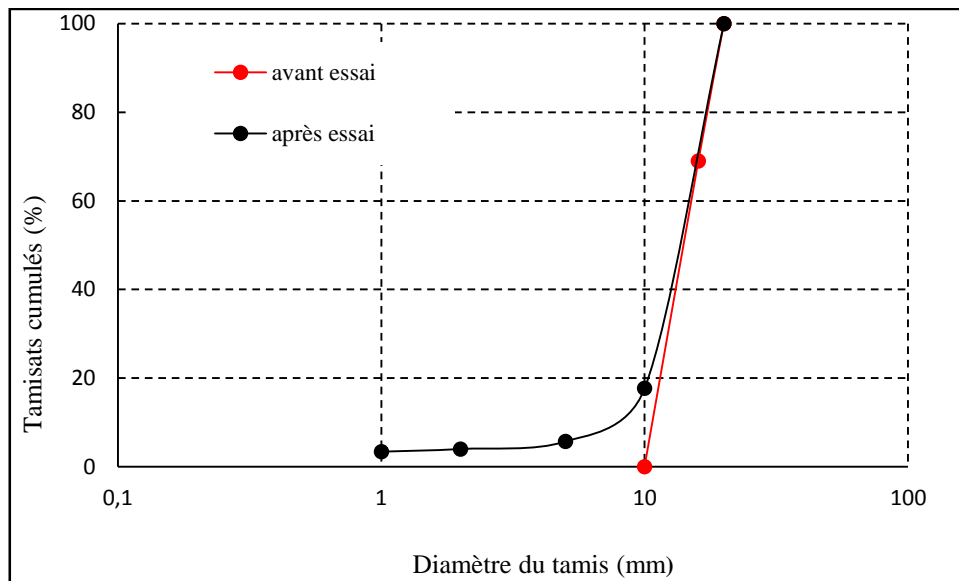


Figure V.9 : Courbes granulométriques de la marne + 5% de déchets plastiques.

$$FR = \frac{12}{8,2} = 1.46$$

V.5.4. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour tous les mélanges sont très intéressants. En effet, les coefficients FR déterminés sont inférieurs à 7, ce qui indique que les matériaux étudiés ce sont très peu fragmentés. La marne seule a très bien supporté le pilonnage appliqué, toutefois l'ajout du plastique a nettement amélioré cette aptitude. Le plastique dans ce cas peut jouer le rôle d'un amortisseur réduisant l'effet du pilonnage sur la structure globale des échantillons (mélanges).

V.6. Essai de dégradabilité (NF P 94 – 067)

L'essai de dégradabilité permet de qualifier la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques, cet essai détermine l'évolution à long terme des grains. Il est régi par la norme française NF P 94 – 067.

V.6.1. Appareillage

L'essai se réalise en utilisant le matériel suivant :

- Etuve ;
- Bac ;
- Séries de tamis de différents diamètres ;
- Balance de précision.

V.6.2. Mode opératoire

On réalise l'essai de dégradabilité conformément à la norme NF P 94-067. Comme pour l'essai de fragmentabilité l'opération est effectuée sur un échantillon de 2 kg de classe granulaire 10/20. La fraction du matériau est déduite par pesées des refus à travers plusieurs tamis (10,16 et 20mm) constituant cette classe. Le matériau est ensuite mélangé et ré-homogénéisé pour être introduit dans un bac.

L'échantillon est alors soumis à une série de quatre cycles d'immersions et de séchages à l'étuve respectivement de 8 et 16 heures. Une fois l'opération terminée, l'échantillon est récupéré et tamisé au tamis 1, 2, 5 et 10mm.

Les courbes granulométriques des deux fractions avant et après essai sont alors représentées sur un même graphique.

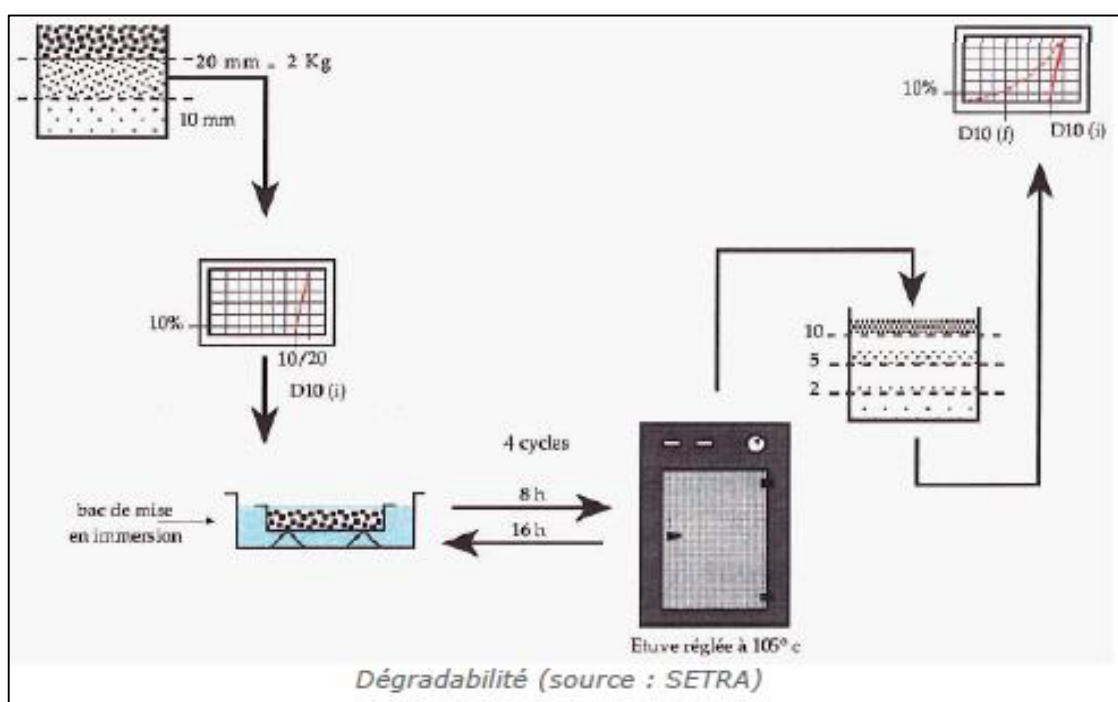


Figure V.10 : Différentes étapes de l'essai de dégradabilité.

Le coefficient de dégradabilité noté DR se déduit à l'aide de l'équation suivante :

$$DR = \frac{D_{10} \text{ Avant le 1}^{\text{er}} \text{ cycle imébiton/séchage}}{D_{10} \text{ Après le 4}^{\text{eme}} \text{ cycle imébiton/séchage}}$$

V.6.3. Présentation des résultats

Remarque : l'échantillon de marne seul sera soumis à cet essai, car lors de l'étuvage à 105° C, le plastique est influencé par la température (carbonisé). Il est quand même important de savoir que le plastique se dégrade difficilement sous l'effet météorologique, d'où sa durée de vie très importante (400 ans en moyenne).

- **Marne + 0 % de déchets plastiques**

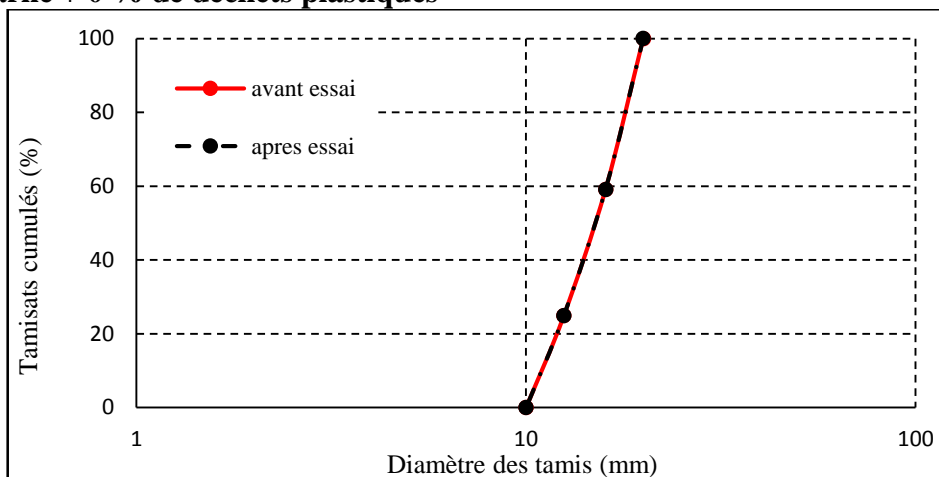


Figure V.11 : Courbes granulométriques de l'essai de dégradabilité.

$$DR \approx 1$$

V.6.4. Interprétation des résultats

Les deux courbes obtenues avant et après essais sont pratiquement confondues, ceci est dû, à la non dégradabilité de la roche. En effet, contrairement au comportement habituelle de la plupart des marnes généralement dégradables sous l'effet des agents climatiques (eau/température), celle-ci supporte assez bien l'effet de l'immersion et de la température, comme le confirme les résultats de cet essai et des essais CBR après immersion présentés dans le chapitre précédent. Ceci peut être expliqué par la fraction sableuse présente dans ce matériau, réduisant par conséquent l'effet de la fraction argileuse, cette dernière peut être à son tour de type kaolinite (peu sensible à l'eau).

V.7. Conclusion

Les séries d'essais réalisées dans ce chapitre ont permis d'évaluer la résistance des mélanges aux différentes sollicitations routières proprement dites, à savoir : chocs, usure, pilonnage, climatiques cycliques (température et humidité).

Les résultats obtenus ont montrés que le plastique joue un rôle protecteur et qu'il contribue sensiblement à l'amélioration de la résistance de la marne face aux différentes sollicitations citées.

L'ensemble des essais mécaniques réalisés jusqu'à présent montrent que l'ajout des déchets plastiques aux granulats de marne présentée pour une utilisation en couches de chaussées est tout à fait possible. Néanmoins, d'autres essais (autres sollicitations) sont nécessaires et indispensables pour confirmer davantage l'emploi de ces matériaux dans le domaine routier.

L'étude de la résistance au cisaillement des matériaux présentés fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre VI

Résistance au cisaillement des matériaux étudiés

VI.1. Introduction

La résolution de problèmes de stabilité en mécanique des sols est inenvisageable sans la connaissance des paramètres de résistance au cisaillement du sol. Cette résistance dépend de la nature du matériau rencontré, suivant qu'il soit cohérent ou non, grossier ou fin. Ces paramètres appelés angle de frottement interne et cohésion interviennent dans le calcul de stabilité des différents ouvrages de génie civil (fondations, barrages, digues...).

Évaluer expérimentalement et précisément les propriétés de résistance au cisaillement des sols constitue un enjeu important en mécanique des sols (Perrot, 1968). Dans ce chapitre nous allons étudier la résistance au cisaillement des mélanges de marne avec déchets plastiques en utilisant la boîte de cisaillement de Casagrande.

VI.2. Notion de résistance au cisaillement

Les contraintes de cisaillements se développent lorsqu'un système de forces est appliqué à un volume déterminé d'un sol. Cette sollicitation induit des déformations le long de certaines surfaces appelées "surface de glissement", elle correspond aussi à la surface de rupture.

Si l'on porte l'évolution de la contrainte au cisaillement τ en fonction de la déformation horizontale ε dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient le graphique suivant :

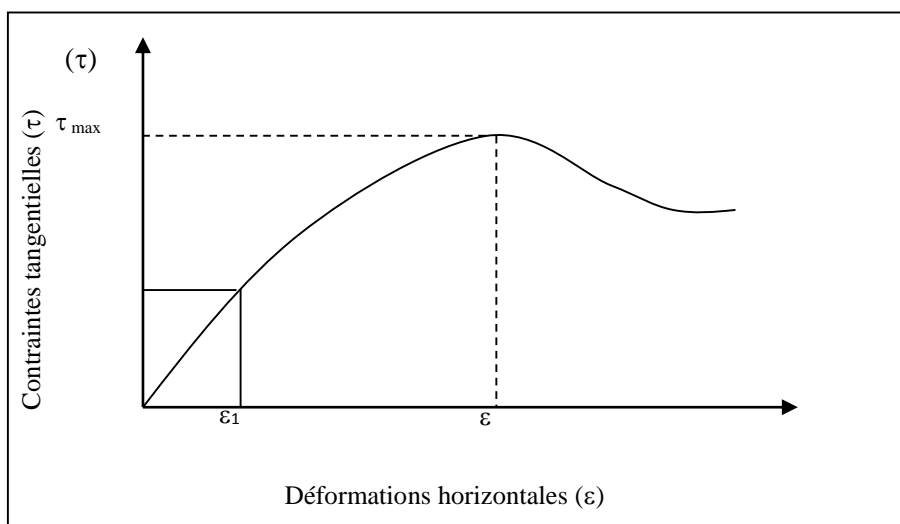


Figure VI.1 : Courbe de contraintes-déformations.

Le (LCPC 21, 1987) définit la résistance au cisaillement 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.

VI.3. But de l'essai

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande a pour but d'étudier le comportement et la résistance mécanique d'un matériau au cisaillement à court et à long terme. Il permet de déduire les caractéristiques mécaniques au cisaillement du sol (angle de frottement interne et cohésion) à travers une droite obtenue appelée "droite intrinsèque".

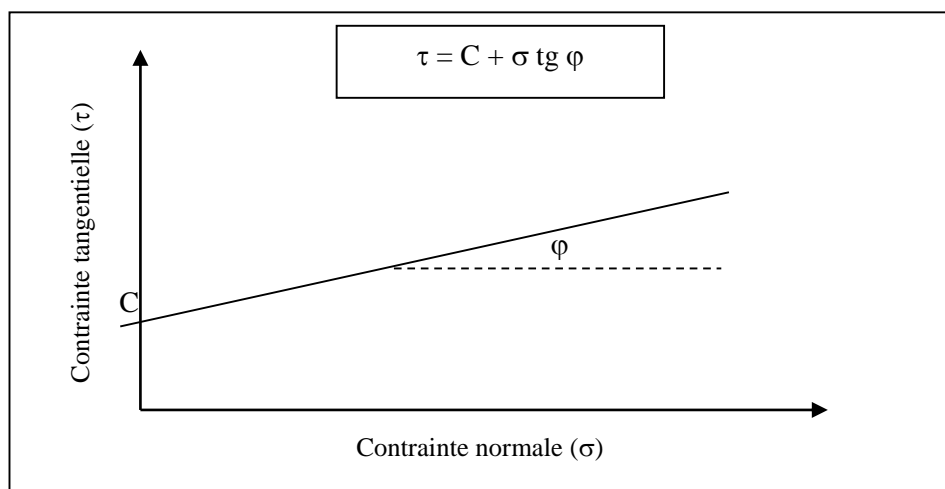


Figure VI.2 : Droite intrinsèque (LCPC, 1987).

L'angle de frottement interne φ est représenté par l'angle que fait cette droite avec l'axe des abscisses. La cohésion quant à elle est déduite par l'ordonnée à l'origine.

L'équation de la droite intrinsèque qui exprime la loi de Coulomb, se présente comme suit :

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

VI.4. Paramètres de cohésion c et angle de frottement interne φ

La droite intrinsèque peut se présenter sous trois formes :

- Si elle passe par l'origine des axes, cela signifie que le sol est pulvérulent (non cohérent) : exemple, les graviers et les sables.

Dans ce cas le terme "c" est nul et l'équation devient alors : $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$

- Si elle ne passe pas par l'origine des axes, cela signifie que le sol est à la fois cohérent et frottant (la plupart des sols : les limons).

Dans ce cas l'équation reste la même : $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$

- Si la droite est parallèle à l'axe des abscisses, c'est que nous sommes en présence de sols purement cohérents (argiles) et donc sans angle de frottement interne ($\varphi = 0$).

Dans ce cas l'équation devient : $\tau = c$

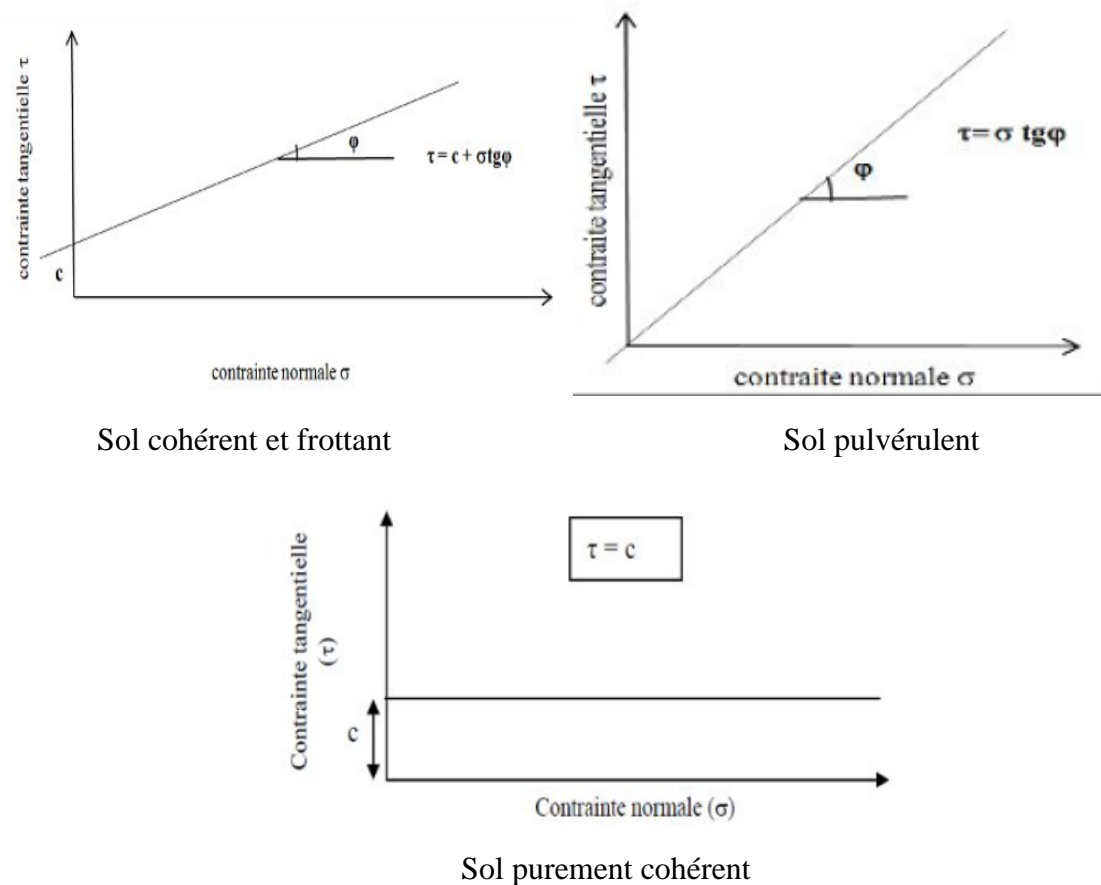


Figure VI.3 : Droites intrinsèques des différentes catégories de sols.

VI.5. Type d'essais de cisaillement à la boîte (UU, CU, CD)

Trois types d'essais peuvent être réalisés à la boîte de cisaillement :

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

Cet essai est réalisé pour étudier un comportement à court terme. La vitesse d'exécution est rapide, ce qui empêche les pressions interstitielles de se dissiper. De par cet essai est déduite la cohésion non drainée c_u . L'angle de frottement interne φ_u est quant à lui considéré nul.

$$\tau = c_u$$

- **Essai consolidé non drainé CU (Consolidated-Undrained)**

Dans ce cas, l'échantillon est consolidé sous une contrainte normale appliquée avec drainage, l'essai est ensuite effectué avec une vitesse rapide et un drainage fermé. Cet essai est exprimé en contraintes totales, la droite intrinsèque a pour équation :

$$\tau = c_{cu} + \sigma \text{tg} \varphi_{cu}$$

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

Cet essai est caractérisé par une vitesse d'exécution relativement lente, il correspond au comportement à long terme du sol. L'échantillon est consolidé et drainé tout au long de l'opération ($u = 0$).

L'essai est exprimé en contraintes effectives $\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi'$

Avec : φ' : angle de frottement effectif,
 c' : cohésion drainée.

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

Les paramètres de résistance au cisaillement varient en fonction de la nature du sol et en fonction de quelques propriétés physiques telles que la compacité et les conditions de drainages.

En effet, les grains de différents sols ne possèdent pas les mêmes forces de cohésion, de frottement et d'enchevêtrement entre particules. Ces facteurs influent sur la valeur de l'angle de frottement φ et de la cohésion c du matériau.

Dans le cas d'un sol cohérent et frottant, ayant la particularité d'être peu perméable, la résistance au cisaillement sera influencée par les conditions de drainages et la teneur en eau de ce dernier.

Dans le cas d'un sol pulvérulent, ayant la particularité d'avoir une cohésion nulle, seule la compacité du matériau influencera sur sa résistance au cisaillement. Lorsque la compacité du sol augmente, l'indice des vides diminue et l'angle φ augmente. Plus les particules d'un sol sont angulaires, plus d'angle de frottement est important ; inversement, des particules arrondies font diminuer l'angle de frottement (Robitaille et Tremblay, 1997)

VI.7. Appareillage

Pour réaliser l'essai de cisaillement direct à la boîte nous devons nous munir de :

- Boîte de cisaillement composée de deux demies boîtes de section $A = L \times L = 60\text{mm} \times 60\text{mm}$, avec accessoires (pierres poreuses...)
- Machine de cisaillement semi-automatique équipée d'un système mécanique permettant d'appliquer les contraintes verticales et d'assurer le déplacement horizontal de la demie boîte inférieure ;



Figure VI.4 : Appareillages de l'essai de cisaillement à la boîte.

VI.8. Principe de l'essai

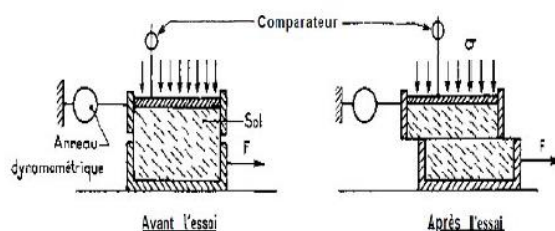


Figure VI.5 : Schéma de la boîte de cisaillement.

L'échantillon de sol est soumis à un cisaillement direct et rectiligne suivant un plan imposé sur lequel s'exerce une contrainte normale déterminée.

Le matériau est placé dans les deux demies boîtes. Celles-ci sont placées sur la machine et la demie boîte supérieure est fixée et reliée vers un anneau dynamométrique de mesure de force. La demie boîte inférieure sera quant à elle déplacée horizontalement à vitesse constante pour provoquer des contraintes de cisaillement jusqu'à rupture du sol. Au-dessus de cet ensemble, on place un piston ayant pour but d'exercer sur l'échantillon une contrainte normale fixe σ . Les déformations verticales sont mesurées par un comparateur fixé au-dessus du piston.

VI.9. Mode opératoire et déroulement de l'essai

L'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande est réalisé selon la norme française NF P 94-071-1. Le grain le plus gros ne doit pas excéder 5 mm, cela est dû aux dimensions de la boîte utilisée au laboratoire, l'échantillon sera donc de classe 0/5.

Pour chaque essai, l'échantillon est densifié à sa teneur en eau optimale déterminée précédemment à l'essai Proctor.

Les deux demies boîtes sont fixées, une plaque rainurée assurant le drainage est placée au fond de ces dernières. L'échantillon est introduit par couche et densifié en prenant soin de ne pas faire correspondre la limite d'une couche avec le plan de cisaillement (interface entre les demies boîtes). L'échantillon placé est alors recouvert par une deuxième plaque rainurée de sens inverse au déplacement horizontal prévu.

L'ensemble est placé sur le chariot de la machine à cisaillement et la partie supérieure est fixée. Sur le haut de la boîte est placé le piston qui supportera les charges engendrant une contrainte normale σ de 100, 200, 300 et 400 kPa maintenue constante durant l'essai.

Les trois comparateurs sont remis à zéro et la vitesse est réglée dans notre cas à 0,8mm/mn.

Retirer les vices maintenant les demies boîtes et activer la machine, les lectures seront prises à chaque 0.025 cm de déplacement horizontal.

L'essai est arrêté lorsque les lectures de forces restent constantes ou chutent continuellement, ce qui signifie que le matériau a atteint la rupture.



Figure VI.6 : Etapes à suivre pour effectuer l'essai de cisaillement.

VI.10. Expression des résultats

Les lectures obtenues sont converties en unité de calculs, selon les paramètres suivant :

- $L = 60\text{mm}$: longueur de la boîte de cisaillement ;
- ΔL : Déplacement horizontal (mm)
- S_c : Section corrigée, avec $S_c = L (L - \Delta L)$;
- Δh : Déplacement vertical (mm) ;
- L_a : Lecture de l'anneau ;
- K : coefficient de l'anneau, pour notre machine $k = 0.194$
- T : Force, avec $T = L_a * k$ (daN);
- τ : Contrainte tangentielle avec $\tau = T / S_c$ en kPa.

VI.11. Présentation des résultats

Les résultats obtenus à travers l'essai de cisaillement direct à la boîte sont présentés sous forme de courbes :

- Contraintes-déformations $\tau = f(\Delta L)$;
- Variation de volume $\Delta h = f(\Delta L)$;
- Droite intrinsèque $\tau = f(\sigma)$.

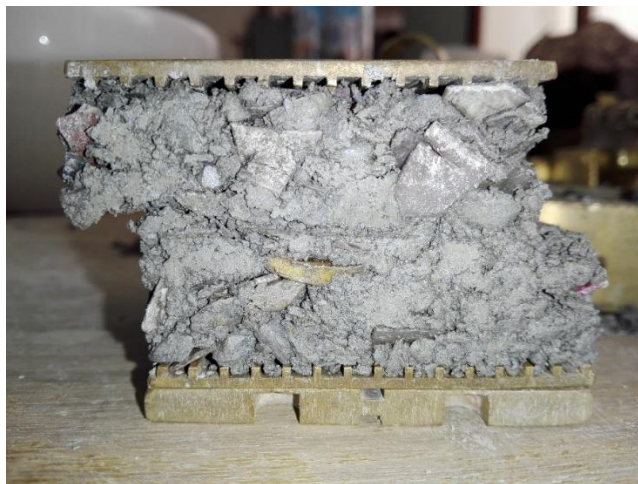


Figure VI.7 : Echantillon après cisaillement.

Trois mélanges de marne et déchets plastiques ont été étudiés, les résultats obtenus sont les suivants :

- **Marne + 0% de déchets plastiques**

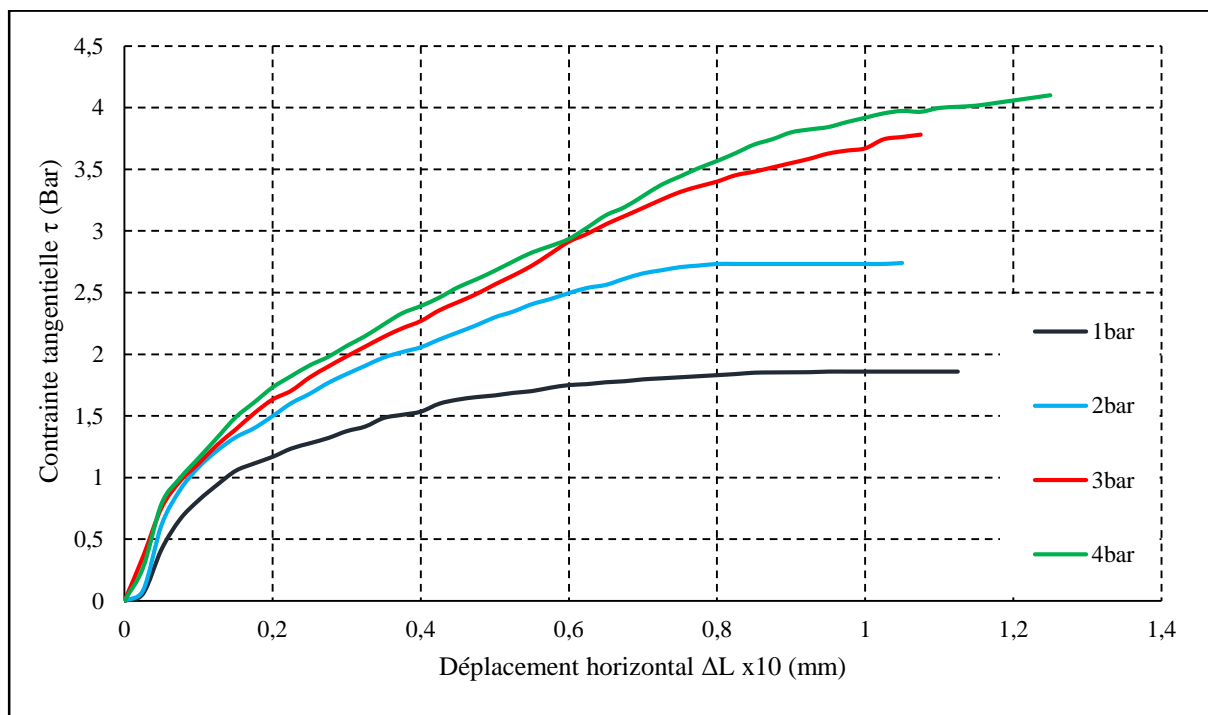


Figure VI.8 : Courbes de contraintes-déformation de la marne+ 0% de déchets plastiques.

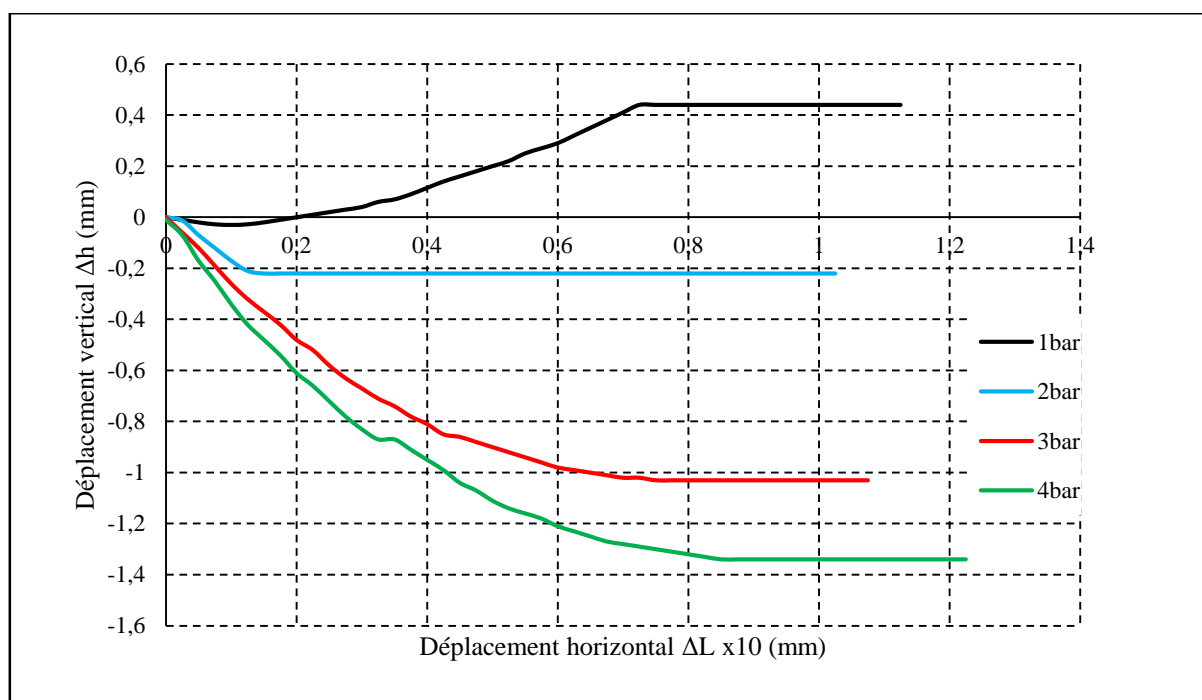


Figure VI.9 : Courbes de variation de volume de la marne + 0% de déchets plastiques.

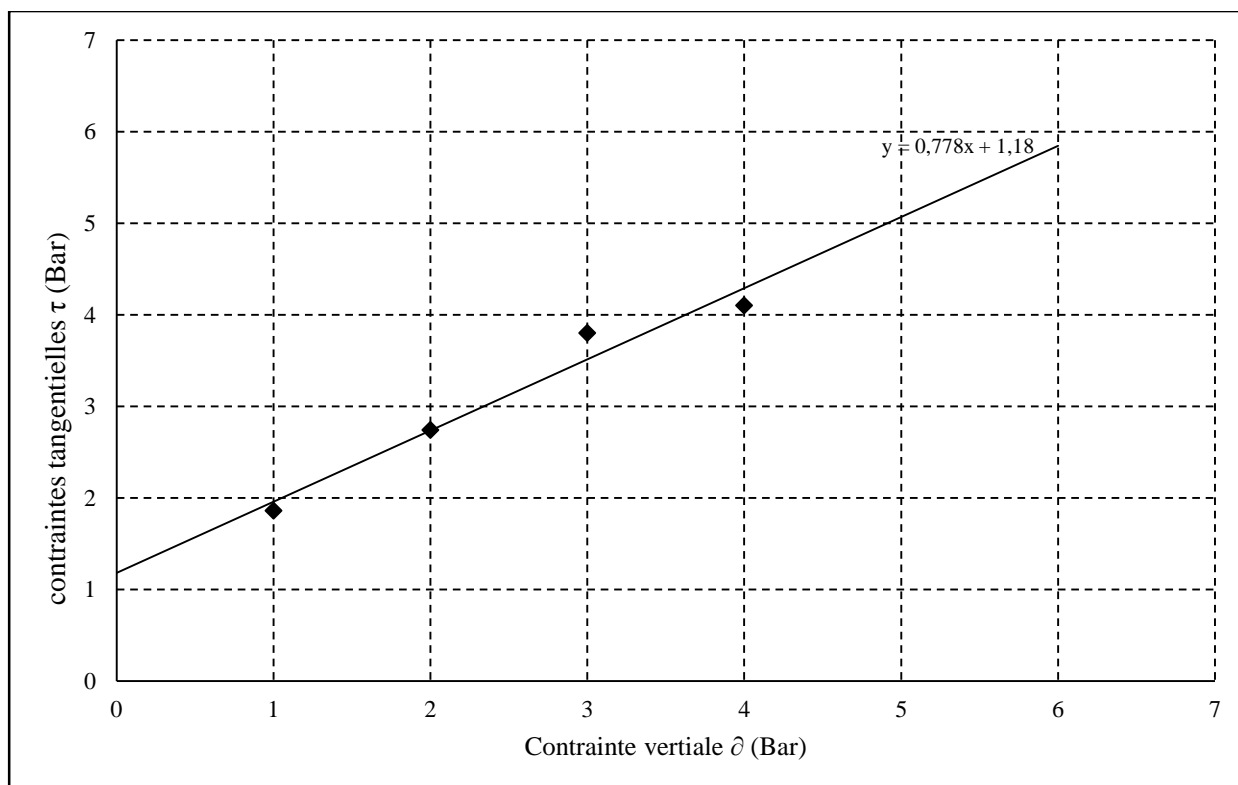


Figure VI.10 : Courbe intrinsèque de la marne + 0% de déchets plastiques.

• **Marne + 3% de déchets plastiques**

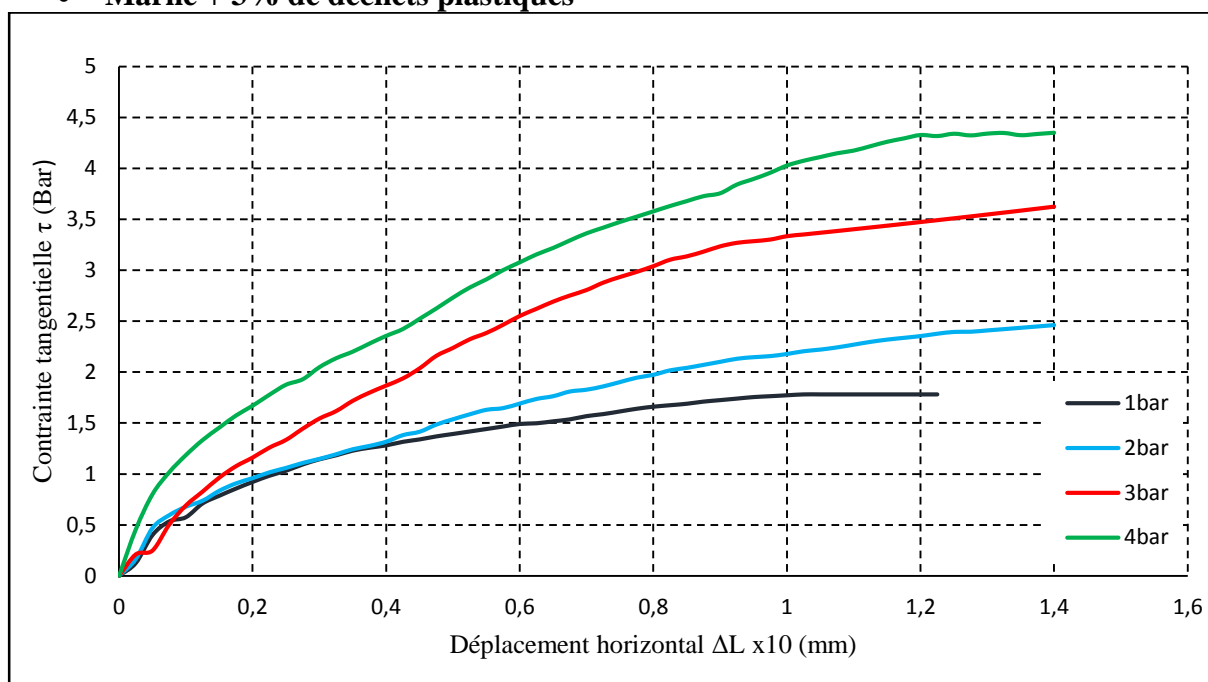


Figure VI.11 : Courbes de contraintes-déformations marne + 3% de déchets plastiques.

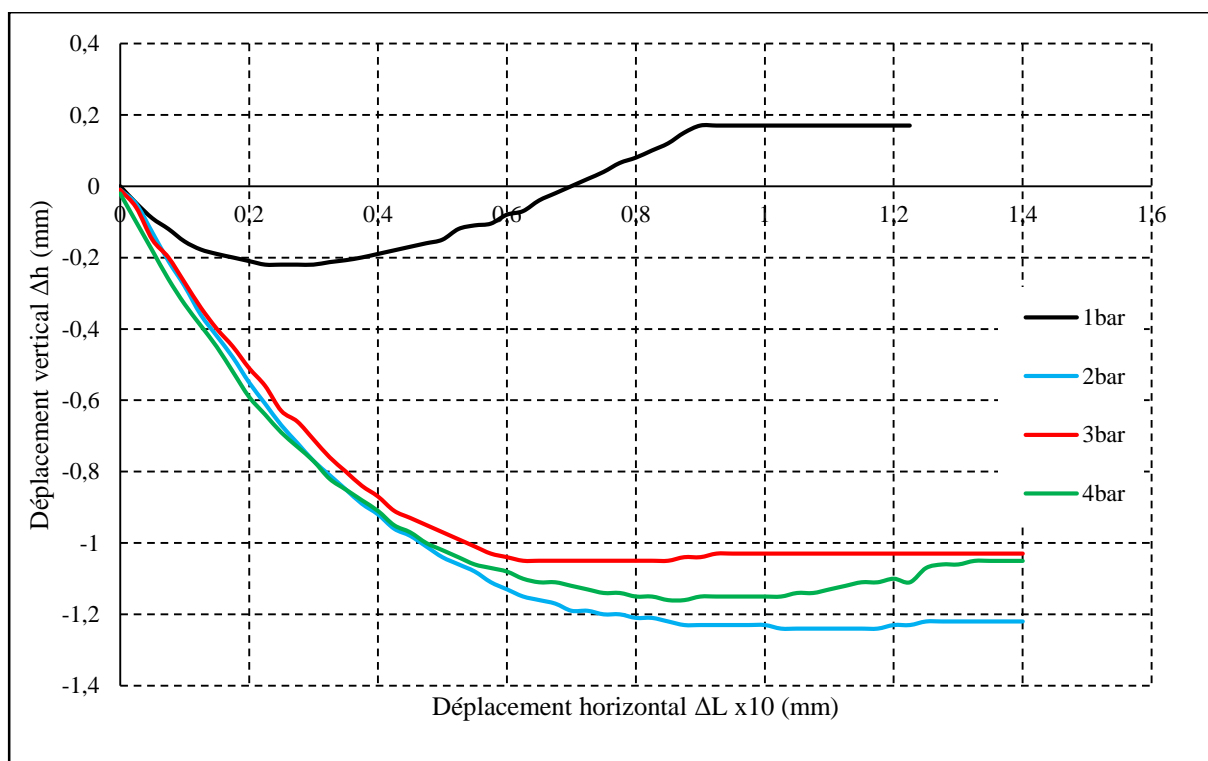


Figure VI.12 : Courbes de variation de volume de la marne + 3% de déchets plastique.

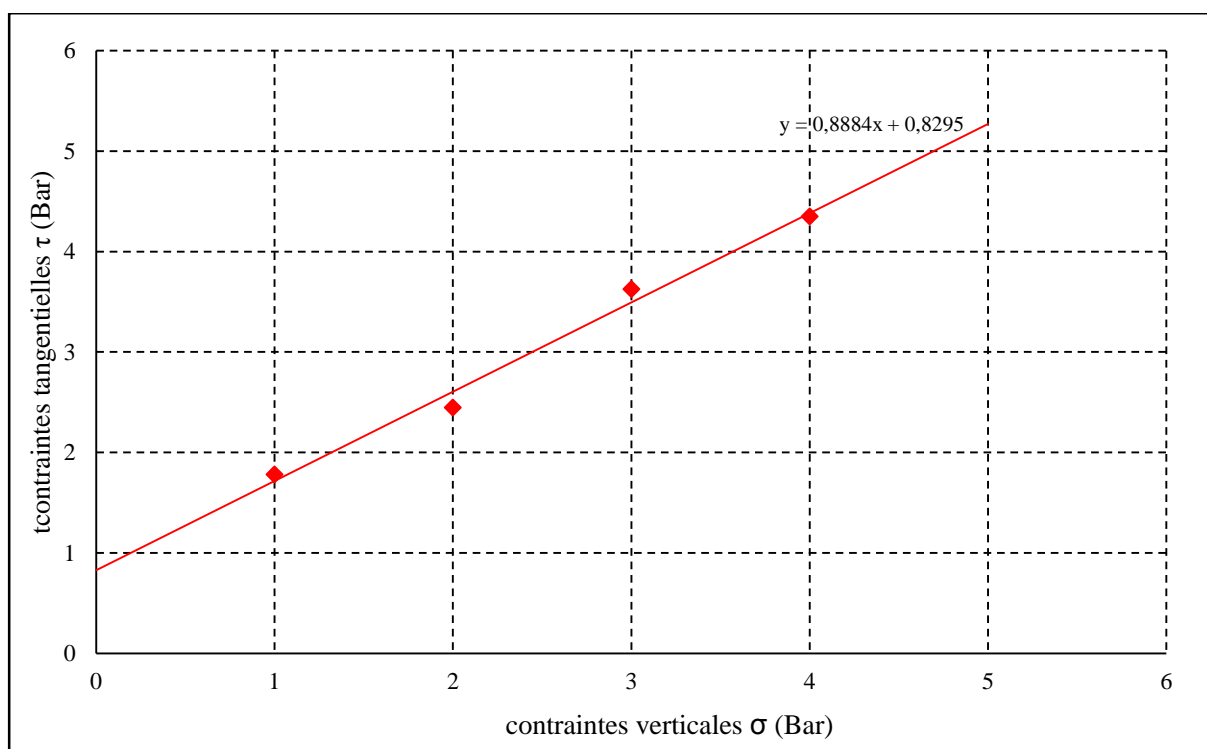


Figure VI.13 : Courbe intrinsèque de la marne + 3 % de déchets plastiques.

- **Marne + 5% de déchets plastiques**

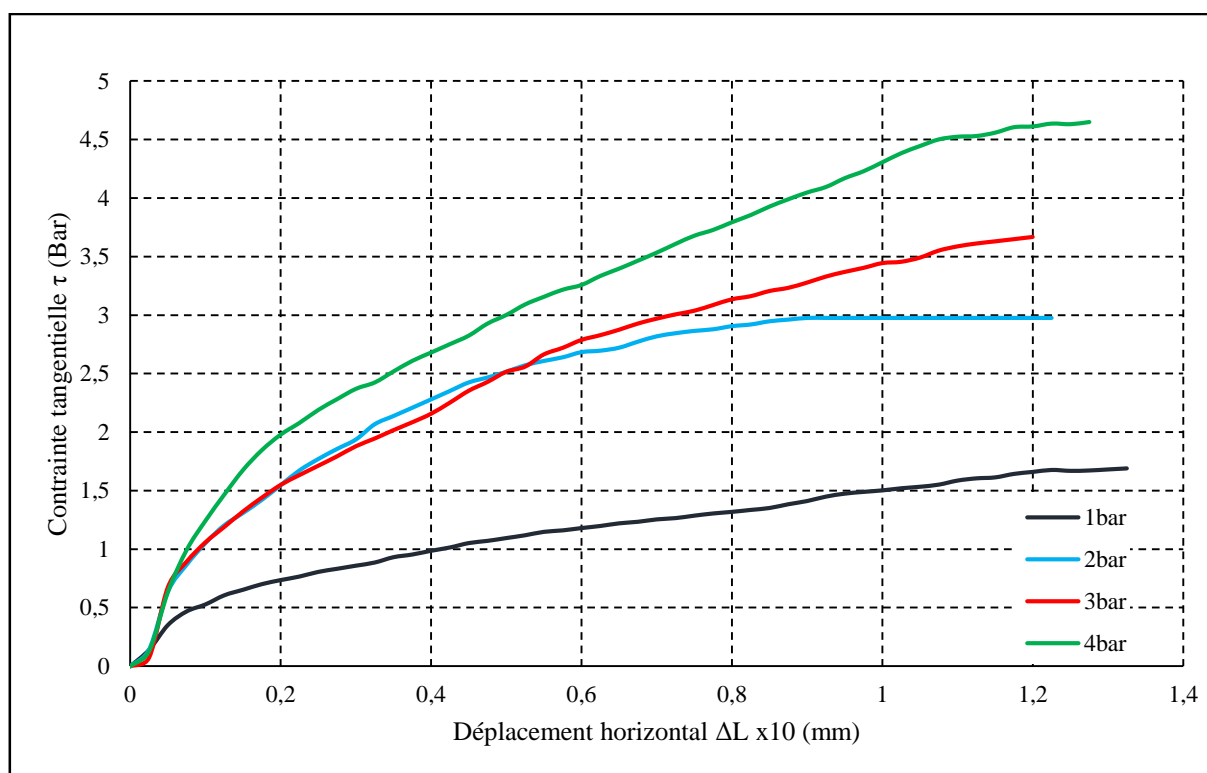


Figure VI.14 : Courbes de contraintes-déformations de la marne + 5% de déchets plastiques.

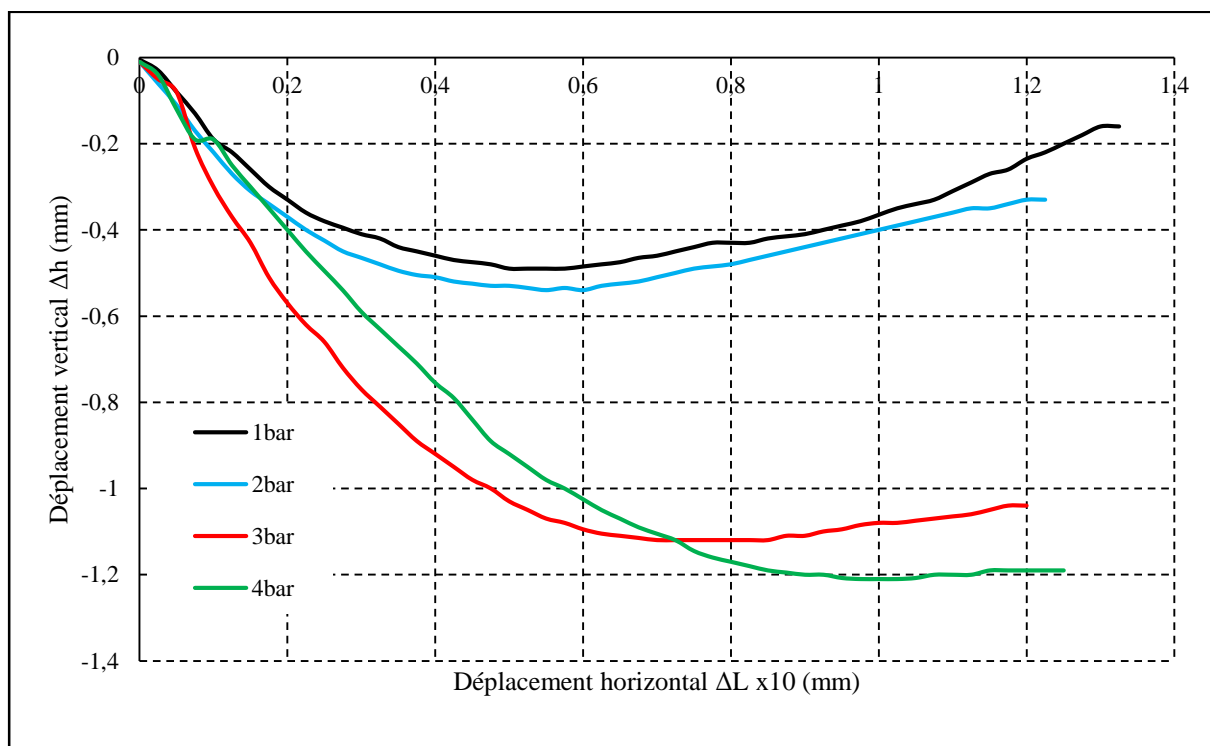


Figure VI.15 : Courbes de variation de volume de la marne + 5% de déchets plastiques.

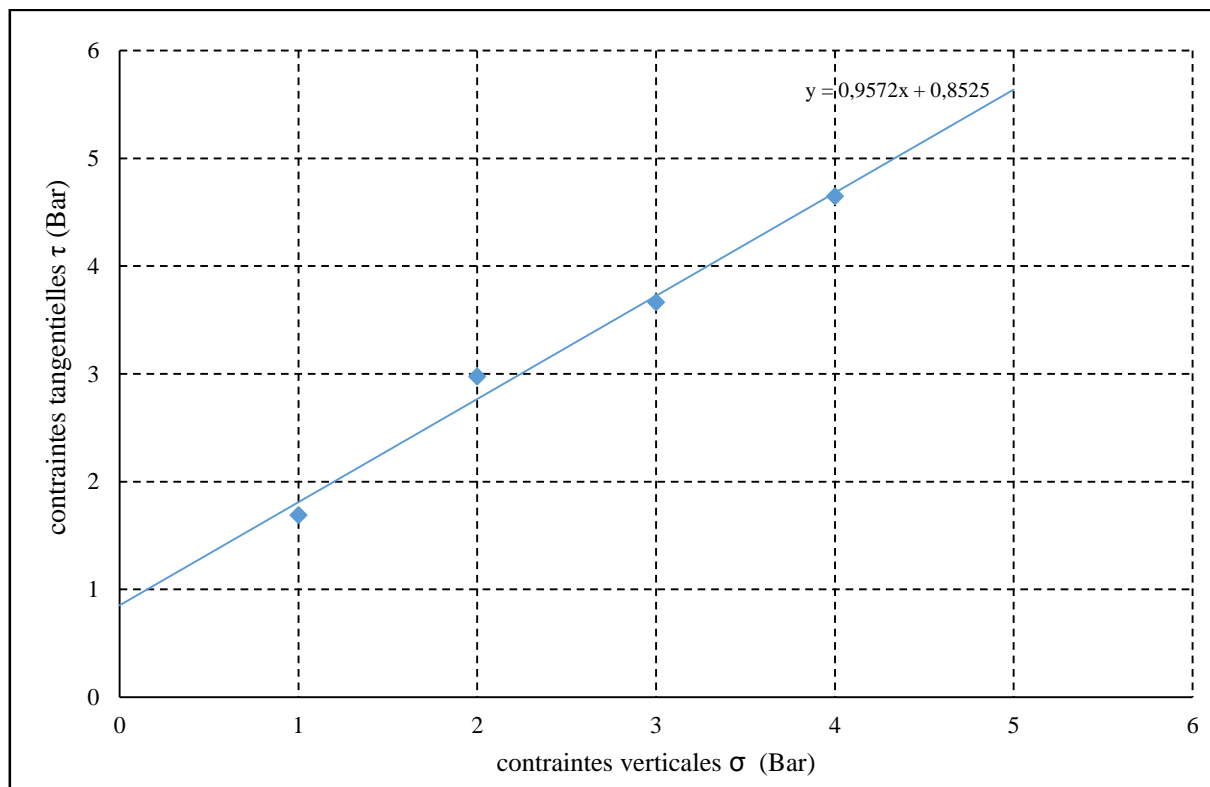


Figure VI.16 : Courbe intrinsèque de la marne + 5% de plastiques.

La résistance au cisaillement des différents mélanges augmente avec l'accroissement des contraintes verticales. En effet, l'augmentation des contraintes normales appliquées accentue la compacité de l'échantillon, cela conduit à un resserrement des grains et donc, un frottement plus fort et une résistance plus grande à la sollicitation.

On remarque aussi un comportement de plus en plus contractant du matériau en fonction des contraintes normales appliquées, cela est dû au réarrangement et au resserrement des grains au cours du déplacement (diminution de son volume initial), notamment sous de fortes contraintes.

Tableau VI.1 : Cohésion des différents mélanges.

Mélange	Cohésion C (Bar)
Marne+0%de déchets plastiques	1,18
Marne+3% de déchets plastiques	0,8295
Marne+5%de déchets plastiques	0,8525

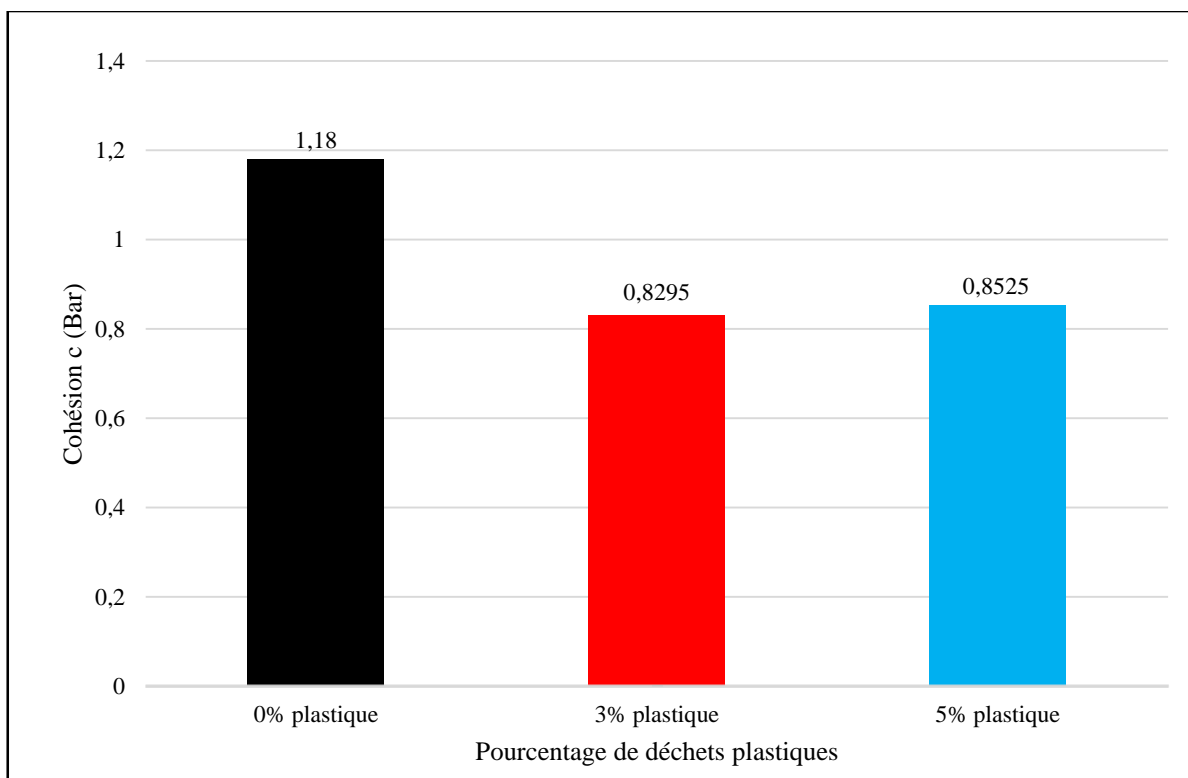


Figure VI.17 : Comparaison de la cohésion des différents mélanges.

Tableau VI.2 : Angle de frottement des différents mélanges.

Mélanges	Angle de frottement ϕ (°)
Marne + 0% de déchets plastiques	37,88
Marne + 3% de déchets plastiques	41,62
Marne + 5% de déchets plastiques	43,74

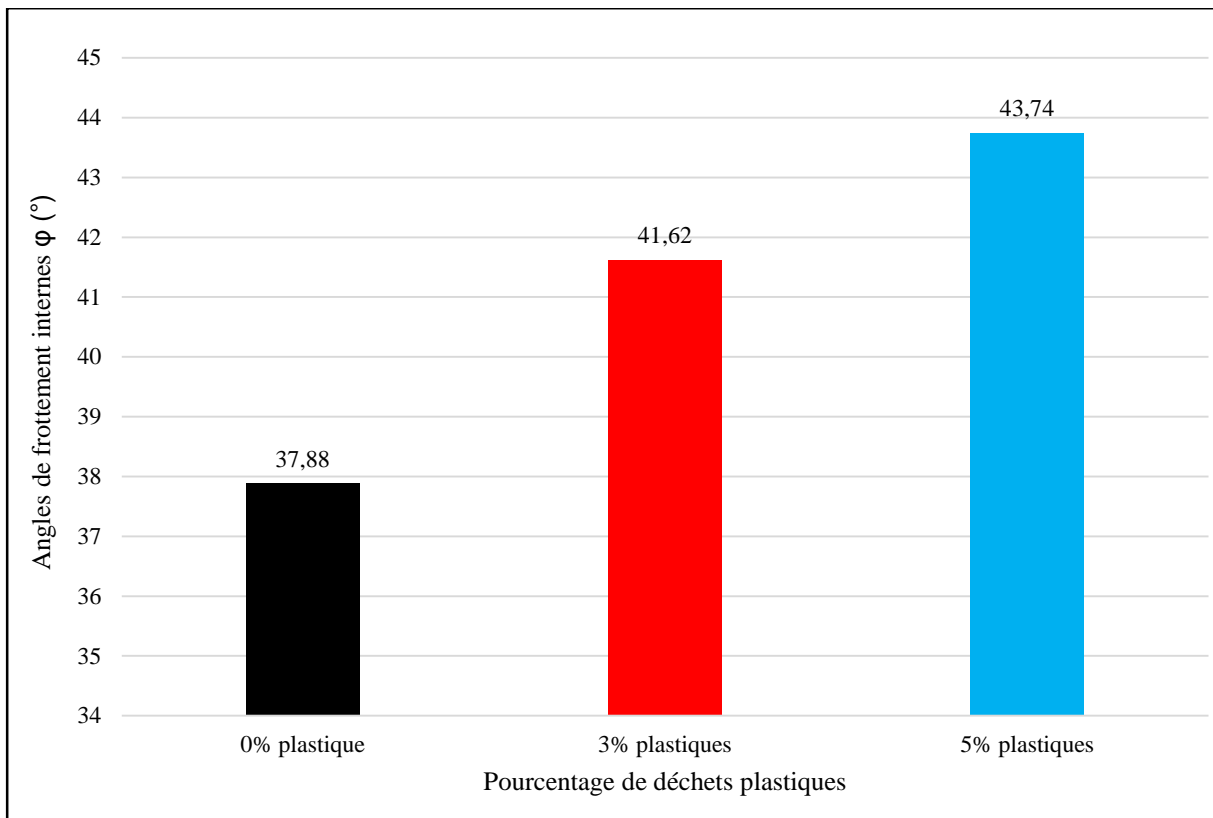


Figure VI.18 : Angle de frottement des différents mélanges.

Les résultats obtenus à l’essai de cisaillement montrent que la marne en granulats est caractérisée par un angle de frottement de 37,88°. Ce résultat est relativement augmenté par l’ajout de déchets plastiques jusqu’à atteindre la valeur maximale de 43,74° pour 5% de plastique. Cette amélioration de l’angle de frottement est expliquée par la forme du plastique employé, en effet, les déchets plastiques sont broyé est leurs formes et très complexe, les morceaux possèdent des angles très marqués. Le frottement est donc plus fort dans les surfaces de contact entre grains de marne et morceaux de plastiques.

La cohésion obtenue diminue continuellement avec l’ajout de déchets plastiques. Ces derniers créent des discontinuités entre les grains de marne dotés d’une certaine cohésion. Ainsi les cohésions diminuent avec l’augmentation de la proportion du plastique.

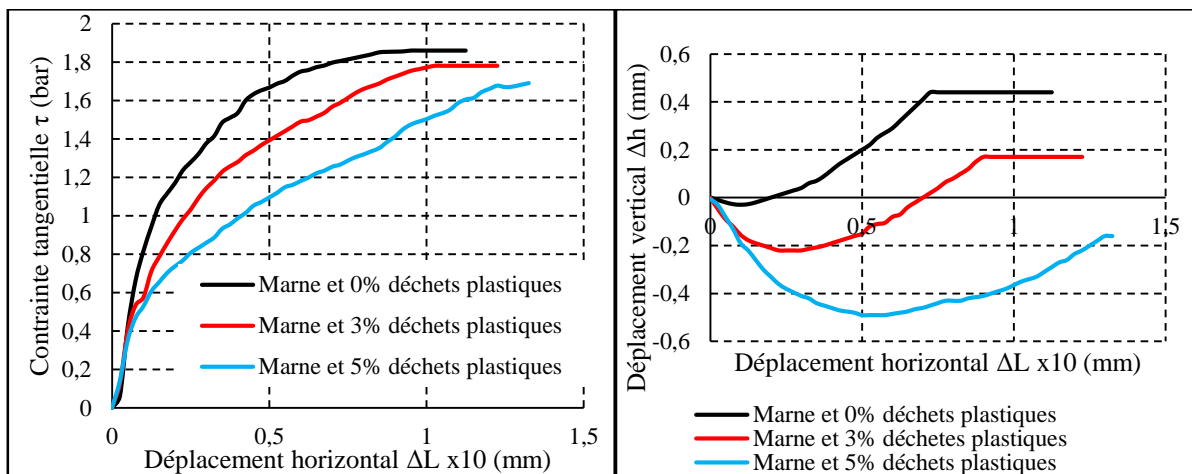


Figure VI.19 : Courbes comparatives à $\sigma = 1$ Bar.

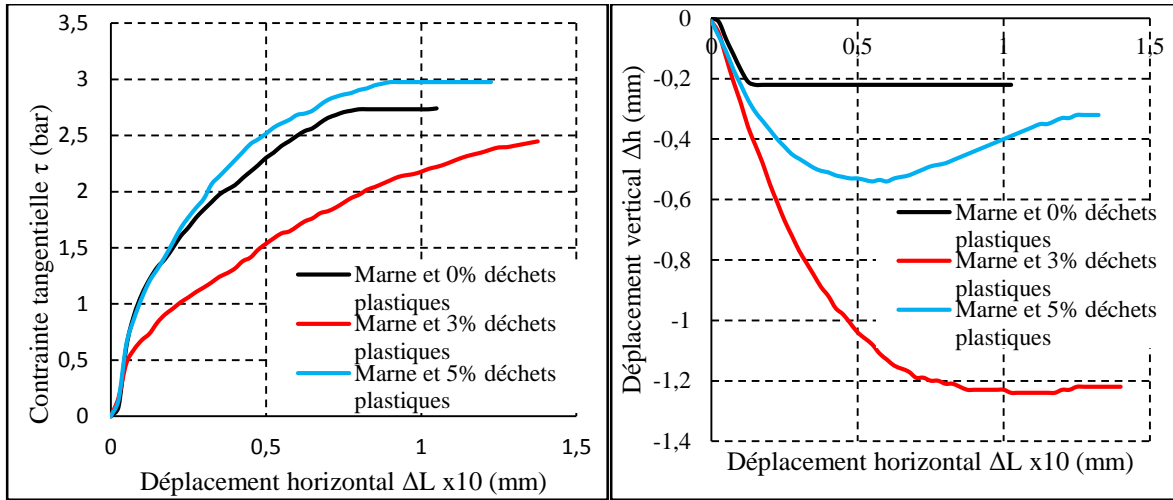


Figure VI.20 : Courbes comparatives à $\sigma = 2$ Bar.

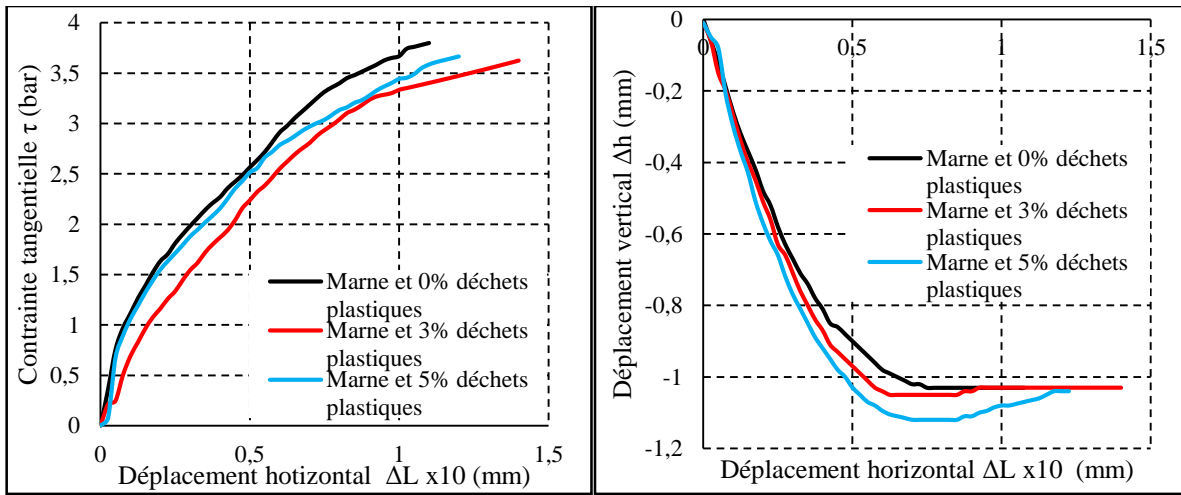


Figure VI.21 : Courbes comparatives à $\sigma = 3$ Bar.

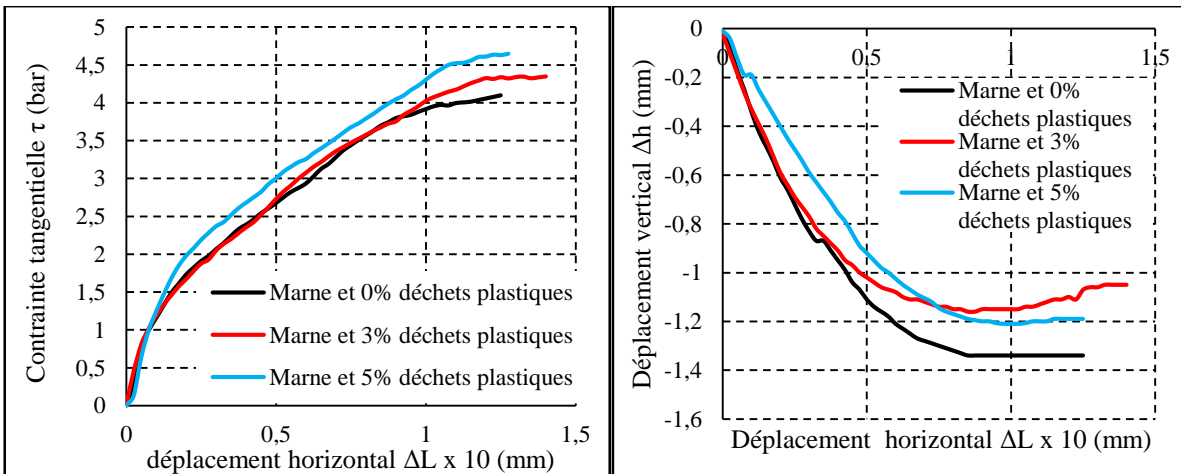


Figure VI.22 : Courbes comparatives à $\sigma = 4$ Bar.

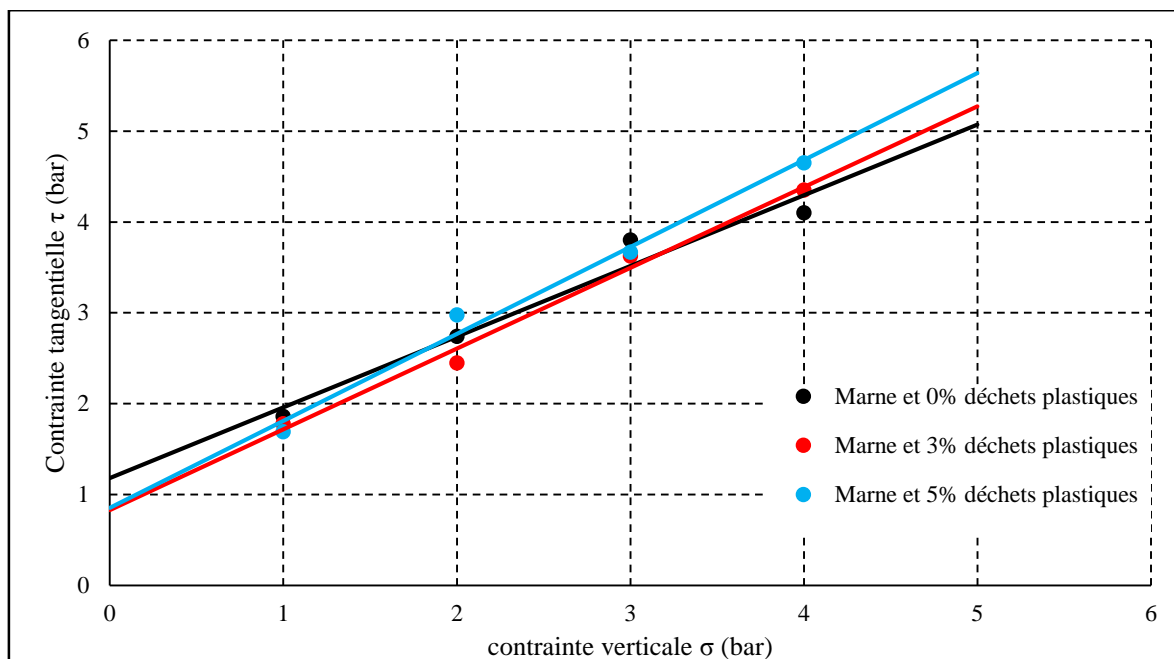


Figure VI.23 : Droites intrinsèques des différents mélanges.

En se basant sur les courbes comparatives de contraintes-déformations en fonction de la proportion des déchets plastiques sous une même contrainte normale, nous pouvons constater une amélioration sensible du comportement au cisaillement des mélanges avec l'ajout de déchets plastiques. En effet, les courbes relatives aux échantillons de marne + 5% de plastiques présentent pratiquement les meilleures résistances au cisaillement sous les différentes contraintes normales. Ceci se confirme par la figure VI.23, qui montre une amélioration notable des angles de frottement interne en fonction de l'ajout du plastique, suivie d'une légère diminution des cohésions. Ce qui se traduit globalement par un comportement favorable des mélanges en fonction de l'ajout des déchets plastiques.

VI.12. Conclusion

L'étude du comportement des mélanges au cisaillement a confirmé davantage que l'ajout de déchets plastiques est très intéressant et influe positivement sur leur comportement. Les angles de frottement interne s'améliorent sensiblement sans autant diminuer de leurs cohésions. Ceci se traduira par la suite (en pratique) sous forme de résistance et de stabilité de la chaussée.

Conclusions et perspectives

Le recyclage des déchets est devenu un impératif économique social et environnemental.

Maitriser les déchets c'est inciter la création d'entreprises spécialisées dans leurs gestions et leurs recyclages.

Affirmer que l'Algérie croule sous les déchets plastiques est une évidence, sur le terrain peu de solutions fiables sont mises en avant, le projet proposer apporte une précieuse contribution à la résolution de ce problème environnemental. L'intégration des déchets plastiques au matériau naturel à savoir la marne constitue une alternative économique et une solution durable dans les techniques routières.

Les matériaux sélectionnés (marne et déchets plastiques) présentent plusieurs avantages tant sur le plan économique et environnemental, à savoir la disponibilité, facilité d'extraction ou de collecte dans le cas du plastique, facilité de préparation et enfin économie de transport et de temps car il s'agit de matériaux locaux.

Les résultats obtenus à l'issu des essais réalisés sur des échantillons reconstitués à base de mélanges du marne et de déchets plastiques permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les mélanges présentent des densités sèches élevées et réagissent bien au compactage, ces résultats s'attifiaient le seuil de densités fixé par les normes relatives aux matériaux routier.
- La portance observée des différents mélanges montre que l'ajout de déchets plastiques est tout à fait faisable en couche de forme et de fondation même dans les milieux les plus défavorables.
- Les mélanges étudiés présentent des résistances très intéressantes au cisaillement direct à la boîte, traduite particulièrement par des angles de frottement interne très importants. Le plastique a permis l'augmentation de ce dernier ce qui permet d'augmenter la stabilité de la chaussée.
- En ce qui concerne la résistance aux chocs et à l'usure, les résultats obtenues pour les échantillons étudiés présente des résistances faibles à moyennes, toutefois, l'ajour de déchets plastiques améliore la résistance des mélanges. Par ailleurs, l'essai de dégradabilité et fragmentabilité révèle respectivement que les matériaux marnes et déchets plastiques sont non dégradables sous sollicitations hydriques et peu fragmentables sous sollicitations mécaniques.

En se basant sur l'ensemble des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les mélanges étudiés ont présenté des caractéristiques mécaniques très intéressantes sous les différentes sollicitations appliquées, pouvant autoriser leur utilisation en couches de chaussées (couches de forme, couches de fondations et couches de base éventuellement) sous faible à moyen trafic. Ainsi, l'utilisation des déchets plastiques dans la technique routière peut être une alternative fiable et rentable sur le volet économique et environnemental. C'est une opération innovatrice permettant de conserver les gisements de carrière et d'éliminer des tonnes de déchets plastiques, leurs confèrent ainsi un caractère de matière première dans la construction des réseaux routiers.

Le traitement des déchets en Algérie est encore loin des normes voulues par les autorités, en plus des nombreuses lacunes dans la collecte des déchets domestiques et industriels, le tri sélectif à la source est quasi inexistant. Il convient alors, d'engager des efforts substantiels et des actions concertées des acteurs économiques, des administrations, des pouvoirs publics, et des chercheurs pour encourager le développement de cette technique nouvelle, permettant l'utilisation des déchets plastiques dans la construction routière en particulier et dans d'autres domaines de construction en général.

Références bibliographiques

A.N.D, (Agence Nationale des Déchets), 2015- Schéma Directeur de gestion des déchets ménagers et assimilés de la commune de Tizi Ouzou.

Arquié.G et al, Mars 1990. Granulats-Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées.

Babilotte C et al, 1998, Guide technique de Conception et de dimensionnement des structures de chaussées communautaires, p 86.

Belaib A, 2011-2012 -Mémoire de magister en Ecologie- Université de Mentouri Constantine.

Benhassaine.M, 1980. Recherche sur les modèles de relief et les formations superficielles dans la vallée de l'oued Sébaou. Thèse 3ème cycle, Université Paris VI, France, pp 282.

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.

Blockmans S., 1999, De Pauw P. et Desmyter J. Granulats de débris et béton recyclé : résultats et développements récents. Partie 2 : béton recyclé. Bruxelles, CSTCMagazine, n° 3.

Boudlal O., 2007. Etude du comportement des matériaux recyclés au compactage, thèse de magister génie-civil, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Boukhari A et al, Masterials 01-05 mars 2015. Béton Bitumineux Modifiés en déchets plastiques, Université Kasdi Merbah - Faculté des Sciences Appliqués « FSA ».

De Bock L et Hanoreau Y, septembre 2002. La valorisation des déchets en construction routière. Mons, Colloque "New Life for Waste", RECYWALL.

Delahay D et al, Désordres sur des remblais en marne-page 113.124.

Deterre R et Froyer D, 1997. Introduction aux matériaux polymères, Paris, Tec & Doc Lavoisier, 212 p.

Dupont, B. et Tritignon, Paris 1994. Unités et Grandeurs : symboles et normalisation. Afnor Nathan. 127 pages.

Faure M, Septembre 1997 -COURS DE ROUTES Tome 2.

Fontanille M et Gnanou Y, 2014. Chimie et physico-chimie des polymères, Dunod, coll, troisième édition, 576 p.

Gagnon.L, Mars 1981, Techniques routières, modulo éditeur.

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.

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Juillet 2000, Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule I Principes généraux 2eme Edition.

LE Monde Afrique- article de Josiane Kouagneu, Journal du 17.08.2016.

LNHCC, 2014. Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction du Centre, unité de Tizi-Ouzou. Rapport géotechnique (étude du sol), dossier : 41/ES/2014.

Marcoux M et al, 2016, Déchets et économie circulaire, Condition d'intégration pour une valorisation en filières industrielles, Lavoisier, 333pages.

Modou DIOP-Projet de fin d'étude-Conception de structures routières sur marnes et argiles gonflantes-2001/2002 ;

Motteu H. et Rousseau E, juin 1992. Le remploi des déchets dans l'industrie de la construction, Bruxelles, CSTC-Magazine, n° 2.

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

Norme AFNOR C.B.R (NF P 94 – 078).

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

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

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

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

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

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

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

Norme AFNOR valeur au bleu de méthylène (NF P 94 - 068).

Office Wallon des déchets, 30 juin 2000, MANUEL relatif aux matières naturelles pour barrières argileuse ouvragées pour C.E.T. et réhabilitation de dépotoirs en région wallonne, Version 1.

Raymond D , 1976. Evolution sédimentaire et tectonique du Nord-Ouest de la Grande Kabylie (Algérie), au cours du cycle alpin.

Recherche Routière, Paris 1977. Utilisation des déchets et sous-produit en technique routière.

Robitaille V et al, 1997, Mécanique des sols-Théorie et pratique.

Saublet J, 2015, économie circulaire. Conférence régionale Climat Air Energie.

Seyni A, 2008. « Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par Co-broyage » université de Toulouse.

Zirmi.D et Sahraoui.S, 2001. Mémoire d'ingénieur génie civil, étude géotechnique et environnementale d'un site pour l'implantation d'une décharge, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

Cybergraphie

<http://cc-vouvrillon.fr/la-seconde-vie-de-nos-d%C3%A9chets>

http://docnum.univ-lorraine.fr/public/BUS_M_2012_YU_BONING.pdf

<http://tarekdata.blogspot.com/>

<http://thesis.univ-biskra.dz/>

http://www.cotita.fr/IMG/pdf_6_ANDRAUD_Dimens_chaussees_vf.pdf

<http://www.granulats-vicat.fr/>

<http://www.lesrecycleurs.ch/fr/filieres>

<http://www.techniques-ingenieur.fr/>

<http://www.unpg.fr/>

<http://www.wikitp.fr/structure-de-chausseacutes/les-differents-types-de-chaussees>

<https://www.pratique.fr/differents-types-valorisation-dechets.html>