

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

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



Mémoire de Master 2

Spécialité : Génie Civil
Option : Géotechnique

Thème

**Étude du comportement d'un mélange de
marne et de déchet de laitier cristallisé dans
les corps de chaussées**

Présenté par : M^r HAMOUDI Ali

Devant le jury composé de :

Mr KHATTAOUI Mohammed.....Professeur à l'UMMTO.....Président.
Mme OUKID Ouiza..... Maitre de conférences B à l'UMMTO.....Examinatrice.
Mr BOUDLAL Omar Maitre de conférences A à l'UMMTOPromoteur.

Promotion : 2017/2018

SOMMAIRE

Dédicaces

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des principales notations et indices

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1.Introduction..... 3

I.2.Définition d'une chaussée..... 3

I.3. Les principales couches de chaussées..... 3

I.3.1. Plate forme support de chaussée..... 4

I.3.2. couche d'assise..... 4

I.3.3. Couche de surface..... 4

I.4.Les différents types de chaussées..... 4

I.4.1.Les chaussées souples..... 5

I.4.2.Les chaussées bitumineuses épaisses..... 5

I.4.3.Les chaussées a assise traitée aux liants hydrauliques..... 6

I.4.4.Les chaussées à structure mixte..... 6

I.4.5.Les chaussées à structure inverse..... 7

I.4.6.Les chaussées en béton de ciment..... 7

I.5. Dimensionnement d'une chaussée..... 8

I.5.1.Le trafic..... 8

I.5.2.L'environnement..... 8

I.5.3.Le sol support..... 8

I.5.4.La qualité des matériaux..... 8

I.6. Matériaux utilisé..... 9

I.6.1.Les granulats..... 9

I.6.2.Les caractéristiques exigées des granulats..... 9

I.6.3.Choix des catégories de granulats 9

I.6.4.Les différentes familles de matériaux 9

I.6.5.Les matériaux pour assises de chaussées 9

I.7. Dégradation des chaussées.....	10
I.7.1. Cause de dégradations des chaussées.....	10
I.7.1.1. Le trafic.....	10
I.7.1.2. Les conditions climatiques.....	10
I.7.1.3. Les malfaçons.....	10
I.7.1.4. les accidents et les incidents.....	10
I.7.2. Types de dégradations et leurs causes probables	10
I.7.2.1. Les déformations.....	11
I.7.2.2. Les fissurations.....	13
I.7.2.3. Les arrachements.....	14
I.13 Conclusion.....	16
 Chapitre II : VALORISATION DES DECHETS	
II.1. Introduction	17
II.2. Origine de la production de déchets	17
II.3. Définition du recyclage	17
II.3.1. Définition d'un déchet	18
II.3.2. Pourquoi en recycle ?.....	18
II.4. Impacts du recyclage sur l'environnement.....	18
II.5. Les grandes catégories de déchets.....	19
II.5.1. Déchets ménagers et assimilés.....	19
II.5.2. Déchets non dangereux des activités économiques.....	19
II.5.3. Déchets dangereux des activités économiques.....	20
II.5.4. Déchets inertes	20
II.5.5 : Déchet sidérurgiques	21
II.6. Production de déchets solides dans le monde	21
II.7. Valorisation des déchets	21
II.8. Déchets et recyclage en Algérie.....	22
II.9. Déchets valorisables en génie civil:.....	22
II.9.1. Pneus usagés	23
II.9.2. Déchets des chantiers de BTP	23
II.9.3 laitiers sidérurgiques.....	24
II.9.3 .1. Différente catégorie de laitier sidérurgique.....	24
C .1. Génération du laitier de haut-fourneau.....	26

C.1.1.Laitier de haut-fourneau vitrifié (granulé ou bouleté).....	27
C.1.1.Laitier de haut-fourneau cristallisé.....	27
II.10.Valorisation de laitier à travers le monde.....	30
II.10.1.Valorisation de laitier en Algérie.....	30
II.10.2.Valorisation de laitier cristallisé dans les travaux routiers et en génie civil.....	30
II.13.Valorisation de laitier a travers au monde.....	30
Conclusion.....	32

Chapitre III : PREPARATION ET IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1.Introduction.....	33
III.2. Présentation et identification des matériaux.....	33
III.2.1.LA Marne.....	33
III.2.1.1.Type de marne.....	34
III.2.1.2Localisation géographique des marnes de la région de Tizi-Ouzou	
III.2.1.3.Utilisation divers de la marne.....	35
III.2.1.4.Origine du matériau utilisé.....	35
III.2.1.5.Concassage et tamisage de la marne.....	36
III.3.Essais d'identification.....	37
III.3.1.La teneur en eau naturelle (w).....	37
III.3.2.Interprétation des résultats.....	38
III.3.3.Masse volumique de sol.....	38
III.3.3.1.La masse volumique sèche (ρ_d) par pesée hydrostatique.....	38
III.3.3.2.Masse volumique humide ρ_h	39
III.3.3.3La masse volumique des particules solide ρ_s (méthode du pycnomètre).....	39
III.3.4.Indice des vides (e).....	40
III.3.5.Le degré de saturation (Sr).....	40
III.3.6.La porosité.....	41
III.3.7.Limite d'Atterberg.....	41
III.3.8.Détermination de la limite de liquidité WL.....	42
III.3.9. Détermination de la limite de plasticité Wp (NF P 94-051)	43
III.3.10.Indice de plasticité Ip (NF P 94-051).....	44
III.3.11.Analyse minéralogique.....	45
III.3.11.1 Analyse par diffraction des rayons X.....	45
a. Principe de la méthode.....	45

b.Présentation et interprétation des résultats.....	45
III.4.Laitier cristallisé.....	46
III.4.1.Présentation de laitier utilisé.....	46
III.4.2.Propriété de laitier d'EL HEDJAR.....	47
III.5. Conclusion	47
Chapitre IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES	
IV.1.Introduction.....	48
IV.2.Définition.....	48
IV.3.Objectif du compactage	49
IV.4.Condition de compactage	49
IV.5.Les facteurs qui influencent le compactage.....	49
IV.5.1.La teneur en eau (courbes de compactage).....	49
IV.5.2.Nature du sol.....	50
IV.5.3.Influence de l'énergie de compactage.....	51
IV.6.1.Propriétés des courbes de compactage.....	51
IV.6.2.Teneur en eau optimal	52
IV.7.Le contrôle de compactage sur le chantier	53
IV.8.Les essais de compactage au laboratoire.....	53
IV.8.1.L'essai Proctor	53
IV.8.1.1.Principe de l'essai	53
IV.9.L'essai Proctor modifié.....	55
IV.9.1.Définition.....	55
IV.9.2.Principe de l'essai.....	55
IV.9.3.Matériel utilisé.....	55
IV.9.4.Mode opératoire.....	56
IV.9.5. Essais réalisés.....	56
IV.9.6.Expression des résultats.....	57
IV.9.7.Interprétation des résultats.....	60
IV.10.Essai de portance Californien (California Bearing Ratio) (CBR) (NF P 94-078).....	62
IV.10.1.Introduction.....	62
IV.10.2.But de l'essai.....	62
IV.10.3.Principe de l'essai.....	62
IV.10.4.Matériel utilisé.....	63

IV.10.5. Matériel de poinçonnement.....	64
IV.10.6. Préparation des échantillons.....	64
IV.10.7. Détermination de l'indice portant immédiat (IPI).....	64
IV.10.8. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif).....	65
IV.10.8.1. But de l'imbibition (immersion dans l'eau).....	65
IV.10.8.2. Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement.....	65
IV.10.8.3. Mode opératoire.....	65
IV.10.9. Expression des résultats.....	66
IV.11. Conclusion.....	70
Chapitre V : FRAGMENTATION ET DEGRADATION DES MATERIAUX ETUDIES	
V.1. Introduction.....	71
V.2. Essai Micro Deval (NF P18-572).....	71
V.2.1. Définition.....	71
V.2.2. But de l'essai.....	71
V.2.3. Mode opératoire.....	71
V.2.4. Matériaux utilisés.....	73
V.2.5. Résultats et interprétation.....	73
V.3. Essai Los Angles.....	74
V.3.1. But de l'essai.....	74
V.3.2 : Principe de la méthode.....	74
V.3.3. Appareillage.....	75
V.3.4 : Exécution de l'essai.....	75
V.3.5 : Matériaux utilisés.....	76
V.3.6 : Résultats et interprétation.....	76
V. 4 : Essai de fragmentabilité (NF P 94-066).....	79
V.4.1 : Introduction.....	79
V.4.2 : Principe de l'essai.....	79
V.4.3 : Exécution de l'essai.....	79
V.4.4 : Matériaux utilisés.....	80
V.4.5 : Résultats obtenus.....	80
V.4.6 : Interprétation des résultats.....	82
V.5. Essai de dégradabilité (NF P 94-067).....	82

V.5.1.Principe de l'essai.....	82
V.5.2.Mode opératoire	82
V.5.3.Matériaux utilisé.....	84
V.5.4.Résultats obtenus	84
V.5.5.Interprétation des résultats.....	86
V.6.Conclusion	86

Chapitre VI : RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX ETUDIES

VI.1.Introduction.....	87
VI.2. Résistance au cisaillement	87
VI.3. Résistance et rupture des sols.....	88
VI.3.1 Définition de la rupture du sol.....	88
VI.3.2 Mécanisme de rupture d'un sol.....	88
VI.4.Les paramètres intrinsèques.....	89
VI.4.1. Paramètres c et ϕ pour différents types de sols.....	90
VI.5.Facteurs influant sur la résistance au cisaillement.....	91
VI.6.But de l'essai de cisaillement	91
VI.7.Type d'essais réalisés à la boite de cisaillement	92
VI.8.Avantages et inconvénients de la boite de cisaillement.....	93
VI.9.Principe de l'essai de cisaillement à la boite.....	93
VI.10.Mode opératoire.....	93
VI.11.Expression des résultats.....	94
VI.12.Essais réalisés.....	95
VI.13.Présentation des résultats.....	96
VI.14.Conclusion.....	103
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	104
REFERENCE BIBIOGRAPHIQUES	

Remerciements

J'exprime mes remerciements à :

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

Mr KHATTAOUI Mohammed, Professeur à l'UMMTO pour avoir accepté de présider le jury.

Mme OUKID Ouiza, Maitre de conférences B à l'UMMTO pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Les responsables du laboratoire MDS de UMMTO, Mr Khelifa Sid Ali et Mme Bouazzouni Fatima, pour leurs soutiens, disponibilité surtout leur confiance.

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



Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez.

Puisse dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À ma bien aimée Taous, je te remercie pour tes sacrifices, ton soutien moral et ta gentillesse, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études, sans ton aide, tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour.

À mes chers amis: Moussa , Anis , Mourad , Saïd , Nacer, Lyes, Hdoudou , Smail et Yahia.

A Toute la promotion géotechnique 2017 / 2018.

ALI

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

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

Figure I.2 : Structure type d'une chaussée souple.

Figure I.3 : Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse.

Figure I.4 : Structure d'une chaussée semi –rigide.

Figure I.5 : Chaussée à structure mixte.

Figure I.6 : Chaussée à structure inverse.

Figure I.7 : Chaussée en béton de ciment.

Figure I.8: Affaissement de rives.

Figure I.9 : Flache.

Figure I.10 : Orniérage.

Figure I.11 : Fissures longitudinales.

Figure I.12 : fissures transversales.

Figure I.13 : Faiénçage.

Figure I.14 : Nid de poule.

Figure I.15 : Pelade.

Figure I.16 : Plumage.

Figure I.17 : Ressuage.

Chapitre II

Figure II.1 : Valorisation des déchets.

Figure II.2 Déchets ménagers et assimilés.

Figure II.3 Déchets non dangereux des activités économiques.

Figure II.4 Déchets dangereux des activités économiques.

Figure II.5 : Déchets inertes.

Figures II.6 : Pneus usagés.

Figure II.7 : Déchets des chantiers de BTP.

Figure II.8 : Laitier d'aciérie de conversion.

Figure II.9 : Laitiers d'élaboration d'aciers carbone en filière électrique.

Figure II.10: Coupe schématique du haut fourneau.

Figure II.11 : Laitier granulé.

Figure II.12 : Laitier cristallisé.

Figure II.13 : Refroidissement de laitier cristallisé.

Figure II.14 : Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé (Malek, 1988).

Chapitre III

Figure III.1 : Effervescence de la marne.

Figure III.2 : Différentes types de marne.

Figure III.3 : Situation géographique du site.

Figure III.4 : Site d'extraction du matériau (marne) à l'état rocheux.

Figure III.5 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-8585 (2010).

Figure III.6 : Granulats de la marne après concassage.

Figure III.7 : Mode opératoire.

Figure III.8 : Exécution de l'essai.

Figure III.9 : Différents états de consistance (Robitaille et Tremblay, 1997).

Figure III.10 : Détermination de la limite de liquidité.

Figure III.11 : Limite de liquidité.

Figure III.12 : Détermination de la limite de plasticité.

Figure III.13 : Classification de sol selon GTR 1992.

Figure III.14 : Diffractogramme de la marne étudiée.

Figure III.15 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-585 (2010).

Figure III.16 : Laitier avant et après concassage.

Chapitre IV

Figure IV.1 : Compactage.

Figure IV.2 : Influence de la teneur en eau sur le compactage.

Figure IV.3 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.

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

Figure IV.5 : Courbe de compactage (disposition théorique) (H.VARLET, 1966).

Figure IV.6 : Variation de la densité optimale en fonction de la teneur en eau optimale (H.VARLET, 1966).

Figure IV.7 : Modèle de courbe Proctor.

Figure IV.8 : Matériels utilisés pour l'essai Proctor modifié.

Figure IV.9 : Différentes étapes d'exécution de l'essai Proctor modifié.

Figure IV.10 : Courbe Proctor de la marne seule.

Figure IV.11 : Courbe Proctor de la marne + 30% laitier.

Figure IV.12 : Courbe Proctor mélange marne +50% laitier.

Figure IV.13 : Courbe Proctor mélange marne +70% laitier.

Figure IV.14 : Courbe comparative des essais Proctor modifié.

Figure IV.15 : Évolution de la teneur en eau des différents mélanges.

Figure IV.16 : Évolution de la masse volumique des différents mélanges.

Figure IV.17 : Dimensionnement de la chaussée selon le trafic.

Figure IV.18 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

Figure IV.19 : Presse CBR.

Figure IV.20 : Éprouvette après le poinçonnement.

Figure IV.21 : Imbibition et gonflement (CBR après immersion).

Figure IV.22 : Courbes enfoncements-forces.

Figure IV.23 : Évolution des IPI en fonction du pourcentage du laitier (IPI, échantillons).

Figure IV.24 : Courbes enfoncements-forces.

Figure IV.25 : Évolution des CBR_{imm} en fonction du pourcentage du laitier.

Figure IV.26 : Courbes comparatives des IPI et CBR_{imm} des différents pourcentages de laitier.

Figure IV.27 : Gonflement relatif des différents mélanges.

Chapitre V

Figure V.1 : Appareillage Micro Deval.

Figure V.2 : Mise en place des granulats pour l'essai.

Figure V.3 : Courbe comparative des essais Micro Deval (marne seule et avec laitier).

Figure V.4 : Mise en place des granulats pour l'essai Los Angeles.

Figure V.5 : Lavage de matériau.

Figure V.6 : Courbe comparative des essais Los Angeles (marne seule et avec laitier).

Figure V.7 : Différentes étapes de l'essai de fragmentabilité.

Figure V.8 : Courbe granulométrique de la marne +0% de laitier.

Figure V.9 : Courbe granulométrique de la marne +0% de laitier.

Figure V.10 : Courbe granulométrique de la marne + 50% de laitier.

Figure V.11 : Courbe granulométrique de la marne + 70% de laitier.

Figure V.12 : Différente étapes de l'essai de dégradabilité.

Figure V.13 : Dégradation du matériau sous sollicitations hydriques.

Figure V.14 : Courbe granulométrique de la marne + 0 % de laitier.

Figure V.15 : Courbe granulométrique de la marne +30% de laitier.

Figure V.16 : Courbe granulométrique de la marne +50% de laitier

Figure V.17 : Courbe granulométrique de la marne +70% de laitier.

Chapitre VI

Figure VI.1 : Courbe de contrainte-déformation.

Figure VI.2 : Courbe contrainte-déformation.

Figure VI.3 : Courbe intrinsèque d'un sol pulvérulent.

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

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

Figure VI.6 : Courbe intrinsèque.

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

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

Figure VI. 9 : Échantillon après cisaillement.

Figure VI.10 : Courbes de variation du volume.

Figure VI.11 : Courbes contraintes-déformations.

Figure VI.12 : Droite intrinsèque (marne seul).

Figure VI.13 : Courbes de variation du volume.

Figure VI.14 : Courbes contraintes-déformations.

Figure VI.15 : Droite intrinsèque (marne +30% laitier).

Figure VI.16 : Courbes de variation du volume.

Figure VI.17 : Courbes contraintes-déformations.

Figure VI.18 : Droite intrinsèque (marne +50%laitier).

Figure VI.19 : Courbes de variation du volume.

Figure VI.20 : Courbes contraintes-déformations.

Figure VI.21 : Droite intrinsèque (marne +70%laitier).

Figure VI.22 : Comparaison de la cohésion des différents mélanges.

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

Figure VI.24 : Courbes comparatives à $\sigma = 100$ Kpa.

Figure VI.25 : Courbes comparatives à $\sigma = 200$ Kpa.

Figure VI.26 : Courbes comparatives à $\sigma = 300$ Kpa.

Figure VI.27 : Courbes comparatives à $\sigma = 400$ Kpa.

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Production de déchets solides dans quelques pays en 1970 (en millions de tonnes).

Tableau II.2 : Capacité de recyclage.

Tableau II.3 : Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR.

Tableau II.4 : La composition chimique de Laitier d'EL HADJAR (Charfa, 2010) .

Tableau II.5 : Analyse minéralogique de Laitier d'EL HEDJAR (Malek, 1988).

Tableau II.6 : Utilisation des laitiers (OCDE ,1977).

Tableau II.7 : Utilisation de laitier a travers au monde.

Chapitre III

Tableau III.1 : Teneurs en eau de matériaux étudiées.

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

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

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

Tableau III.5 : Interprétation des degrés de saturation établie par TERZAGHI.

Tableau III.6 : Présentation des résultats .

Tableau III.7 : Présentation des résultats pour la limite de liquidité pour la limite de liquidité.

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

Tableau III.9 : La composition chimique de la marne.

Tableau III.10 : La description des sols en fonction de leur en CaCO_3 . (Lerouil et al 1983).

Tableau III.11 : Caractérisation physico-chimique et mécanique du laitier selon (Charfia, Ait Mokhetar, 2009).

Chapitre IV

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

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

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor du matériau marne.

Tableau IV.4: Résultats de l'essai Proctor du matériau marne +50% laitier.

Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor du matériau marne+70%laitier.

Tableau IV.6 : Évolution des teneurs en eau et des Masse volumiques sèche pour les différents mélanges.

Tableau IV.7 : Résultats d'essai CBR pour la marne + laitier.

Chapitre V

Tableau V.1 : Charge abrasives en fonction de la classe granulaire.

Tableau V.2 : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval.

Tableau V.3:Calcul du coefficient Micro Deval.

Tableau V.4 : Calcul du coefficient Micro Deval.

Tableau V.5 : Calcul du coefficient Micro Deval.

Tableau V.6 : Calcul du coefficient Micro Deval.

Tableau V.7 : Charge de boulet suivant le type de classe granulaire.

Tableau V.8 : Calcul du coefficient Micro Deval.

Tableau V.9 : Calcul du coefficient Micro Deval .

Tableau V.10 : Calcul du coefficient Micro Deval .

Tableau V.11 : Calcul du coefficient Micro Deval .

Tableau V.12 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure .

Tableau V.13 : Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

Tableau V.14 : Valeurs de références.

Tableau V.15 : classification des matériaux rocheux selon le coefficient DG.

Tableau VI.1 : Cohésion des différents mélanges.

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

LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

- w : Teneur en eau naturelle ;
M_s : Masse des particules solide ;
M_h : Masse de l'échantillon à l'état humide ;
γ : Poids volumique total ;
γ_w : Poids volumique de l'eau ;
γ_s : Poids volumique des grains solides ;
γ_h : Poids volumique humide ;
γ_d : Poids volumique sec ;
e : Indice des vides ;
S_r : Degré saturation ;
n : Porosité ;
ρ : Masse volumique total ;
ρ_w : Masse volumique de l'eau ;
ρ_s : Masse volumique des grains solides ;
ρ_h : Masse volumique humide ;
ρ_d : Masse volumique sèche ;
V_w : Volume de l'eau ;
V_s : Volume des particules solides ;
V_a : Volume de l'air ;
V_v : Volume des vides ;
V_t : Volume total ;
w_L : Limite de liquidité ;
w_p : Limite de plasticité ;
I_p : Indice de plasticité ;
VBS : Valeur au bleu de méthylène ;
M_b : Masse de bleu permettant la saturation par adsorption ;
M_s : Masse sèche de la prise d'essai ;
V : Volume de solution de bleu utilisée ;
λ : Longueur d'onde de la source.
d : Espacement entre deux plans cristallins parallèles successifs.
θ : Angle entre le faisceau incident et le réseau de plans.
C_u : Coefficient d'uniformité ;
C_c : Coefficient de courbure ;
D₁₀ : Diamètre correspondant à 10% des tamis cumulé ;

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

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

w_{opt} : Teneur en eau optimale de l'essai Proctor ;

$(\gamma_d/\gamma_w)_{opt}$: la densité sèche optimale ;

IPI : L'indice Portant immédiat ;

CBR_{imm} : L'indice CBR après immersion ;

G : Gonflement linéaire relatif ;

MDE : Le coefficient micro Deval ;

LA : Le coefficient Los Angeles ;

DG : Le coefficient de dégradabilité ;

Fr : Le coefficient de fragmentabilité ;

A : La section intérieure de la boîte de cisaillement ;

$\frac{\Delta H}{H}$: Déformation horizontale ;

σ : Contrainte normale totale ;

σ' : Contrainte normale effective ;

C' : Cohésion effective (drainée) ;

ϕ' : Angle de frottement interne effectif ;

C_u : Cohésion apparente ;

ϕ : Angle de frottement apparent ;

L : Longueur de la boîte de cisaillement ;

ΔL : Déplacement horizontale ;

S_c : La section corrigée ;

$\frac{\Delta V}{V}$: Variation de volume ;

τ : Contrainte de cisaillement (tangentielle).

Introduction générale

Toute activité de production ou de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et a de multiples risques pour la santé humaine.

L'industrie des traitements de surfaces est une grosse génératrice de la pollution par les métaux lourds. Cette pollution pose un double problème :

- Environnemental : la pollution par les métaux lourds des nappes sou terrains, de l'air,....
- Économique : la perte de quantités importantes de métaux.

La réduction de ces problèmes se fait par les techniques de récupération (valorisation) dans les pays développés et par le stockage souvent inapproprié dans les pays en voie de développement (le cas de l'Algérie).

L'industrie de la production des métaux et des alliages a connu un fort développement durant les dernières décennies, et ce sous la pression de l'accroissement de la demande mondiale en termes des produits issus de ces procédés de raffinage.

Parmi ces technologies de raffinage, on trouve la sidérurgie (haut-fourneau et aciérie), qui permet le traitement du tout-venant contenant le minerai de fer, et d'obtenir un premier produit s'appelant la fonte. Ce produit subira par la suite une transformation donnant de l'acier, qui a des utilisations multiples dans divers domaines.

Les processus de traitement du minerai de fer et de transformation de la fonte en acier dans les haut-fourneaux, donnent naissance à d'autres produits autres que l'acier. Ces matériaux sont considérés comme déchets et sont constitués principalement de la chaux, de l'oxyde de fer et de la silice. Ils sont appelés les laitiers de haut fourneaux. Ces laitiers de haut fourneaux sont produits en quantités évaluées annuellement en millions de tonnes, constituant alors une grande problématique aux producteurs de l'acier et aux acteurs du domaine d'environnement, ce qui leurs impose de fournir des efforts importants afin de revaloriser ces matériaux, soit par recyclage dans la sidérurgie, soit en les réutilisant dans d'autres domaines où ils peuvent porter une valeur ajoutée, tels que le domaine agricole (comme engrais), en cimenterie (matière première pour le clinker) et aussi en domaine du génie civil comme matériaux de construction pour les routes, voies ferrées ainsi que d'autres ouvrages de ce domaine.

Le travail réalisé, s'inscrit dans ce contexte, il est orienté particulièrement à la valorisation du laitier cristallisé du haut fourneau, comme granulats pour les corps de chaussées (couches de fondations et couches de base). Ceci est fait à base de mélanges de granulats de marne à différentes proportions de laitier (0 à 70%).

Après avoir identifié les matériaux sélectionnés, les mélanges (marne+ laitier) sont soumis aux principaux essais mécaniques routiers, à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié, les essais de portance avant et après immersion à la presse CBR, les différents essais routiers (fragmentabilité, dégradabilité, Los-Angeles et Micro-Deval) et les essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les résultats obtenus sur les différents échantillons, sont comparés ensuite aux exigences des normes en vigueur.

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

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

Le chapitre II présente des généralités sur le recyclage à savoir, les matériaux recyclés, l'intérêt du recyclage dans le génie civil et quelques statistiques sur le recyclage. Il s'intéresse principalement au recyclage du laitier à savoir les travaux réalisés sur le laitier et les domaines d'utilisation.

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

Dans le chapitre IV est présentée la première série d'essai mécanique réalisés au laboratoire à savoir, les essais de compactage Proctor et les essais de portance CBR. Ces essais permettent d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage ainsi que leur portance sous les plus mauvaises conditions hygrométriques. 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 également sur quelques essais routiers, à savoir l'essai Los Angeles, l'essai Micro-Deval, l'essai de dégradabilité et l'essai de fragmentabilité ainsi que 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, les avantages et les inconvénients de l'essai, et enfin, les principaux résultats obtenus et les interprétations correspondantes.

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

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

I.1.Introduction

Toute politique de développement économique ou social ne peut réussir sans l'existence d'un réseau routier performant qui permet de répondre à la demande croissante de mobilité des personnes et d'acheminer les quantités toujours plus importantes de marchandises échangées dans un système économique.

Nous voyons donc l'intérêt que revêt la construction de routes pérennes surtout dans l'état actuel de notre développement sachant que les projets routiers nécessitent d'importants investissements.

Dans ce chapitre, seront présentés des généralités sur les chaussées modernes, les différentes couches constitutives, les principaux types de chaussées, les paramètres pris en compte pour leur dimensionnement ainsi que les déformations des chaussées souples.

I.2. Définition d'une chaussée

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties qui ont chacune un rôle bien défini.

Une chaussée est essentiellement destinée à supporter les actions mécaniques des véhicules et à les reporter sur le terrain de fondation sous – jacent, sans que se produisent de déformations permanentes, ni dans le terrain, ni dans la chaussée elle – même. (Coquand, 1978).

I.3.Structure de chaussée

Une structure routière est constituée d'un certain nombre d'assises superposées qui ont pour rôle essentielle de supporter les charges de trafic et d'assurer leur diffusion selon des niveaux de contraintes supportables par le sol d'infrastructure.

En effet, lorsque la contrainte de chargement transmise à travers une couche de chaussée devient supérieure à la charge admissible que celle-ci peut supporter, il s'amorce un processus de dégradation qui conduit inévitablement à la ruine de la structure.

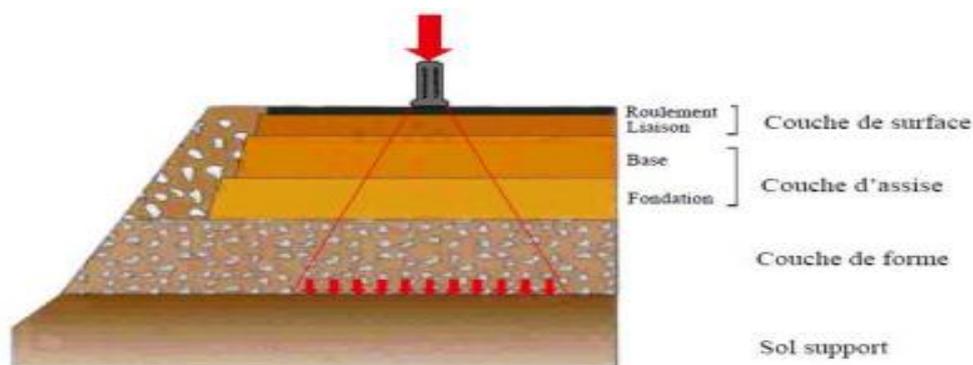


Figure I.1 : Les différentes couches qui constituent une chaussée.

I.3.1. Plate forme support de chaussée

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

a- Le sol support

Il est important que le sol soit assez porteur pour supporter la lourdeur engendrée par le trafic, ainsi la portance de la chaussée dépendra essentiellement de la portance du sol support.

b-La couche de forme

Cette couche, qui ne fait pas partie intégrante de la chaussée, a plusieurs fonctions :

Pendant les travaux, elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier ;

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

1.3.2. La couche d'assise

L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches, la couche de fondation, surmontée de la couche de base.

Ces couches en matériaux élaborés, le plus souvent liés (bitume, liants hydrauliques), pour les forts trafics, apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles.

a .Couche de fondation

Constituée de gravier concassé 0 /40, elle permet la répartition des pressions sur le support ainsi que le maintien des déformations.

b .Couche de base

Composée de gravier 0/25 et bitume, elle supporte l'action des véhicules permettant aussi d'atténuer les pressions élevées avant d'être transmise à la couche de fondation.

c . Couche de surface

Elle est composée des couches de roulement et d'une couche de liaison et elle est en contact direct avec le pneumatique de véhicule et la charge extérieure.

- **Couche de roulement**

C'est la couche supérieure de la chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat.

- **Couche de liaison**

Assurer une transition avec les couches inférieures plus rigides.

1.4. Les différents types de chaussées

Les chaussées sont classées selon la nature des matériaux, leur localisation dans la structure de chaussée et l'intensité du trafic (S.E.T.R.A, 1994), en :

1.4.1. Les chaussées souples

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15 cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm compactées par couches de 20 à 30 cm.

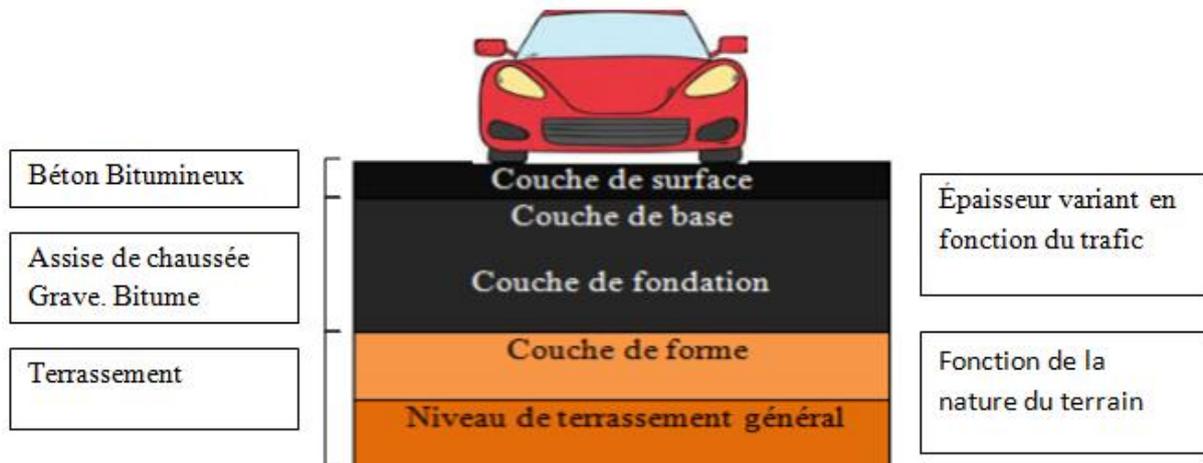


Figure I.2 : Structure type d'une chaussée souple.

1.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse surmontée un corps de chaussée d'épaisseur comprise entre 15 et 40 cm (composé d'une couche de base et une couche de fondation) en grave traitées aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques. Vue la différence d'épaisseur de la couche d'assise entre la chaussée simple et la chaussée épaisse, leur fonctionnement se diffèrent.

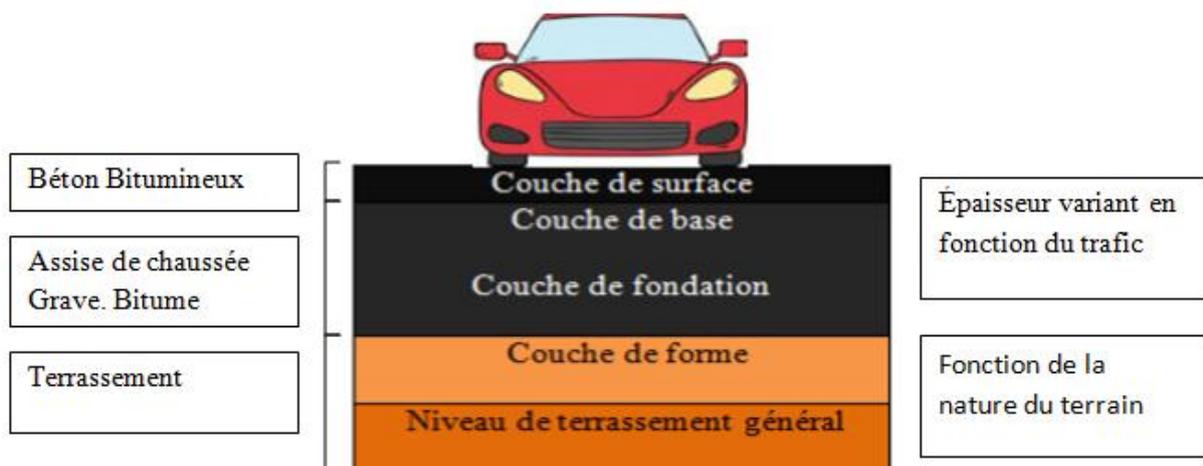


Figure I.3 : Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse.

La diffusion et l'atténuation des charges du trafic transmises aux sols sont atteints grâce à la rigidité et la résistance en traction.

Le collage des couches a une grande importance pour ce type de chaussée car il permet les allongements maximaux à la base des couches les plus profondes et donc évite les sollicitations en traction de chaque couche, qui conduisent à la ruine prématurée de la structure.

1.4.3. Les chaussées semi-rigides (ou à assise traitée aux liants hydrauliques)

Assise traitée aux liants hydrauliques de 20 à 50 cm avec une couche de surface en matériaux hydrocarbonés d'épaisseur 6 à 14 cm.

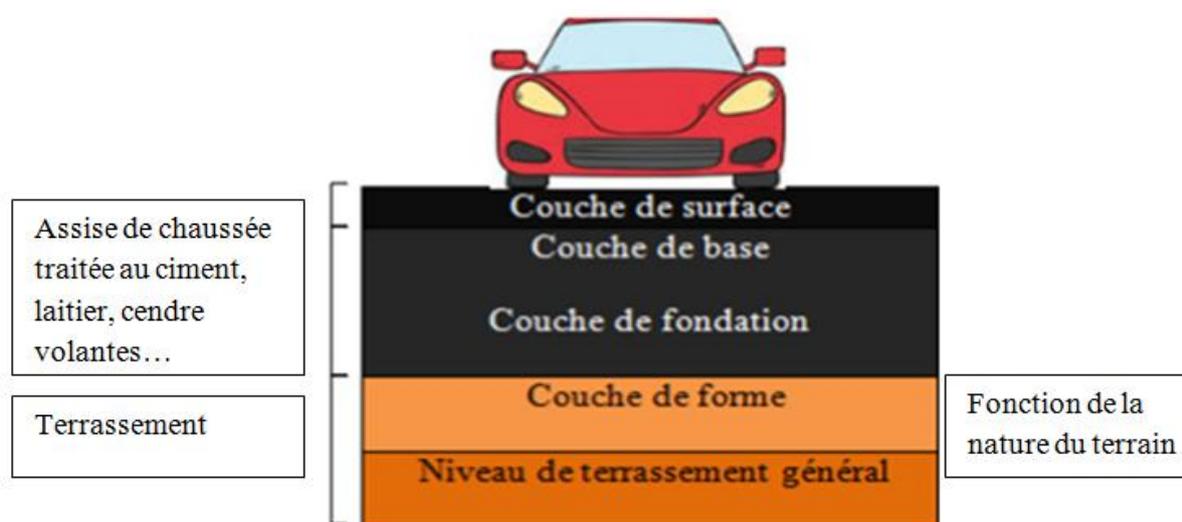


Figure I.4 : Structure d'une chaussée semi –rigide.

Le comportement mécanique de cette chaussée est intermédiaire entre celui des chaussées rigides et celui des chaussées souples ; la répartition des charges sur le support est bonne mais des contraintes de traction se développent à la base des couches. De plus ces matériaux sont exposés aux retraites thermiques créant ainsi des fissures remontant en surface jusqu'à la couche de forme .Une perte d'étanchéité en est la conséquence conduisant ainsi à une affectation du support avec de multiples déformations ainsi qu'une perte portance.

1.4.4. Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de surface et une couche de base (10 à 30 cm) en matériaux bitumineux (en général du grave bitume) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40cm). L'épaisseur de matériaux bitumineux doit être de la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée. Ce type de chaussée empêche la remontée de fissures entre la couche traitée aux liants hydrauliques (retrait) et la couche de grave bitume.

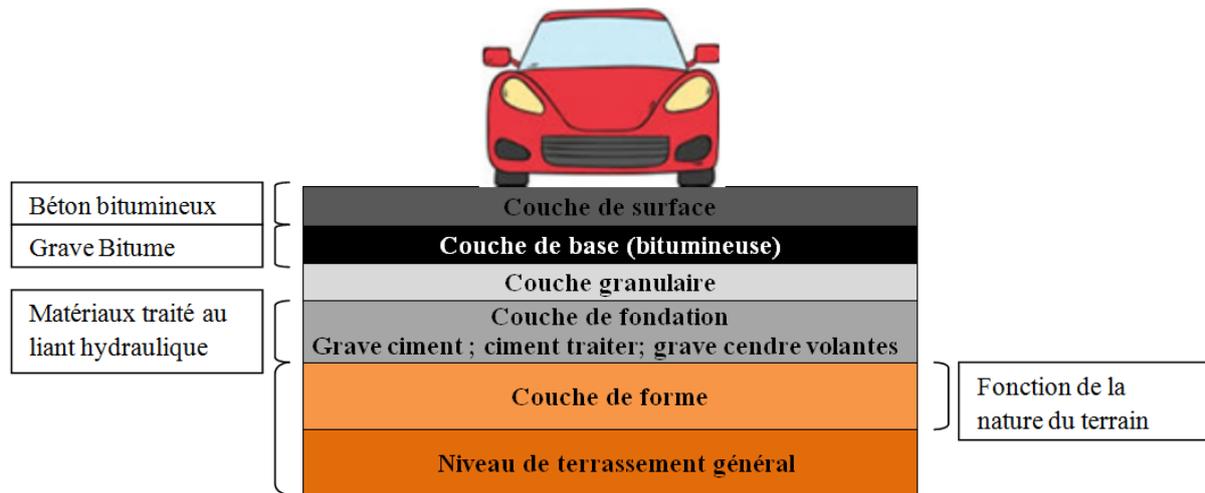


Figure I.5 : Chaussée à structure mixte.

1.4.5. La chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'environ 15 cm d'épaisseur, sur une couche de grave non traitée (environ 12 cm) reposant elle même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm.

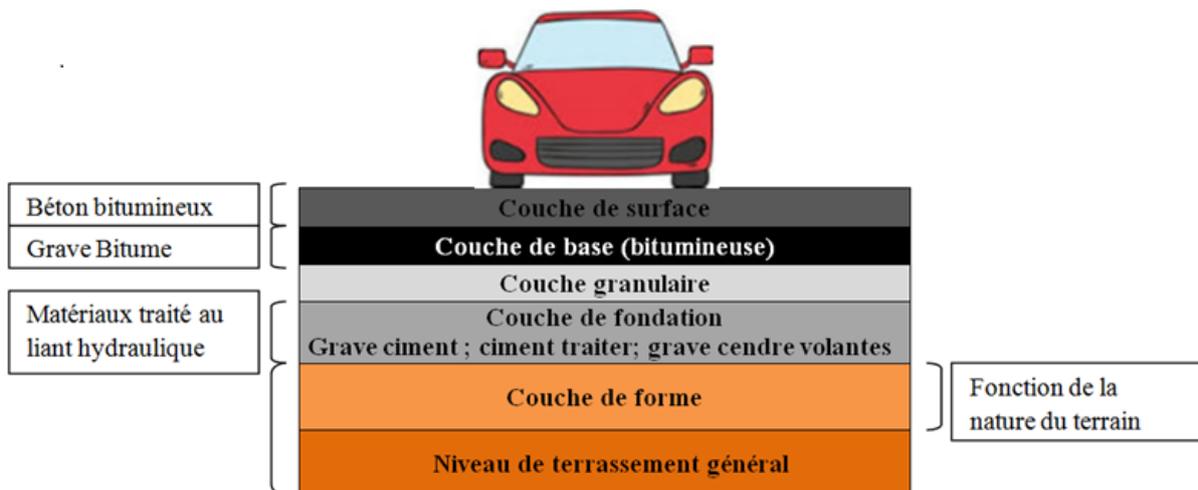


Figure I.6 : Chaussée à structure inverse.

1.4.6. Les chaussées à structure en béton de ciment (rigides)

Les efforts sont absorbés par ces structures transmettant ainsi très peu au sol. Leur inconvénient est que la partie basse peut être fragilisée à cause des efforts de traction engendrés par les poutres en béton. La dilatation de ce dernier peut provoquer des fissures si la mise au point de dilatations ou de pré fissuration n'a pas eu lieu.

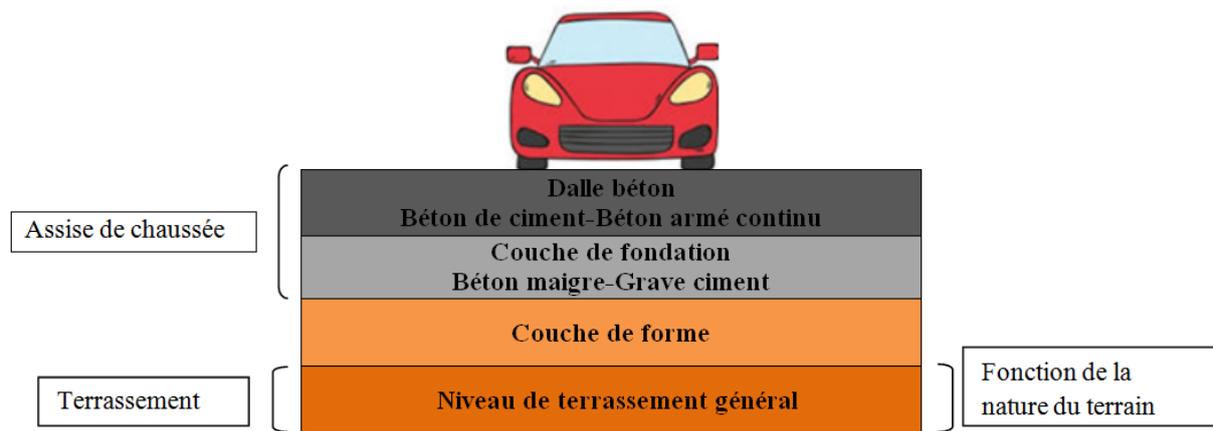


Figure I.7 : Chaussée en béton de ciment.

1.5. Dimensionnement des chaussées

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

Pour cela, en se référant à (Coquand ,1978) et (Faure ,1998), le dimensionnement de la chaussée tient compte des paramètres suivants :

1.5.1. Le trafic

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

1.5.2. L'environnement (les conditions climatiques)

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

1.5.3 Le sol support

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

1.5.4. La qualité des matériaux

Les matériaux utilisés doivent résister à des sollicitations répétées un très grand nombre de fois (le passage répété des véhicules, notamment lourds).

1.6. Les matériaux routiers

1.6.1. Les granulats

Les granulats sont des substances granulaires formées d'un ensemble d'éléments solides de dimensions généralement comprises entre 0 et 100 mm ; ces éléments sont obtenus par concassage, criblage etc.... et sont utilisés dans la fabrication de différents matériaux de construction et dans les différentes couches de chaussées. (D.Guy.2007).

En technique routière, l'importance de la qualité des granulats a été longtemps sous estimée. L'approfondissement des techniques a conduit, peu à peu, les ingénieurs routiers à prendre connaissance de cet ensemble de particules qui forment, de 90 à 95 % en poids des couches de roulement et de 100% dans la majorité des cas, des fondations des routes. Ces matériaux granulaires sont soumis à de nombreuses sollicitations :

- Les pneus à crampons ;
- l'action polissant des pneus ;
- le trafic lourd et intense ;
- le gel et dégel ;
- l'action de l'équipement de chantier lors de la construction de routes.

Il est donc nécessaire pour lutter contre l'usure des pavages et leur dégradation lors de la construction de routes, de connaître et de caractériser le mieux possible ces ensembles de fragments.

1.6.2. Les caractéristiques exigées des granulats

Ces caractéristiques dépendent :

- **De la qualité de la roche**

Dureté en présence d'eau mesurée par l'essai Micro Deval en présence d'Eau (M.D.E);
Résistance au choc mesurée par l'essai Los Angeles (L.A.).

- **de la qualité de la fabrication :**

Bonne forme (pas trop plats) ;
Propreté (pas de fines argileuses) ;
Granularité (courbe granulométrique correcte).

1.6.3. Choix des catégories de granulats

Ce choix est à effectuer en fonction de l'intensité du trafic, de la position des granulats dans la chaussée (fondation, base, roulement...), et de la technique employée (enrobé, béton, enduit...).

Il faut définir la catégorie de résistance mécanique (qui dépend des qualités intrinsèques des roches d'origine) et la catégorie des caractéristiques de fabrication.

On utilisera pour cela la directive "Spécifications relatives aux granulats pour chaussées" (S.E.T.R.A.1984), dont il faut impérativement actualiser les catégories avec la version la plus récente de la norme NF P 18-101.

1.6.4. Les différentes familles de matériaux

La technique routière française fait appel à trois grandes familles de matériaux, toutes à base de granulats :

Matériaux non liés « GNT » ;

Matériaux traités aux liants hydrocarbonés GB, BB, etc... ;

Matériaux traités aux liants hydrauliques GC.

1.6.5. Les matériaux pour assises de chaussées

- **Grave Non Traitée G.N.T. (NF P 98-129)**

Utilisation

Plates-formes supports de chaussées ;

Couches de fondation ou fondation /base.

Épaisseur de mise en œuvre 15 à 35 cm.

- **Grave Hydraulique (NF P 98-116)**

Utilisation

Couches de fondation, base ou fondation /base.

Épaisseur souhaitable d'utilisation 18 à 28 cm ;

Des épaisseurs supérieures peuvent être envisagées avec des ateliers de compactage adaptés.

- **Sable Hydraulique (NF P 98-113)**

Utilisation

Réalisation des couches de fondation.

Épaisseur souhaitable 18 à 32 cm ;

Épaisseur maximale par couche de 32 cm ;

Des épaisseurs supérieures peuvent être envisagées avec des ateliers de compactage adaptés.

- **Béton de Ciment (NF P 98-170)**

Utilisation

Couches de base et/ou couche de roulement ;

Réalisation des fondations de chaussées à revêtement en béton pervibré et des fondations des chaussées à revêtement en pavés de pierre naturelle ou en béton.

1.7. Dégradation des chaussées

1.7.1. Cause de dégradation des chaussées

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

- **Le trafic**

Au passage d'un véhicule la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue les poids particulièrement agressifs : le passage d'un essieu de 13 tonnes a autant d'effet sur la structure de la chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme. La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée qui présente alors des dégradations.

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

Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées de giratoire peuvent donner lieu à des dégradations de la chaussée.

- **Les conditions climatiques**

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

- **Les malfaçons**

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

- **Les accidents, les incidents**

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

1.7.2. Type de dégradations et leurs causes probables

Les dégradations sont classées en quatre familles :

1.7.2.1. Les déformations

- **Affaissement de rives**

Définition

Enfoncement prononcé localisé à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bonde de roulement de rive.



Figure I.8: Affaissement de rives.

Cause

Fatigue de la chaussée due à une épaisseur ou une qualité des matériaux ou calage en rive insuffisants. Dégradation souvent aggravée par la présence d'eau en rive qui reste piégée dans la cuvette.

- **Flache**

Définition

Dépression localisée de la surface de la chaussée, généralement de forme elliptique en plan et de longueurs inférieures à 5 m.



Figure I.9 : Flache.

Cause

Pour les chaussées souples : fatigue due à un défaut de portance localisé du sol (poche d'argile humide).

Pour les chaussées traitées aux liants hydrauliques (ciment, laitier, etc.) : mauvaise qualité localisée des matériaux de l'assise.

- **Orniérage**

Définition

Tassement en pleine chaussée sous le passage des roues des véhicules.



Figure I.10 : Orniérage.

Cause

Soit fatigue de la chaussée par tassement des couches inférieures due à un défaut de portance du sol (orniérage grand rayon) ;

Soit mauvaise stabilité d'un enrobé mou dans les fortes pentes ou rampes ou dans les zones de freinage (orniérage petit rayon).

1.7.2.2. Les fissure

- **Les fissures longitudinales**

Définition

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



Figure I.11 : Fissures longitudinales.

Cause

Fatigue de la chaussée due à une structure insuffisante vis-à-vis du trafic, ou d'une portance insuffisante du sol ;

Défauts de construction par exemple : élargissement, ou joints défectueux d'enrobé, ou mouvements du sol (tassement, glissement) :

Retrait du sol argileux à la suite d'une longue période de sécheresse.

- **Les fissures transversales**

Définition

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



Figure I.12 : fissures transversales.

Cause

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

- **Faïençage**

Définition

Ensemble de fissures formant un maillage, les mailles ayant la forme de polygones dont la plus grande diagonale ne dépasse pas 60 cm. Généralement cette dégradation est située dans les traces des atterrisseurs et est accompagnée d'une dépression.



Figure I.13 : Faïençage.

Causes

Fatigue de la couche de roulement ou de la totalité de la chaussée, due à une structure insuffisante vis-à-vis du trafic supporté ou à une portance insuffisante du sol.

1.7.2.3. Les arrachements

- **Nid de poule**

Définition

Cavité à la surface de la chaussée due à des départs de matériaux.



Figure I.14 : Nid de poule

Cause

Désagrégation et départ de matériau dû à une mauvaise qualité de la chaussée, à une pollution par remontée d'argile dans le corps de la chaussée, à une forte perméabilité de la couche de roulement.

- **Pelade**

Définition

Arrachement de la couche de roulement par plaques.



Figure I.15 : Pelade.

Cause

Épaisseur insuffisante de la couche de roulement ;
Défaut d'accrochage de la couche de roulement (nettoyage insuffisant avant la mise en œuvre de la couche de roulement, absence de couche d'accrochage, présence d'eau à l'interface).

- **Plumage**

Définition

État d'un enduit dont la mosaïque est rendue non jointif par départ de granulats.



Figure I.16 : plumage

Cause

Sous dosage en liant d'un enduit superficiel ;
Mise en œuvre dans des conditions atmosphériques défavorables (température trop basse, pluie...);

Utilisation de gravillons sales ;

Compactage insuffisant ;

Remise trop rapide sous circulation.

Cette dégradation se rencontre souvent dans les zones humides ou ombragées (surdosage en liant nécessaire).

- **Ressuage**

Définition

Remontée de mastic (liant + fines) à la surface du revêtement.



Figure I.17 : Ressuage.

Cause

Surdosage en liant ;

Bitume trop mou (liant mal adapté) ;

Sur compactage.

1.8. Conclusion

De nos jours, la conception des routes et leur dimensionnement est l'étape la plus importante car le trafic et son taux d'accroissement, exprimé en millions de poids lourds attendus sur la durée de vie de la chaussée, est généralement considéré comme le facteur prépondérant de la dégradation par fatigue à long terme des chaussées. Cette fatigue qui apparaît est liée également à la nature et l'épaisseur des matériaux utilisés et à leur condition de fabrication et leur mise en œuvre. Ceci, exige de plus en plus, que la construction d'une chaussée moderne soit améliorée ;

Ainsi, le concepteur doit prendre certaines précaution lors du choix des matériaux constituant les différentes couches.

Dans cette études, nous avons tenté de remplacer les granulats naturel généralement utilisés dans le domaine du génie civil (en particulier dans le domaine routier), par un matériau composé de granulats naturels et des déchets du laitier du haut fourneau .

CHAPITRE II

RECYCLAGE ET MATERIAUX RECYCLES

II.1.Introduction

Le terme de déchet traduit l'idée de se défaire d'un produit dont une personne physique ou morale dispose, dont elle n'a plus l'utilité et qui l'embarrasse, vers un exutoire dont elle préfère ne pas assumer la responsabilité et qu'elle souhaite oublier. Au cours des siècles, cet exutoire évolue: après l'élimination dans le milieu naturel sans précautions particulières à un moment où les quantités produites sont faibles, on retrouve les techniques actuelles à l'état primitif comme le feu, le tas de fumier ou le dépôt, dans un lieu écarté (les fossés entourant les fortifications dans un premier temps) si possible, à défaut dans les rues. L'accroissement de la population d'une part, le développement des techniques agricoles et industrielles de production rendant accessibles au plus grand nombre les produits agricoles et manufacturés d'autre part, ont eu pour effet de générer des quantités de déchets toujours plus importantes. Les déchets produits en faibles quantités que la nature pouvait dégrader à l'origine, sont devenus des masses colossales qu'il a fallu progressivement réglementer tant au niveau de la collecte que du traitement

La réglementation destinée à protéger le milieu naturel intervient au XXe siècle. Elle définit la terminologie et cerne les installations susceptibles d'éliminer chaque type de déchet: incinération, compostage, recyclage, dépôt dans un centre d'enfouissement technique, stabilisation... en introduisant la notion d'installation classée. Elle introduit aussi la notion d'obligation de se défaire d'un déchet.

Dans ce chapitre nous parlerons du recyclage ainsi que de la valorisation des déchets qui ne cessent de se multiplier autour de nous, ainsi que le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine du génie civil.

• II.2. Origine de la production de déchets

Selon Berg et al (2009) la production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- économiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

II.3.Définition du recyclage

C'est Faire du neuf avec du vieux, voilà l'idée de base du recyclage. Concrètement, cela consiste à réutiliser en partie ou totalement les matériaux qui composent un déchet pour fabriquer de nouveaux produits. (Berg et al ; 2009)

II.3.1. Définition d'un déchet

Un déchet, c'est un résidu (reste) de toute substance, de tout matériau que son propriétaire destine à l'abandon.

II.3.2. Pour quoi on recycle ?

Dans ce circuit, (figure II.1) nos déchets industriels ou ménagers deviennent des matières premières, ce qui permet de:

Préserver les ressources naturelles de notre planète ;

Réduire le volume et le poids de nos poubelles ;

Limiter les risques de pollution de l'air et du sol.



Figure II.1 : Valorisation des déchets.

II.4. Impacts du recyclage sur l'environnement

D'après Saadani (2002) les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

- Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 11 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15g de bois.

II.5. Les grandes catégories de déchets (ADEME)

Les déchets sont classés par catégories, lesquelles peuvent varier en fonction de leur nature, de leur provenance ou encore de leur caractère plus ou moins toxique.

II.5.1. Déchets ménagers et assimilés

Ce sont des déchets issus des ménages et des déchets assimilés, qui sont produits en routine par les acteurs économiques dont les déchets sont pris en charge par le service public de collecte des déchets.



Figure II.2 Collecte des déchets ménagers et assimilés.

II.5.2. Déchets non dangereux des activités économiques

Déchets **non-dangereux et non-inertes** des activités économiques, produits par les entreprises. Les données sur ces déchets sont fragmentaires ou estimées, sauf pour une partie de ces déchets, qui peut être assimilée aux ordures ménagères et prise en charge par les collectivités locales. Depuis 2008, les établissements qui produisent plus de 2 000 t de déchets non dangereux doivent déclarer leur production. Bois, métaux, textiles, papiers cartons, plastiques, verre, caoutchouc, déchets en mélange.



Figure II.3 Déchets non dangereux des activités économiques.

II.5.3. Déchets dangereux des activités économiques

Un déchet est classé dangereux si il présente une ou plusieurs des 15 propriétés de danger pour la santé humaine et l'environnement, du décret du 18 avril 2002 (explosif, nocif, cancérigène...). Ils peuvent être de nature organique (solvants, hydrocarbures...), minérale (acides, boues d'hydroxydes métalliques...) ou gazeuse.



Figure II.4 Déchets dangereux des activités économiques.

II.5.4. Déchets inertes

Déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Déchets minéraux du BTP principalement. Déchets de graviers, de sable, débris de pierre...



Figure II.5 : Déchets inertes.

II.5.5 : Déchet sidérurgiques

Sont des coproduits de l'industrie sidérurgique. Il existe trois grands types de déchets sidérurgiques : les laitiers d'aciérie de conversion, les laitiers d'aciérie électrique et les laitiers de haut-fourneau. (CTPL, 2004)

II.6. Production de déchets solides dans le monde

Tableau II.1 : Production de déchets solides dans quelques pays en 1970 (en millions de tonnes)

Type de déchet	Canada	État –Unis	Finlande	France	Royaume- Uni
Municipal (ménagers et commerciaux)	10	227	2	15	14
Industriels	10	100	5	46	30
Animaux	136	1.360	inconnus	Inconnus	inconnus
Déchets minéraux	399	998	8	120	100
Autres sources	inconnus	499	3	Inconnus	inconnus

II.7. Valorisation des déchets

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa tartinabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir ».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir. (Torregrossa et al,2006)

Il existe plusieurs types de valorisation des déchets :

- **Le recyclage** : est la réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve. Par exemple, prendre des bouteilles cassées, les refondre, et en faire des bouteilles neuves.
- **Le compostage** : c'est une bonne méthode de valorisation biologique qui permet la formation d'un apport organique le compost.
Hélas, les rendements énergétiques sont faibles et on observe quelques nuisances olfactives.
- **L'épandage des boues** : issues de station d'épuration plus particulièrement, permet un amendement organique des terres agricoles.
Attention, il faut limiter ce type d'amendement car les métaux lourds présents dans celles-ci sont susceptible, à la forte concentration, de polluer les sols et les nappes phréatiques.
- **L'incinération avec récupération d'énergie** : cette valorisation énergétique permet la production de chaleur ou d'électricité tout en réduisant considérablement le volume des déchets.
- **le réemploi** : c'est un nouvel emploi d'un déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation. C'est en quelque sorte, prolonger la durée de vie du produit avant qu'il ne devienne un déchet.
- **La réutilisation** : consiste à utiliser un déchet pour un usage différent de son premier emploi, ou à faire, à partir d'un déchet, un autre produit que celui qui a donné naissance.

II.8. Déchets et recyclage en Algérie

La production de déchets solides en Algérie a connu une augmentation durant ces dernières années, dont le ratio par habitant dans une zone urbaine est de 0.7kg/j/h, soit près de 9 millions de tonnes par an. La plupart de ces déchets sont acheminés vers des décharges ou des centres d'enfouissement. Plus de 10% de déchets éliminés sont de plastique (Sweep-Net, 2010). À cette situation, le recyclage de matières utilisées ou des emballages est le mode préconisé dans les pays développés. En Algérie, cette option reste très peu développée et le secteur informel est l'acteur important en matière de récupération.

Le ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement (MATE) vise, à travers son plan d'action, d'atteindre un taux de plus de 40% à partir de 2016, en termes de recyclage de matière, au lieu de 25 % pour l'année 2015, afin de réussir "le passage du statut de déchet à celui de produit". "A travers le plan d'action mis en place, l'objectif est d'améliorer le recyclage matière afin de passer d'un taux de 25% en 2015 à 40% voir plus, à partir de 2016".

La nouvelle stratégie de gestion des déchets vise à développer une véritable "économie verte", indique la même source qui précise que l'année 2014 constitue une année charnière pour "une gestion qualitative des déchets".

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

productrices des boissons et d'eau minérale à l'utilisation des bouteilles en plastique au lieu des bouteilles en verre a augmenté le taux des matériaux a recyclé. Les principaux produits contenant des emballages en plastique sont : huile, boissons, eau et produits de lessive. Plus de 2 millions de tonnes d'emballage plastique produits en Algérie par 192 unités dont seules 4000 tonnes sont récupérées (soit 0,0002%). Sauf que la capacité de récupération du plastique est de 130 mille tonnes par an (voir le tableau1).

Tableau II.2 : Capacité de recyclage

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

II.9.Déchets valorisables en génie civil

La valorisation dans le domaine du génie civil peut couvrir plusieurs types de déchets, de sources et de qualités différentes :

II.9.1. Pneus usagés

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt vident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité.



Figures II.6 : Pneus usagés

II.9.2. Déchets des chantiers de BTP

En 2010, pour une production totale de 355 Mt de déchets en France, 260 Mt provenaient du secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP) (ADEME, 2014). Les déchets du BTP résultent majoritairement des chantiers de construction, de réhabilitation et de démolition. Ils sont composés à 90 % de déchets inertes, le reste étant des déchets non dangereux et des déchets dangereux. (Moletta, 2009)



Figure II.7 : Déchets des chantiers de BTP.

II.9.3 laitiers sidérurgiques

Les laitiers d'aciérie sont des coproduits de l'industrie sidérurgique, ils sont considérés comme déchets. Toutefois, l'envisagement de la valorisation de ces matériaux dans le domaine du BTP et de la fabrication des matériaux de construction leur donne tendance de sortir du statut de déchet et de devenir une source de matières premières.

Il existe trois grands types de laitiers sidérurgiques : les laitiers d'aciérie de conversion et les laitiers d'aciérie électrique, les laitiers de haut-fourneau.

II.9.3.1. Différentes catégories de laitier sidérurgique

A - Laitier d'aciérie de conversion (LAC)

Lorsque l'opération de conversion est terminée, on soutire l'acier du convertisseur vers une cuve (dite "poche"). Le laitier, plus léger, et qui surnage au-dessus de l'acier, est déversé dans un "cuvier" et transporté jusqu'à un parc, où il est vidé dans une fosse. Le laitier, en phase de solidification, est alors refroidi violemment par aspersion d'eau. On obtient ainsi une roche artificielle, qui peut être concassée et criblée (comme dans une carrière) pour produire des granulats.

- Dans le domaine agricole, le LAC est utilisé depuis de nombreuses années comme fertilisant mixte : amendement-engrais sur cultures comme sur herbages, soit directement, soit en mélange avec des engrais phosphatés et des engrais potassiques compatibles.
- En travaux publics, dans les régions où les granulats naturels sont abondants, le LAC est surtout utilisé comme matériau de remblai, en couches de forme, ou comme

matériau de confortement d'ouvrages hydrauliques (protection de digues, rives, etc.) où sa densité élevée permet de résister au phénomène d'affouillement.

- Toutefois, sa dureté et sa remarquable résistance au polissage font que les granulats de LAC sont de plus en plus souvent utilisés dans les enrobés bitumineux, en particulier lorsqu'il s'agit d'augmenter la sécurité de revêtements routiers particuliers (virages, trafic intense, zones de décélération, etc.).

Sa richesse en chaux, permettant un phénomène de prise sans traitement particulier, est souvent mise à profit dans la réalisation de couches de roulement "rustiques" et très économiques pour des pistes et des chemins (forestier, de remembrement, de halage, etc.).



Figure II.8 : Laitier d'aciérie de conversion.

B .Laitiers d'aciéries électriques

Les laitiers d'aciéries électriques sont issus de la filière électrique qui génère une production d'acier en fondant des ferrailles recyclées dans des fours électriques. L'élaboration des aciers dans ce type d'aciérie se fait généralement soit en deux étapes pour les aciéries électrique « carbone », soit en trois étapes pour les aciéries électriques « inox », et chaque étape génère un type de laitier.



Figure II.9 : Laitiers d'élaboration d'aciers carbone en filière électrique.

C .laitier du haut fourneau

Le laitier de haut fourneau, au début du développement à l'échelle industrielle de cette filière, était considéré comme un déchet destiné à être stocké en terrils. C'est ce qui s'est aussi passé dans les années 1970, premières années de mise en service du complexe sidérurgique d'El HADJAR, non pas par ignorance, mais par manque de débouchés. Depuis les années 1980, le laitier d'El Hadjar est partiellement valorisé en cimenterie (pour le laitier granulé refroidi brusquement par trempé à l'eau) et en technique routière, avec cependant de grandes fluctuations annuelles (tableau1) qui dépendent essentiellement des conditions économiques locales (production de ciment, construction de routes,...).

Tableau II.3 : Production du laitier par les hauts fourneaux d'EL HADJAR.

Désignation	Production*10 ³									
	1987		1988		1989		1995		2002	
	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%	t/an	%
Laitier granulé	167	57.3	484	71.2	347	62.7	129	34	467	82.5
Laitier cristallisé	124	41.7	196	28.8	206	37.3	250	66	99	17.5
Total	291	100	680	100	553	100	379	100	566	100

C .1.Génération du laitier de haut-fourneau

La première étape dans la production d'acier est l'obtention de fonte. Le fer (Fe) est naturellement contenu dans le minerai de fer, dont la teneur en oxydes peut atteindre 60%. Ce minerai, combiné à du coke comme combustible et à de la chaux comme fondant, est alimenté dans un haut-fourneau, sorte de grand four vertical dans la partie basse duquel sont soufflés de larges volumes d'air chaud.

Ce processus fonctionne en continu, la colonne de matières brutes descendant au fur et à mesure que le fer est extrait du minerai et s'accumule au fond du haut-fourneau, recouvert par une couche de laitier plus léger. Ce laitier est une roche liquide (1500°C environ) composée des parties non métalliques du minerai combinées à la chaux. Le fer fondu (sous forme de fonte) et le laitier, tous les deux en fusion, sont périodiquement sous-titrés du haut-fourneau. Chaque tonne de fonte génère de l'ordre de 250 à 300 kg de laitier.

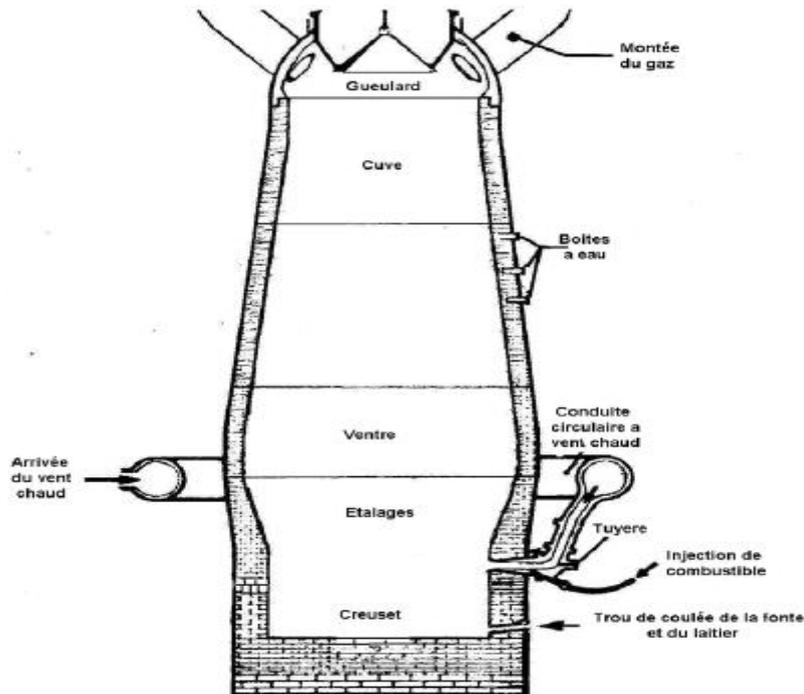


Figure II.10 : Coupe schématique du haut fourneau.

- **Laitier du haut-fourneau vitrifié (granulé ou bouleté)**

Lors du soutirage, après séparation d'avec la fonte, plus lourde, le laitier est dirigé vers un dispositif dans lequel il va subir un arrosage violent et abondant d'eau sous haute pression (trempe) destiné à le vitrifier. L'énergie calorifique contenue dans le laitier en fusion provoque son explosion et forme instantanément du laitier vitrifié. Ce dispositif s'appelle un granulateur et le laitier ainsi vitrifié, laitier granulé. Une variante consiste à le tremper, partiellement ou totalement, à l'air en le pulvérisant. Ce procédé de vitrification à l'air s'appelle bouletage et le laitier ainsi obtenu, laitier bouleté. Marchés essentiellement Cimentiers car valorisé à 100% sous forme moulu pour son pouvoir.

En dehors d'une utilisation, de plus en plus rare, comme sable dans la construction, le laitier vitrifié est largement utilisé dans l'industrie du verre comme source d'alumine et de silice. Néanmoins, en France, c'est surtout sa fonction de liant hydraulique qui est recherchée.



Figure II.11 : Laitier granulé

- **Laitier de haut-fourneau cristallisé**

Issu de la fabrication de la fonte au haut-fourneau, le laitier d'high-fourneau correspond à la gangue du minerai de fer, cendres de coque/charbon et fluidifiants. Ce laitier est isolé de la fonte liquide où il flotte par différence de densité.

Ce type résulte du refroidissement lent à l'air libre du laitier soutiré de la base du haut-fourneau après avoir été séparé de la fonte. A l'air libre le laitier se cristallise sous forme de roche, et pour le fragmenter les sidérurgistes procèdent à son arrosage au début de sa solidification.



Figure II.12 : Laitier cristallisé.

1. Production du laitier de haut-fourneau cristallisé

Lors du soutirage, après séparation avec la fonte, plus lourde, le laitier est dirigé par une rigole vers des fosses où il va refroidir à l'air et se cristalliser sous forme de roche. Après le début de la solidification, le laitier est arrosé afin d'en abaisser la température et de le fragmenter. On obtient ainsi du laitier cristallisé brut, qui peut alors être concassé et criblé (comme dans une carrière) pour produire des granulats.

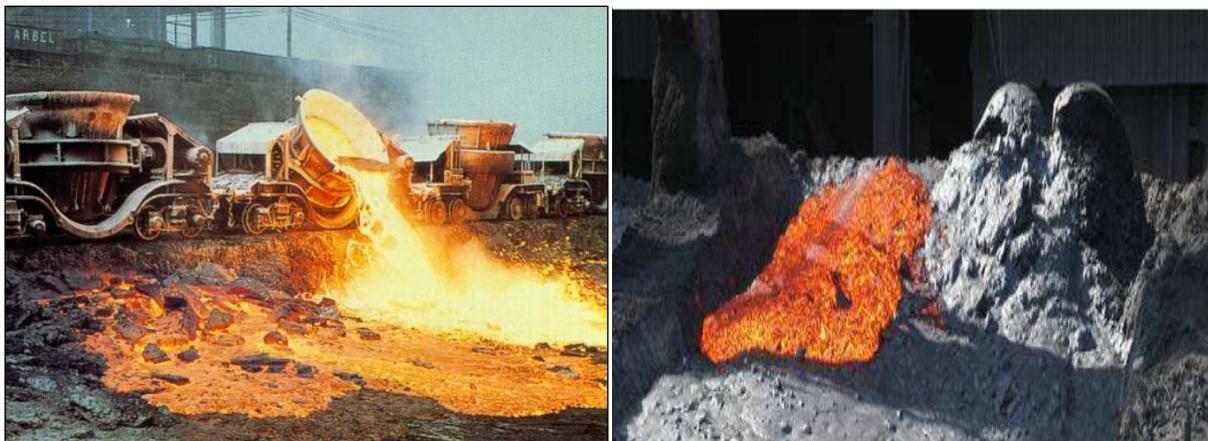


Figure II.13. Refroidissement de laitier cristallisé.

2. Composition chimique du laitier cristallisé

Le laitier cristallisé, lorsqu'il est refroidi lentement en couche épaisse, présente une texture poreuse essentiellement due à une libération de soufre en cours de refroidissement. La réaction serait limitée par la quantité de sulfure et le potentiel d'oxygénation de laitier. Les laitiers les plus désulfurant donc les plus basiques et les plus chauds provoquent des réactions soufre / oxygène plus énergiques avec une tendance à une plus grande porosité.

On peut considérer le laitier cristallisé, pour 95 à 98 (%) de sa composition, comme le mélange de quatre oxydes SiO_2 , CaO , Al_2O_3 et MgO , le complément étant constitué par des oxydes secondaires FeO et MnO et des composés sulfurés .

Tableau II.4 : La composition chimique de Laitier d'EL HADJAR (Charfa,2010)

Composition chimique en (%)										
CaO	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Mn ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	P.A.F
45.78	0.38	34.99	9.79	3.92	0.67	2.47	0.86	0.01	0.34	0.50

3. Analyse minéralogique du laitier cristallisé d'EL HEDJAR

Le tableau 13 donne les minéraux formés dans ce laitier lorsque ce matériau est refroidi lentement à l'air libre (Malek, 1988) déduit de l'analyse aux rayons x effectuée sur un laitier cristallisé de hauts fourneaux d'EL HADJAR présenté par la figure II.14.

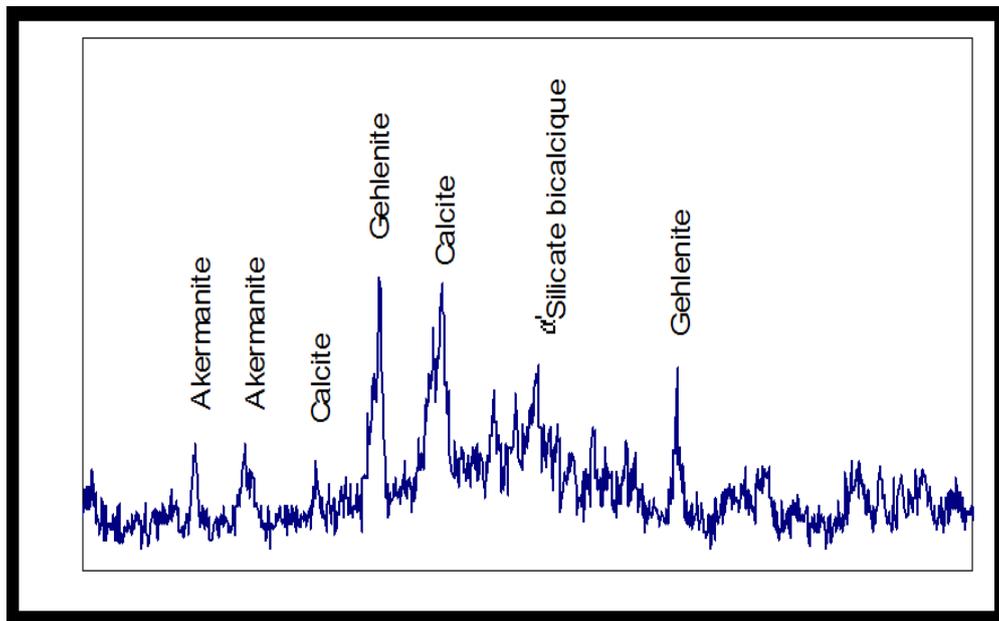


Figure II.14. Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé (Malek, 1988).

Tableau. II.5 : Analyse minéralogique de Laitier d'EL HEDJAR (Malek, 1988).

Les minéraux	Désignation	Formule chimique
Gehlénite	C_3AS_2	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$
Akermanite	C_2MS_2	$2\text{CaO}.\text{MgO}.2\text{SiO}_2$
Calcite	CC	CaCO_3
α Silicate bicalcique	$\alpha \text{C}_2\text{S}$	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$

4. Contrôle de la qualité du laitier cristallisé

La composition du laitier est contrôlée de façon régulière, lors de son élaboration, par analyse chimique. La régularité de sa composition chimique est établie et reconnue. Selon les normes-produits applicables ou les cahiers des charges des clients, le laitier peut faire l'objet d'ajustement de composition lors de sa génération, par ajouts éventuels de produits dans le haut-fourneau.

Remarque : Le laitier cristallisé de haut-fourneau ne présente pas de risque environnemental avéré.

II.10. Valorisation du laitier à travers le monde

Tableau II.7 : Utilisation de laitier a travers le monde.

	Enrobés bitumineux	Enduits superficiels	Sous-couches de chaussées	Bétons de ciment	Couche de Forme remblais
Allemagne	X	X	X		X
Belgique	X		X		
Espagne			X		
États-Unis	X	X	X	X	
Finlande	X		X		
France	X		X	X	X
Grande-Bretagne	X	X	X	X	
Italie	X				X
Pays-Bas	X	X	X		
Canada	X		X	X	

II.10.1. Valorisation du laitier en Algérie

L'utilisation des produits de laitier en Algérie est limitée à quelques rares applications malgré sa production progressant (500.000 tonnes/an). (Behim, 2003) En cimenterie, il entre comme un ajout secondaire ne dépassant pas 20 %, cette Substitution est faite seulement dans quelques cimenteries et en travaux routiers : A titre d'exemple, le laitier granulé a trouvé une utilisation dans la réalisation de la liaison autoroutière Annaba – Berrahal, où la couche de fondation été réalisée par une grave laitier tout laitier.

Des études intéressantes et récentes ont montré la possibilité d'utiliser les laitiers Algériens (d'El-Hadjar) pour :

- La fabrication des briques silico calcaires à base du laitier. (Arabi, 1996)
- La fabrication du béton cellulaire autoclave. (Belouettar, 2003)
- La fabrication d'un ciment de laitier activé sans clinker. (Mezghiche, 1989)

II.10.2. valorisation de laitier cristallisé dans les travaux routiers et en génie civil

Les usages du laitier cristallisé sont généralement ceux des roches naturelles de mêmes caractéristiques physico-chimiques : granulats pour bétons, pour enrobés bitumineux, pour

graves traitées au liant hydraulique, ballast, etc. Ils sont couverts par les mêmes normes “granulats”, françaises et européennes.

a) Dans le béton

Le laitier cristallisé, concassé, peut être utilisé comme gravillon avec un sable naturel roulé dans un béton mixte binaire. On obtient un béton de laitier. Lorsqu'en outre le sable utilisé dans le béton est un laitier granulé (brut ou pré broyé), on parle de béton tout laitier.

b) Construction des assises de chaussées

Le laitier cristallisé concassé occupe une place de choix en technique routière où on l'utilise en association avec les liants hydrauliques ou hydrocarbonés dans toutes les couches de chaussée, de la couche de fondation à la couche de roulement incluse. Il sert aussi de granulats dans les enrobés des couches de roulement, et de grave dans les graves hydrauliques utilisées en assises de chaussées (couches de base et de fondation). Les granulats de laitier cristallisé concassé, par leur angularité et leur rugosité naturelles conviennent pour la fabrication d'enrobés bitumineux (bonne adhésivité) en empêchant le déchaussement des granulats. Le laitier concassé peut être utilisé comme granulats dans les graves hydrauliques quel que soit le liant utilisé.

c) Ballast pour voies ferrées

Le ballast de voies ferrées est l'un des emplois les plus anciens du laitier cristallisé concassé et criblé. Cette utilisation du laitier, apparue vers 1885, s'est très vite développée.

d) Autres utilisations

Le laitier concassé est également utilisé en préfabrication pour la confection des blocs, panneaux, hourdis agglomérés, pavés, ainsi que dans d'autres usages assez particuliers (granulats de lits filtrants). L'emploi du laitier concassé en tout venant se fait en remblai, couches de forme, travaux de viabilité et plus généralement en voiries et réseaux divers (VRD). Les granulats de laitier cristallisé présentent un large éventail de propriétés spécifiques qui s'accompagnent d'une grande polyvalence d'emploi.

De plus, il faut attirer l'attention sur les propriétés particulières de ce matériau qui présente à la fois une résistance mécanique élevée et une conductivité thermique faible. En effet, à épaisseur égale, les bétons de granulats de laitier cristallisé sont deux fois plus isolants que les bétons classiques, ce qui présente un avantage indéniable pour la protection au feu des aciers de structure (DTU 1966 – CSTB).

Il faut également signaler qu'en modifiant la méthode de refroidissement, on peut obtenir un granulats léger normalisé dont l'usage dans les bétons de structure permet de réduire les charges et donc les fondations des ouvrages. C'est un facteur important d'économie dans les immeubles de grande hauteur.

Tableau II.6 : Utilisation des laitiers (OCDE ,1977).

Utilisation	Forme d'utilisation	Emplois
Cimenterie	Granulé moulu (bouleté moulu)	- Ciments a teneurs en laitier variables 5 a 85%)
Géotechnique routière	Granulé Cristallisé concassé Mélange cristallisé concasse + granulé Mélange granulé ou cristallisé concassé avec laitier d'aciérie	Sous-couches de chaussée - Stabilisation de matériaux naturels concassés - Granulats pour enrobes et couches de chaussée - Couches de chaussée - Couches de chaussée
Bétons hydrauliques	Granule Cristallise concasse Expansé concasse	- Sables pour bétons (pré broyés) - Mélanges laitiers granules - cendres volantes - Cailloux et gravillons - Granulats pour bétons isolants légers
Chemin de fer	Cristallise concasse	- Calibres pour ballast
Divers	Granulé Cristallisé concassé tout-venant Cristallisé concassé calibré Refondu Fibreux	- Sable pour décapage - Dégraissant pour terres cuites - Matériaux pour remblais - Charges pour lits filtrants - Pavés, Slagceram - Laine

Conclusion

L'accumulation des déchets du laitier de haut fourneau issus de la sidérurgie influence d'une façon négative l'état environnemental,

La politique adoptée avait pour mission d'éliminer ces déchets indésirables en les recyclant par leur utilisation dans les domaines adéquats.

L'objectif de ce travail est de trouver une autre issue pour se débarrasser des déchets sidérurgiques au moindre cout et sans nuire à l'environnement. Il s'agit de les utiliser éventuellement comme granulats dans le domaine routier (en couches inférieures de chaussées). Pour cela de nombreux essais (essais d'identification et essais mécaniques) seront effectués pour confirmer ou non cette piste de valorisation. L'identification des matériaux utilisés dans cette étude fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX

III.1.Introduction

L'étude du comportement mécanique d'un matériau passe premièrement par la réalisation d'essais d'identification en laboratoire. Les essais mise en œuvre ont pour objectifs de déterminer les principaux paramètres physiques généralement utilisés en mécanique des sols.

Ainsi sont déterminés :

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

III.2. Présentation et identification des matériaux

Dans ce travail, les mélanges étudiés sont composés de deux matériaux essentiels, à savoir les granulats de la marne et du laitier cristallisé.

III.2.1.La Marne (Melbouci ;2016)

Les marnes sont des roches meubles, dont les principaux constituants sont des argile et de carbonates de chaux.les propriétés sont très variables selon les proportions de l'une et de l'autre . Elles forment une famille de sol qui se situe entre les argiles et les calcaires.

Les argiles franches: $0 \leq \% \text{ carbonates} < 10 \%$.

Argiles marneuses: $10\% \leq \% \text{ carbonates} < 30\%$;

Les marnes : $30\% \leq \% \text{ carbonates} < 70\%$;

Calcaire marneux: $70\% \leq \% \text{ carbonates} < 90\%$.

Calcaires : $90\% \leq \% \text{ carbonates} \leq 100\%$

La marne argileuse réagit à l'acide chlorhydrique (HCl) en manifestant une effervescence à son contact (présence de calcaire).

En chimie l'équation s'écrit : $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \longrightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$



Figure III.1 : Effervescence de la marne.

III.2.1.1.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, marne sableuses, marne glauconieuses...



Figure III.2 : Différents types de marne

III.2.1.2 Localisation géographique des marnes de la région de Tizi-Ouzou

Les travaux du géologue français Daniel Raymond cité par Mehidi (1997), montrent que la marne se trouve en abondance dans tout le Nord-est de TIZI OUZOU. En effet la carte géographique de la Grande Kabylie situe le gisement dans toute la vallée qui contourne le DJEBEL SIDI BELLOUA et AISSA MIMOUN. L'étendue s'étale de TIMIZART LAGHBAR à MEKLA au sud de MAKOUA vers le Nord et en tirant vers OULAD OUARET par le Nord-Ouest.

Les marnes de TIZI OUZOU sont de deux types (Mehidi, 1997) :

- **Le sahélien**

Ce sont des marnes argileuses bleues, surmontées par quelques lits de grés grossiers. Ces marnes se trouvent dans les localités de DRAA BEN KHEDDA, de BOUKHALFA, du BELLOUA et du SEBAOU.

- **Le Quaternaire**

Ce sont des marnes dures pénétrées par de nombreux filons de calcite fibreuse, avec de nombreux bancs de grès calcaires. Ces formations se rencontrent dans les flancs sud des massifs du BELLOUA et AISSA MIMOUN. Les affleurements marneux de la région de TIZI OUZOU couvrent une surface de 470 Km².

Finalement la surface des affleurements marneux au niveau de la Grande Kabylie dépasserait 1100 Km².

III.2.1.3. 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.2.1.4. Origine du matériau utilisé

La marne utilisée dans cette étude (voir figure) est prélevée d'un site à Krim Belkacem à environ 1km du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou.

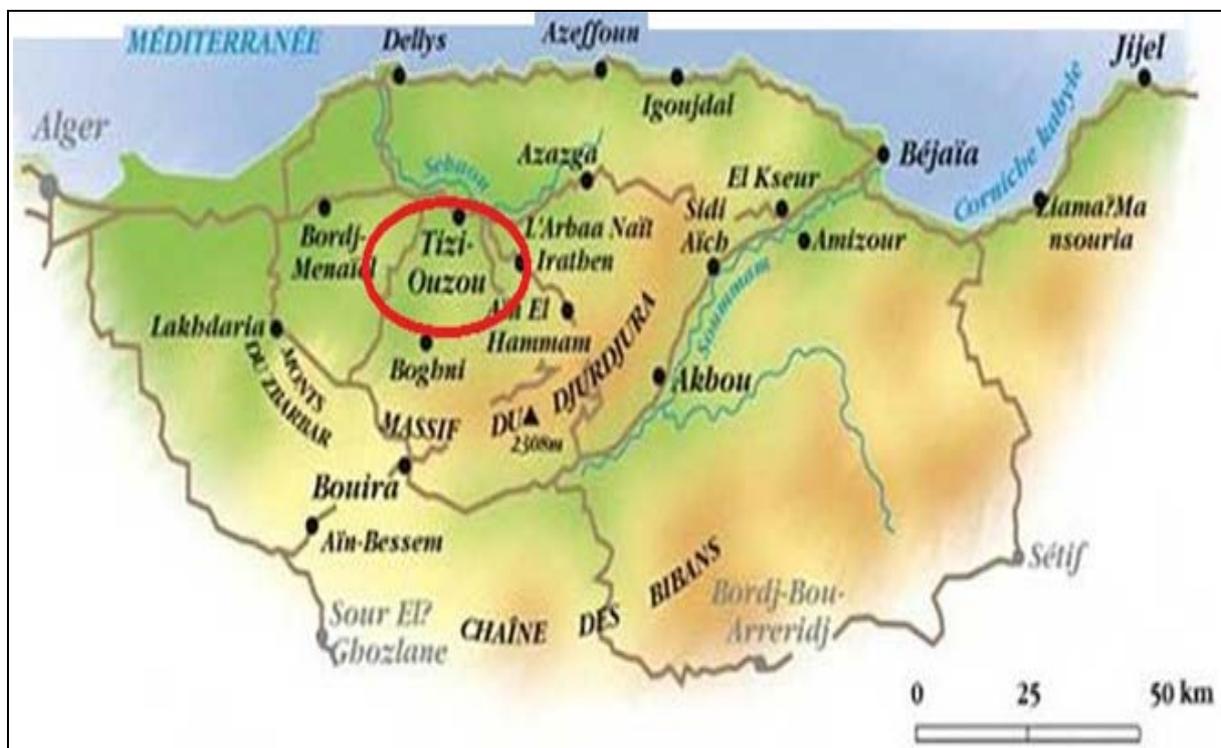


Figure III.3 : Situation géographique du site de prélèvement des échantillons.

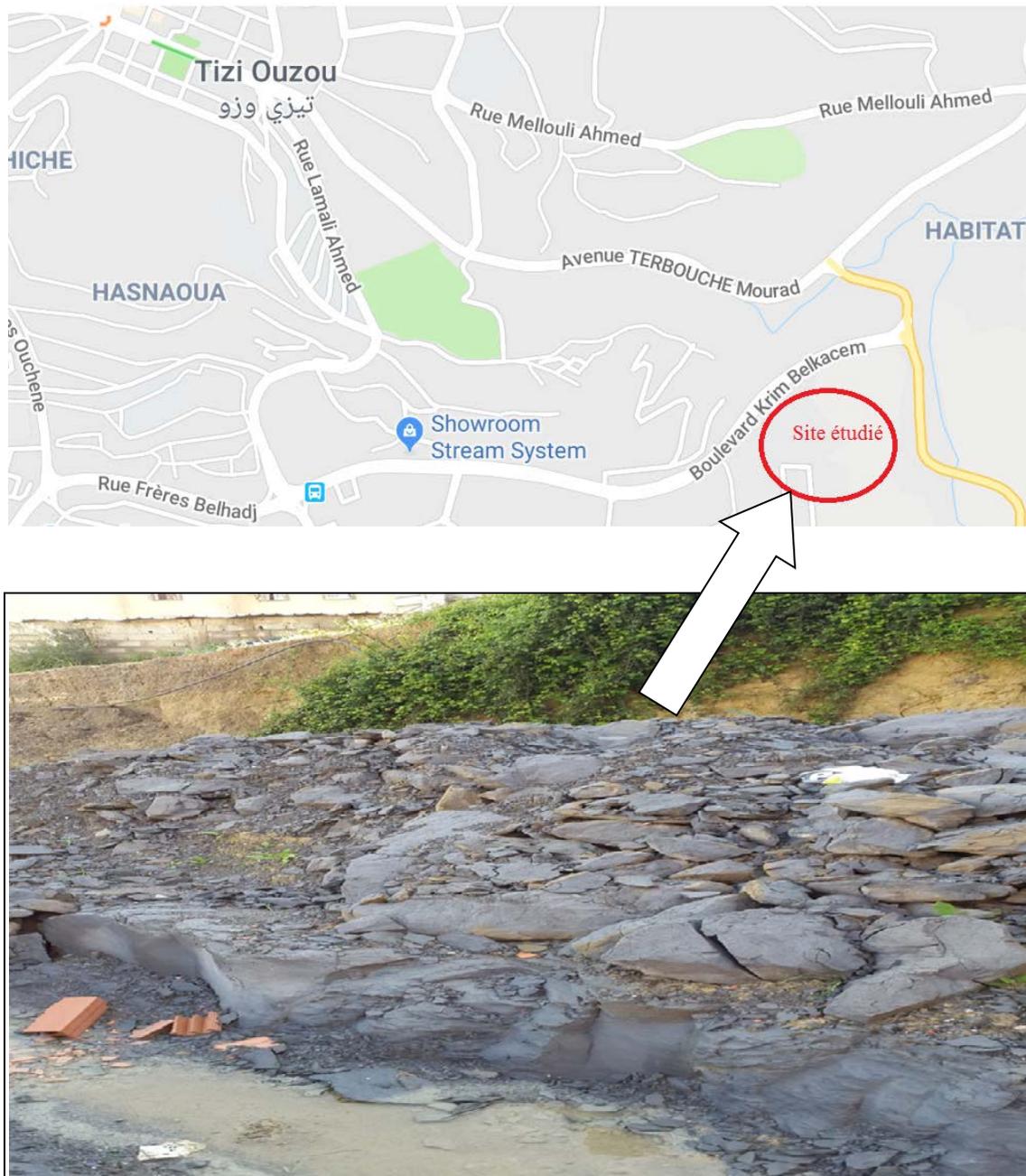


Figure III.4 : Site d'extraction du matériau (marne) à l'état rocheux.

III.2.1.5. Concassage et tamisage de la marne

La marne utilisée dans cette étude est prélevée sous forme de blocs sur le site, ensuite concassée par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée de telle sorte à former une courbe de classe granulométrique 0/20 mm, délimitée par un fuseau bien précis relatif aux corps de chaussées prescrit par la norme NF EN 13-285(2010).

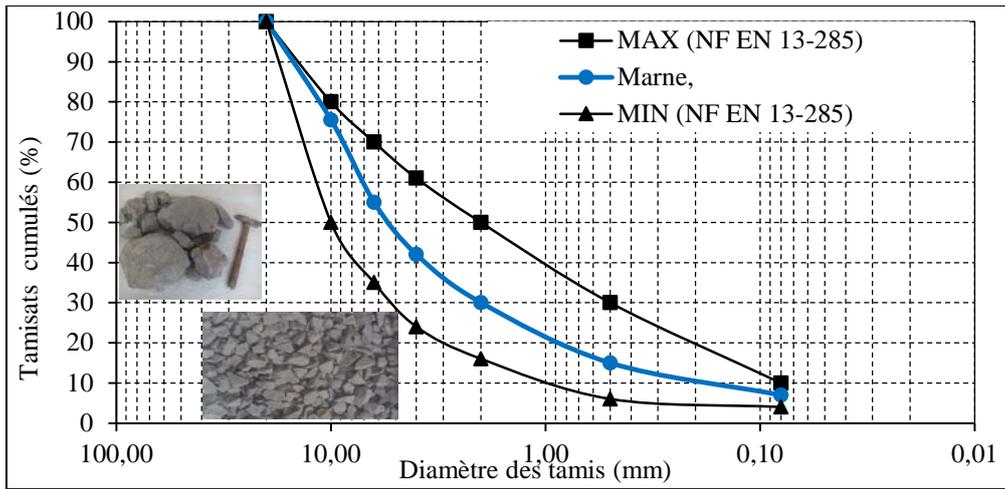


Figure III.5 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-8585(2010).



Figure III.6 : Granulats de la marne après concassage.

III.3.Essais d'identification

Après concassage manuel des blocs de marne, une étude d'identification a été réalisée au laboratoire pour déterminer ses caractéristiques physiques, chimiques et minéralogique

III.3.1.La teneur en eau naturelle (w)

La teneur en eau est déterminée selon la norme NF P94-050 (méthode par étuvage).La détermination de cette teneur 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 : $W = (M_h - M_s) / M_s$.

Tableau.III.1 : Teneurs en eau de matériaux étudiées.

Sol	Teneur en eau (W%)
Matériau marne	3.6

III.3.2. Interprétation des résultats

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

III.3.3. Masse volumique de sol

III.3.3.1. La masse volumique sèche (ρ_d) par pesée hydrostatique

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064.

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



Figure III.7 : Mode opératoire.

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

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

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/cm³ ;

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

Présentation des résultats

Le tableau ci-dessous présente les résultats des essais réalisés :

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

Échantillon				
Paramètre	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai	Moyenne
M_r	189	140	152,8	160,6
M_{rp}	193	155,2	166,4	171,53
M'_{rp}	102,2	73,11	80,85	85,38

$$\rho = 2,17$$

La masse volumique sèche après calcul est de $2,17 \text{ g/cm}^3$

Le tableau ci-dessous présente la classification des matériaux utilisés selon la masse volumique sèche

Tableau III.3 : Appréciation des matériaux en fonction de la masse volumique sèche

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

On se réfère au tableau on constate que la marne utilisé est une marne dense.

III.3.3.2.Masse volumique humide ρ_h (NF P 94 – 053)

La masse volumique humide est calculée par la loi suivante: $\rho_h = \rho_d \times (1+w)$

Avec: w: Teneur en eau du matériau ;

ρ_d : Masse volumique sèche.

L'application numérique donne : $\rho_h = 2.17 \times (1 + 0.036)$

$$\rho_h = 2.24 \text{g/cm}^3$$

III.3.3.3La masse volumique des particules solide ρ_s (méthode du pycnomètre)

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

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

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

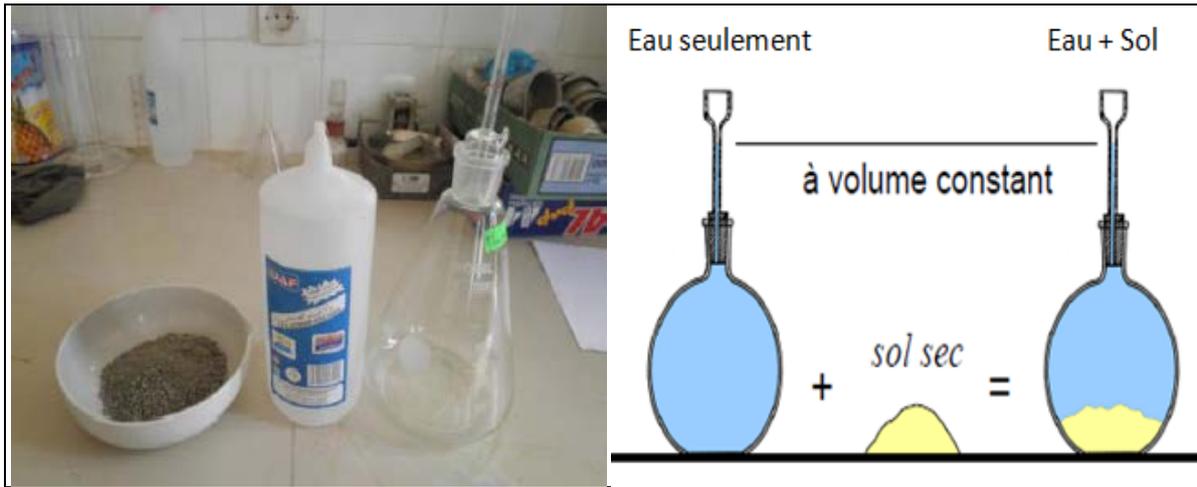


Figure III.8: Exécution de l'essai.

La masse volumique des particules solides est calculée avec la formule suivante:

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

Avec :

M1 : Masse du pycnomètre vide + bouchon;

M2 : Masse du pycnomètre + particule solide + bouchon;

M3 : Masse du pycnomètre + particule solide + eau + bouchon;

M4 : Masse du pycnomètres + eau + bouchon;

ρ_w : Masse volumique de l'eau égale à 1 (g/cm³).

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

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

M₁	202 g
M₂	227 g
M₃	762,6 g
M₄	748 g
ρ_s	2,4 g/cm ³

III.3.4.Indice des vides (e)

L'indice des vides est défini comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume des particules solides.il est défini par la relation suivante :

$$e = \frac{V_v}{V_s} ; \text{ ou bien avec la relation suivante : } e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$$

Après calcul on obtient un indice des vides égal à : **e =0.0461**

III.3.5.Le degré de saturation (Sr)

Le degré de saturation, indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides. Il s'exprime en pourcentage. Le degré de saturation peut varier de 0 % (sol sec) à 100% (sol saturé).

Il peut aussi être défini par la formule suivante:

$$S_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \times \frac{w}{e}$$

$$S_r = 18,06.$$

Tableau III.5: Interprétation des degrés de saturation établie par TERZAGHI .

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

D'après le tableau ci-dessus, nous concluons que la marne étudiée est dans un état légèrement humide.

III.3.6.La porosité

La porosité a une signification analogue à celle de l'indice des vides. Elle est le rapport du volume des vides (V_v) au volume total (V).La porosité peut s'exprimer en pourcentage au sans dimension.

$$n = \frac{V_v}{V}$$

La porosité et l'indice des vides sont liés par la formule :

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

Ce qui nous donne une porosité de 0,31.

III.3.7.Limite d'Atterberg (NF P94-051)

Les limites d'Atterberg représentent les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance, à savoir, l'état solide (sans retrait), l'état semi-solide (avec retrait), état plastique et état liquide. Ces limites, qui s'expriment en pourcentages, soit : la limite de retrait (W_s), la limite de plasticité (W_p) et la limite de liquidité (W_l).

-La limite de liquidité (W_l) : est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique (sépare l'état liquide de l'état plastique).Elle peut atteindre 1000% dans le cas de certaines argiles, mais généralement elle ne dépasse pas 100%.

-La limite de plasticité (W_p) : est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et semi-solide. A cette teneur en eau, le sol perd sa plasticité et se fissure en se déformant lorsqu'il est soumis à de faibles charges. Cette teneur en eau varie de 0% à 100%, mais elle est généralement inférieure à 40%.

La limite de retrait (W_s) : est la teneur en eau limite qui sépare l'état semi-solide de l'état solide .C'est la teneur en eau maximale que peut contenir le sol sans charge de volume.

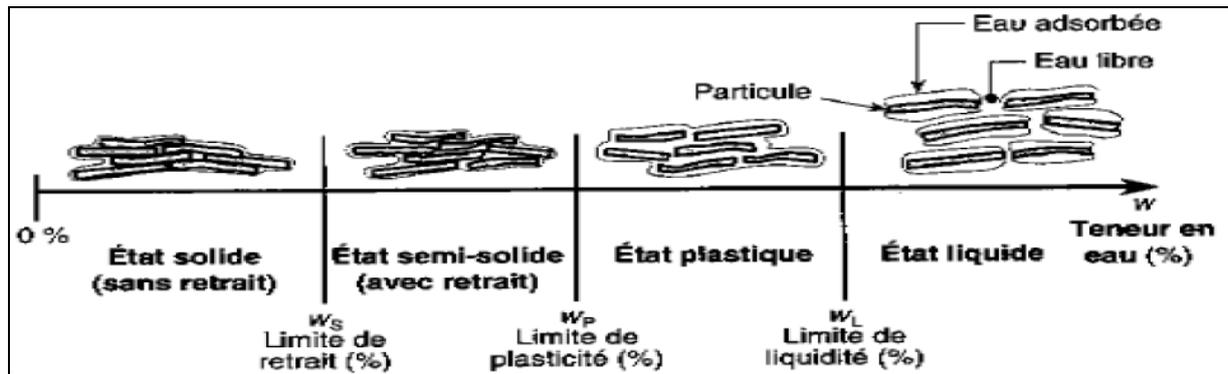


Figure III.9: Différents états de consistance (Robitaille et Tremblay , 1997) .

L'indice de plasticité I_p : représente la différence entre les limites de liquidité et de plasticité. Il définit donc l'étendue du domaine plastique.

III.3.8.Détermination de la limite de liquidité W_L

Pour déterminer la limite de liquidité, on étend sur une coupelle une couche du matériau dans laquelle on trace une rainure au rayon d'un instrument en forme de V (figure III.10). On applique à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte.

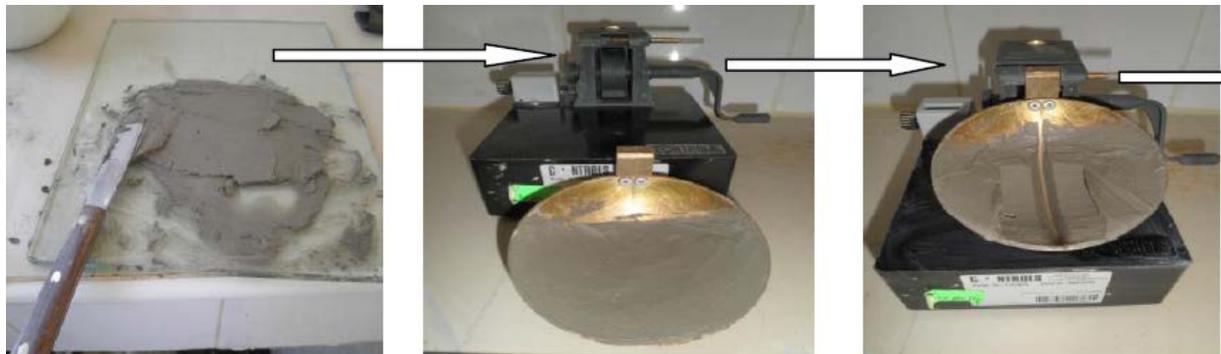


Figure III.10: Détermination de la limite de liquidité

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

Si on étudie la relation qui lie le nombre de chocs N à la teneur en eau W , on constate que la courbe représentative de cette relation est une droite en coordonnées semi-logarithmique lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35. on réalise quatre essais qui doivent s'échelonner régulièrement entre 15 et 35 ou, mieux entre 20 et 30 chocs. la droite la plus représentative est ensuite tracée à partir des points expérimentaux (figure III.11).

Pour le même intervalle des valeurs de N , la formule approchée

$$W_L = W \left(\frac{N}{25} \right)^{0.121}$$

Représente également assez bien les résultats expérimentaux. On peut donc employer avec prudence cette relation qui permet de déterminer la limite à l'aide d'une ou deux mesures seulement.

Présentation des résultats

Tableau III.6: Présentation des résultats pour la limite de liquidité .

Essai	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai	4 ^{ème} essai
Nombre de coups	19	18	30	24
Teneur en eau	38,27	40	30,3	34,45

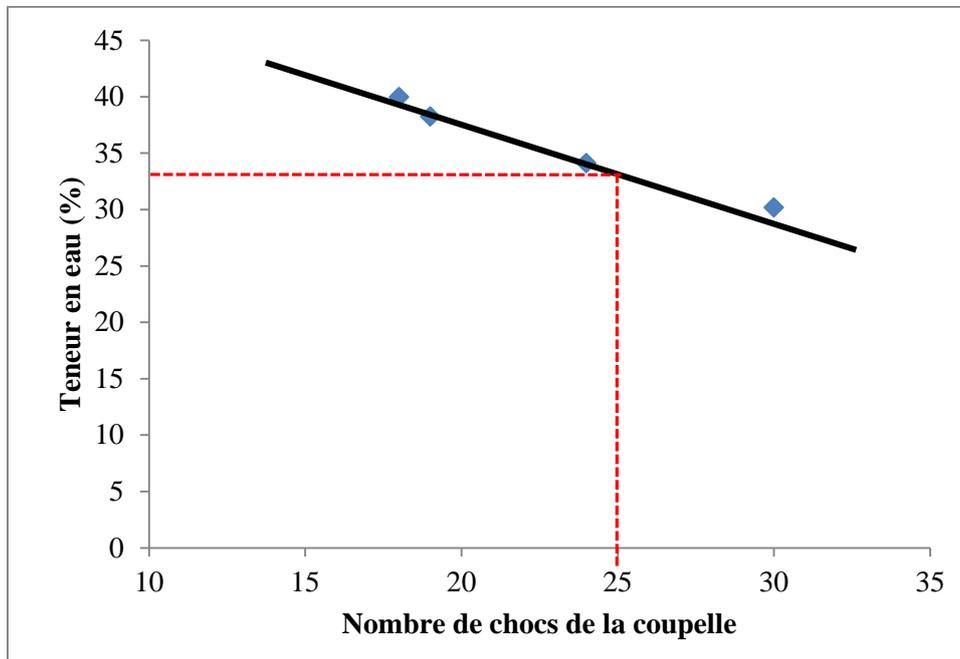


Figure III.11: Limite de liquidité

À partir de cette courbe on tire la limite de liquidité à 25 coups est égale 33%

Donc : $W_L = 33\%$

III.3.9. Détermination de la limite de plasticité W_p (NF P 94-051)

Pour déterminer limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de cylindre qu'on amincit progressivement (figure.).la limite de plasticité est la teneur en eau du cylindre qui se brise en petits tronçon de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm.il faut donc réaliser des rouleaux de 3 mm de diamètre sans pouvoir faire de rouleaux plus fin. On exécute en général deux essais pour déterminer cette limite.

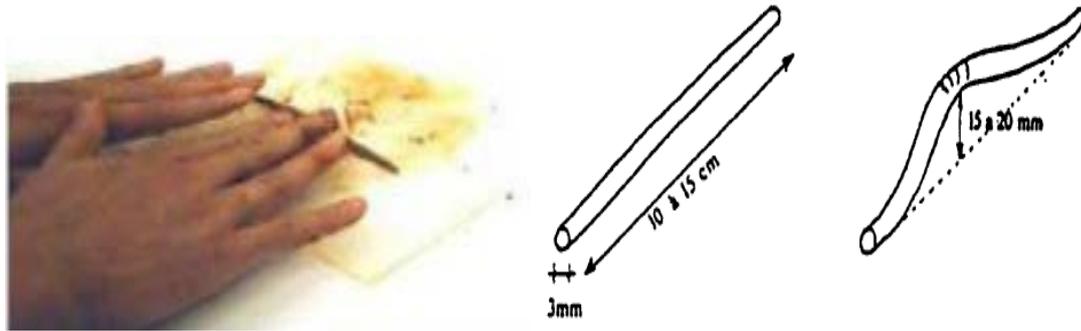


Figure III.12: Détermination de la limite de plasticité .

Ces deux limites sont d’une importance fondamentale en géotechnique car elles indiquent la sensibilité d’un sol aux modifications de sa teneur en eau.(J.Léreu ;2006)

Présentation des résultats

Tableau III.7: Présentation des résultats pour la limite de liquidité .

ESSAI	Essai 1	Essai 2
Limite de plasticité (W_p)	22,58	21,29
W_p	21,29	

III.3.10.Indice de plasticité I_p (NF P 94-051)

L’indice de plasticité, noté I_p , est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l’argilosité des sols.

Il s’exprime par la relation : $I_p = W_L - W_p$

Il mesure l’étendue du domaine de plasticité, domaine pendant lequel on peut travailler le sol .Il a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique routière ; Il est préférable qu’il soit le plus grand possible. (J.Léreu ;2006)

L’application numérique nous donne une valeur de : $I_p = 11,71$

Le GTR 92 (guide technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme septembre 1992) retient pour I_p les seuils d’argilosité suivants :



Figure III.13: Classification de sol selon GTR 1992 .

D’après la classification GTR 92 la marne est faiblement argileuse.

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

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

A partir de ce tableau on déduit que ce matériau marneux est peu plastique.

III.3.11. Analyse minéralogique

III.3.11.1. Analyse par diffraction des rayons X

L'analyse minéralogique fait appel à l'observation au microscope électronique, à l'étude par diffraction des rayons X et à l'analyse chimique. L'analyse minéralogique d'un sol est généralement un essai qui apporte beaucoup d'informations, car elle permet de déterminer la famille à laquelle appartient et leur comportement. Par exemple une forte teneur en montmorillonite indiquera un sol très sensible à l'eau pouvant donner lieu à des gonflements ou à des retraites importants. Les composants sont facilement identifiables par leurs raies caractéristiques. (Cordary, 1994)

a. Principe de la méthode

Tout corps cristallisé, peut être analysé par diffraction de rayon X car ses atomes sont organisés selon des plans cristallins spécifiques, un faisceau de rayon X est diffracté sur le réseau de plans cristallins selon « la loi de Bragg ».

b. Présentation et interprétation des résultats

La figure ci-dessous représente le diffractogramme de la marne étudiée.

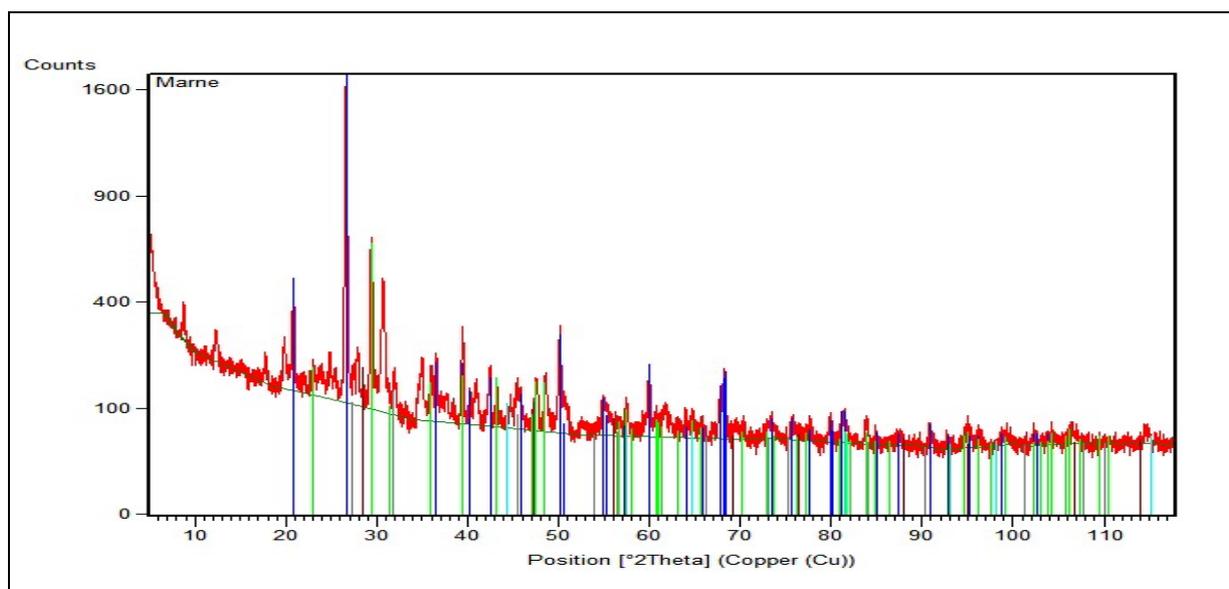


Figure III.14: Diffractogramme de la marne étudiée.

Tableau III.9: La composition chimique de la marne.

Élément	Chromium	Silicon	Sodium Chloride	Calcium Carbonate	Silicon Oxide
Quantité %	1	2	1	36,4	59,6

Tableau III.10: La description des sols en fonction de leur en CaCO₃.(Lerouil et al 1983)

Teneur en CaCO ₃ (%)	Désignation du sol
0 - 10	Argile
10 - 30	Argile marneuse
30 - 70	Marne
70 - 90	Calcaire marneux
90 - 100	Calcaire

La quantité de CaCO₃ compris entre 30 % et 70% nous déduisons à partir du tableau III.8 que le sol étudié est un sol marneux.

III.4.Laitier cristallisé

III.4.1.Présentation de laitier utilisé

Le laitier utilisée dans cette étude est récupéré sous forme de blocs sur le complexe d'El HADJAR, ensuite concassée par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée.de telle sorte à former une courbe de classe 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)

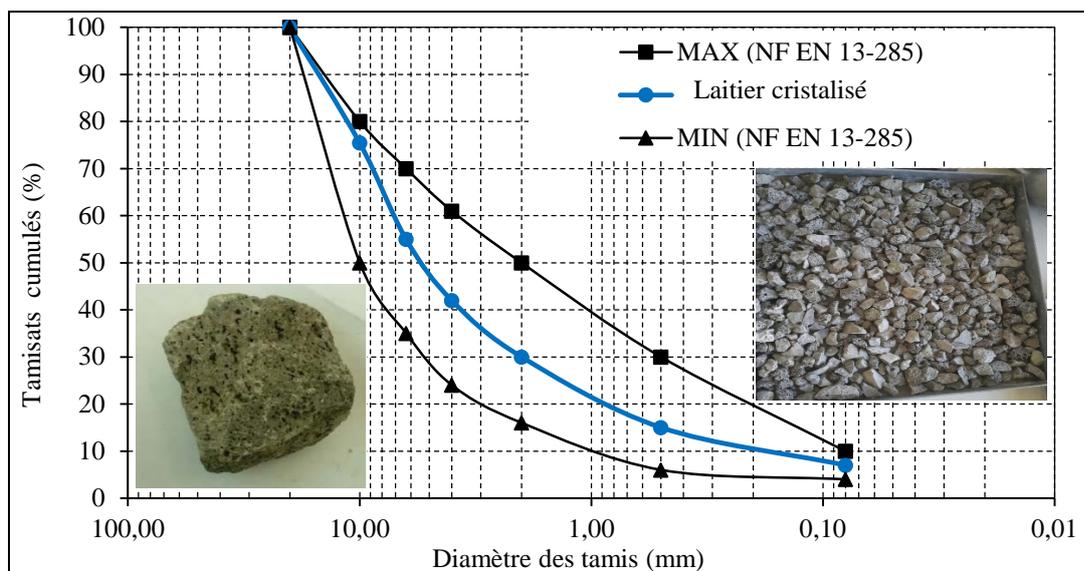


Figure III.15 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-8585(2010).

III.4.2. Propriété de laitier d'EL HEDJAR

Tableau III.11 : Caractérisation physico-chimique et mécanique du laitier selon (Charfia et al ;2009)

Masse volumique absolue (g/cm ²)	2,8
Masse volumique apparente (g/cm ²)	1,2
Porosité (%)	50
Coefficient de réactivité α	39
Micro Deval Humide MDE (%)	16
Los Angeles LA (%)	26
Coefficient d'aplatissement	18

III.5. Conclusion

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

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

CHAPITRE IV

COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

IV.1.Introduction

Dans le génie civil on peut distinguer deux principaux domaines d'application du compactage :

- Le domaine des chaussées.
- Le domaine des grands terrassements, remblai, barrages etc....

Ces domaines se distinguent par le degré d'élaboration du choix et de traitement du matériau et plus particulièrement par l'énergie de compactage mise en œuvre par unité de volume de matériau. Dans tous les cas, il s'agit, à partir d'un matériau donné d'obtenir un autre produit répondant à certaines caractéristiques ou exigences techniques et technologiques des constructions. Étant un essai qui étudie la portance des sols. L'essai CBR avant et après immersion est directement lié au compactage. C'est un essai indispensable pour tous travaux routiers, il permet le dimensionnement des chaussées.(Ialy Radio et al,1990)

Dans ce chapitre nous présenterons principalement les résultats des essais de compactage ainsi que des essais CBR avant et après immersion.

IV.2.Définition

Le compactage est l'ensemble des opérations mécaniques (apport d'énergie mécanique), qui conduisent à accroître la densité d'un sol. En faisant, la texture du sol est resserrée ce qui réduit les déformations et tassements et augmente la compacité du sol et améliore sa capacité portante. Les ouvrages couramment concernés par le compactage sont les remblais routiers, les barrages en terre et les aéroports. (Guettouche)

La densification mécanique du sol peut entraîner :

- Modification de la granulométrie ;
- Modification de la teneur en eau ;
- Réduction ou élimination des risques de tassement ;
- Augmentation de la résistance du sol et la stabilité du talus ;
- Amélioration de la capacité portante ;
- Limitation des variations de volume causées par le gel, le gonflement et le retrait.

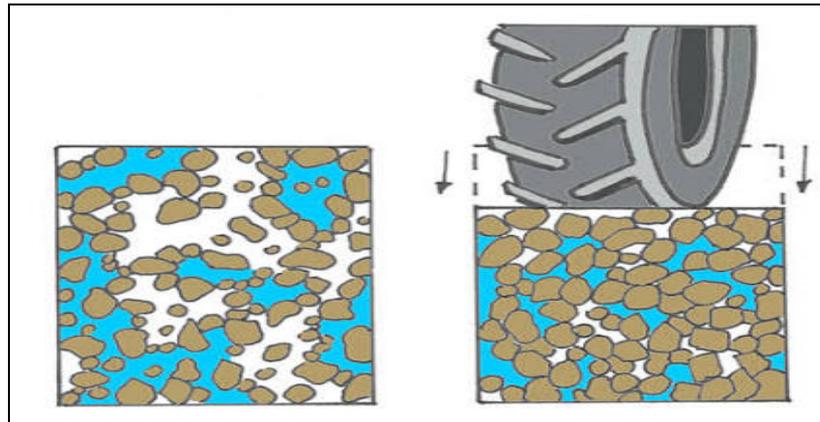


Figure IV.1 : Compactage.

IV.3.Objectif du compactage

L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation.(Degoutte, 2002).

IV.4.Condition de compactage

Pour compacter un sol, on fait agir sur lui un engin qui développe, en tout point du sol, des contraintes qui dépendent de la nature de l'engin, de ses caractéristiques, la profondeur du point considéré(Arquie, 1973).

Pour le compactage des sols, il faut le déformer d'une manière irréversible, donc le cisailer. Il faut donc exercé sur lui des contraintes qui sortent de la courbe intrinsèque du sol.

IV.5.Les facteurs qui influencent le compactage

A partir de 1930, il est devenu nécessaire de mieux comprendre le phénomène de compactage et son influence sur les propriétés du sol afin de mieux contrôler le compactage et de développer les engins de compactage. C'est à l'ingénieur américain R.PROCTOR (1933) que l'on doit les premières études. (Djedid et al ,1998).

IV.5.1.La teneur en eau (courbes de compactage)

La teneur en eau joue un rôle important dans la conduite du compactage et suivant sa valeur, on obtient des résultats plus ou moins satisfaisants pour une même dépense d'énergie. Lors d'un essai de compactage, si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation du poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau w , on obtient une courbe en cloche. Cette influence peut être expliquée par l'effet d'attraction des forces capillaires qui constitue une résistance au réarrangement des grains. Pour étudier comment la teneur en eau influe sur le compactage d'une terre, Proctor a imaginé de procéder au tassement mécanique d'un échantillon, toujours de même façon, en modifiant seulement le degré d'humidité. Ayant tamisé, puis disposé la terre par couches égales dans un cylindre de dimensions bien définies, il tasse chaque couche à l'aide d'un pilon, toujours de même poids, tombant toujours de la même hauteur, un même nombre de fois n . En faisant varier la teneur en eau. (Varlet, 1966).

En particulier si, sur un graphique (figure. IV. 2), on porte en ordonnées les valeurs de la densité apparente ρ_d et en abscisses les valeurs de la teneur en eau ω on obtient, pour un

nombre déterminé n de corps de pilon, une courbe de compactage passant par un maximum, dont l'abscisse est W_{opt} . [compactage des barrage en remblais]

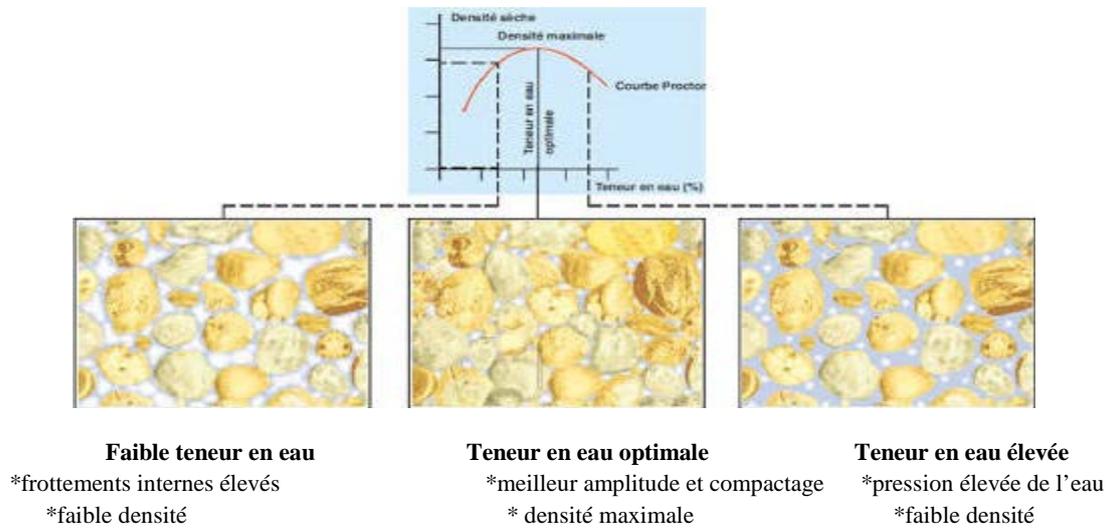


Figure IV.2 : Influence de la teneur en eau sur le compactage.

IV.5.2. Nature du sol

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

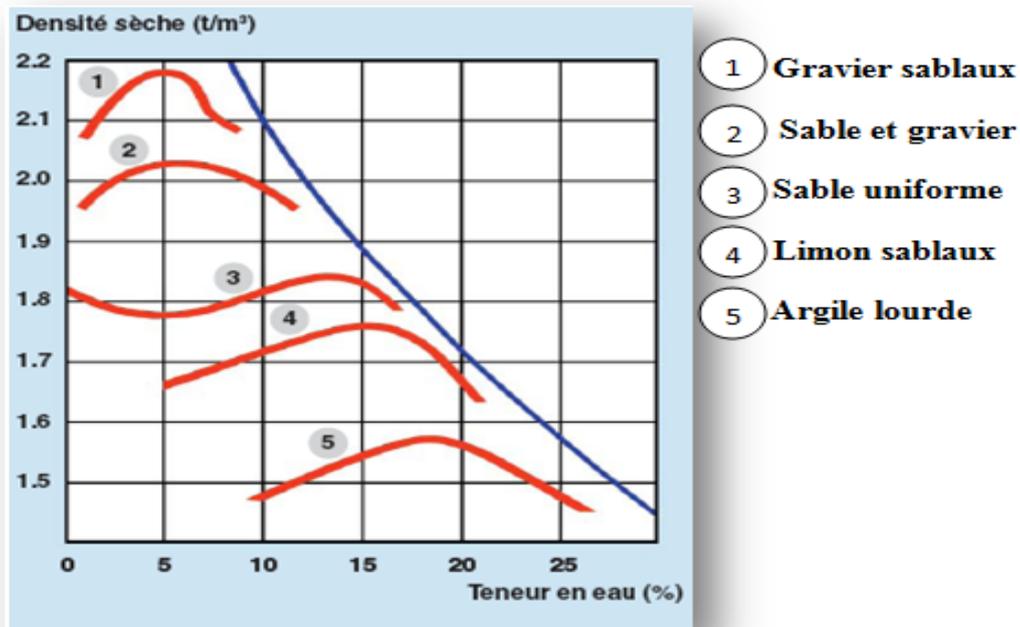


Figure IV.3 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.

On voit que les sables sont très peu sensibles à l'eau en ce qui concerne le compactage, tandis que s'ils contiennent une fraction argileuse, leur courbe s'infléchit de manière importante. On voit en effet, la courbe du compactage se déplacer vers le haut et la gauche du diagramme à mesure que le nombre de coups augmente. (R.Kazi Aoul, 2015 effet de mode de compactage)

IV.5.3. Influence de l'énergie de compactage

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

Plusieurs auteurs (Khaye et al, 1979 et Gaye, 1995) montrent que la densité sèche après compactage augmente avec la charge de la roue et la pression de gonflage. Les auteurs Martinez (1980) et Gaye (1995) remarquent que la réponse des matériaux granulaires aux sollicitations cycliques qui n'atteignent pas les charges de rupture peut être de trois types :

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

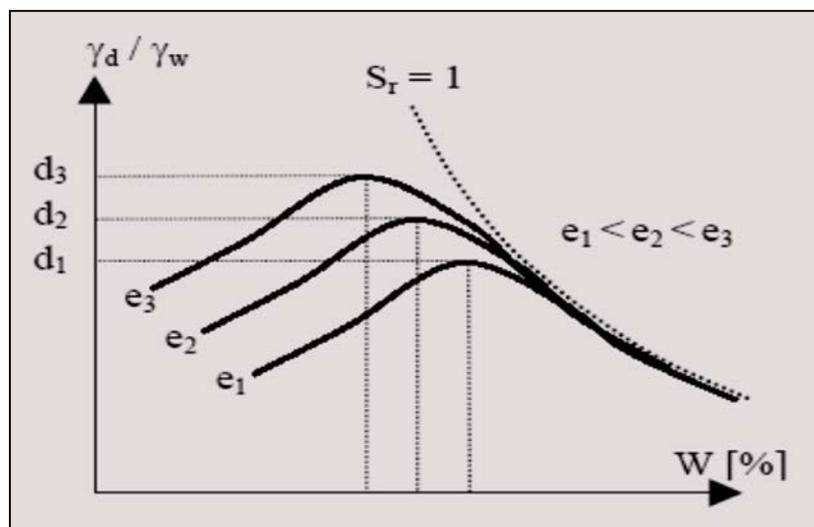


Figure IV.4 : Influence de l'énergie de compactage

IV.6.1. Propriétés des courbes de compactage

Partons d'une terre absolument sèche dans la nature, les terres possèdent, au départ, une certaine teneur en eau, de structure bien déterminée, caractérisée par une densité ρ_{do} ; l'ajout de l'eau permettra de suivre les propriétés de la courbe de compactage. (H.VARRLET, 1966).

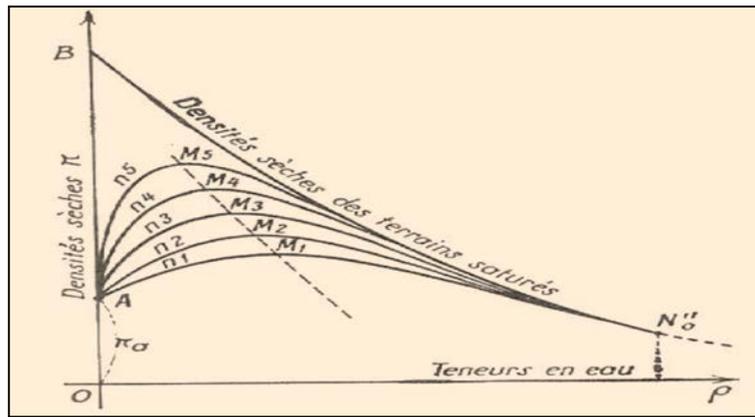


Figure IV.5 : Courbe de compactage (disposition théorique) (H.VARLET, 1966)

Toute courbe de compactage, obtenue avec une même énergie de compactage partira du point A (ρ_{d0}), d'après les essais de Proctor, que la courbe passera d'abord par un maximum M, puis ira en décroissant. Or, dans sa partie descendante elle ne pourra que venir se raccorder à la courbe des densités sèches de saturation, puisqu'on augmentant la teneur en eau on atteint fatalement cet état limite. Il en résulte que toutes les courbes de compactage partiront d'un même point A, auront un maximum M, d'autant plus élevé évidemment que l'énergie de compactage sera plus forte, et admettront une même branche descendante (courbe des densités sèches de saturation) pour les fortes teneurs en eau.

IV.6.2. Teneur en eau optimal

La teneur en eau joue un rôle important dans la conduite du compactage et suivant sa valeur, on obtient des résultats plus ou moins satisfaisants pour une même dépense d'énergie. Lors d'un essai de compactage, si l'on fait varier la teneur en eau de l'échantillon et que l'on représente graphiquement la variation du poids volumique sec γ_d en fonction de la teneur en eau ω (w), on obtient une courbe en cloche. Cette influence peut être expliquée par l'effet d'attraction des forces capillaires qui constitue une résistance au réarrangement des grains. Pour étudier comment la teneur en eau influe sur le compactage d'une terre, Proctor a imaginé de procéder au tassement mécanique d'un échantillon, toujours de même façon, en modifiant seulement degré d'humidité. Ayant tamisé, puis disposé la terre par couches égales dans un cylindre de dimensions bien définies, il tasse chaque couche à l'aide d'un pilon, toujours de même poids, tombant toujours de la même hauteur, un même nombre de fois n. En faisant varier la teneur en eau.. (Varlet, 1966).

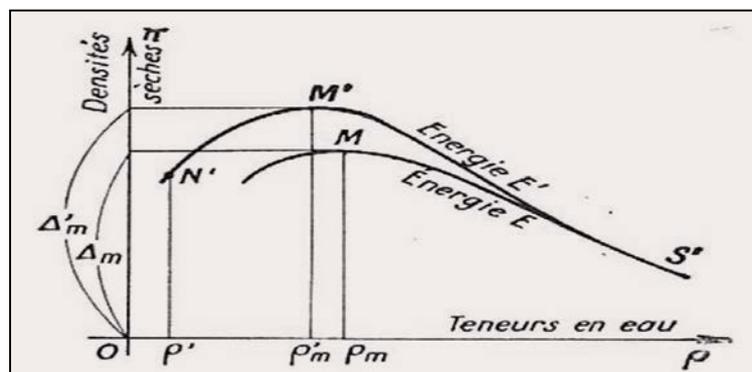


Figure IV.6 : Variation de la densité optimale en fonction de la teneur en eau optimale (H.VARLET, 1966).

IV.7. Le contrôle de compactage sur le chantier

L'étude au laboratoire permet de déterminer la teneur en eau optimale à laquelle il faut compacter le sol pour l'amener à sa densité sèche maximale. Il faut donc pouvoir contrôler si sur chantier on arrive à obtenir les valeurs recherchées. La teneur en eau est contrôlée en prélevant plusieurs échantillons à différents endroits et les passer à l'étuve.

La difficulté réside dans la détermination du volume de l'échantillon prélevé. Il faut contrôler la teneur en eau des remblais qui arrivent sur chantier.

- Si $W_n = W_{opt}$, le compactage est effectué
- Si $W_n < W_{opt}$, le sol doit être arrosé avant compactage jusqu'à atteindre w_{opt}
- Si $W_n > W_{opt}$, le sol doit être aéré pour sécher. En cas de mauvais temps, le compacter superficiellement afin d'empêcher l'eau de pluies de s'infiltrer pour l'aérer lorsque le beau temps est de retour.

IV.8. Les essais de compactage au laboratoire

Les essais de compactage effectués en laboratoire permettent de déterminer la masse volumique sèche maximale pour une énergie de compactage donnée. (Robitaille et Tremblay, 1997).

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

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

IV.8.1. L'essai Proctor

L'essai Proctor (normal ou modifié) est un essai de compactage dynamique, caractérisant la compactibilité des matériaux.

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

IV.8.1.1. Principe de l'essai

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

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe (γ_d/γ_w , w), on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale. (J.LERAU, 2006)

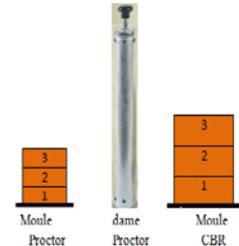
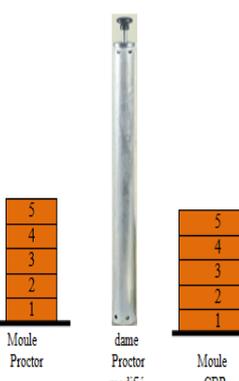
A-L'essai Proctor Normal (PN)

L'énergie de compactage dans ce cas est relativement faible et correspond à un compactage modéré. On fait référence au Proctor Normal pour l'étude des sols de type remblai non ou peu chargé. Le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs.

B-L'essai Proctor Modifié (PM)

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

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

Nature de l'essai	Caractéristique de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de dame	2490 g	2490g	3 couche, à raison de : 25 coups par couche 56 coups par couche 
	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 dame	2490 g	2490g	5 couche, à raison de : 25 coups Par couche 56 coups par couche 
	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	

a) Le moule Proctor : 10,2 cm de diamètre et 11,7 cm de hauteur (plus un collier mobile permettant de compacter jusque 13 ou 14 cm). Ce moule est utilisé pour les sols de granulométrie ≤ 5 mm. On compacte environ 3 kg de sol environ.

b) Le moule C.B.R.: 15,2 cm de diamètre et 15,2 cm de hauteur. Convient pour des sols contenant des éléments > 5 mm. Si le sol contient des éléments > 20 mm ceux-ci sont remplacés, à poids égal, par des éléments de 5 à 20mm. L'échantillon est d'un poids de 6 kg environ dans ce cas.

Dans chacun de ces moules, on peut effectuer les deux types d'essai Proctor normal et modifié (le choix du type d'essai se fait par rapport à l'énergie de compactage à appliquer).

Dans cette étude, nous avons réalisé les essais de compactage au Proctor modifié prescrit par la norme NF P 94-093, vu que les matériaux étudiés sont destinés à une éventuelle utilisation dans les couches d'assises de chaussées.

IV.9.L'essai Proctor modifié

IV.9.1.Définition

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

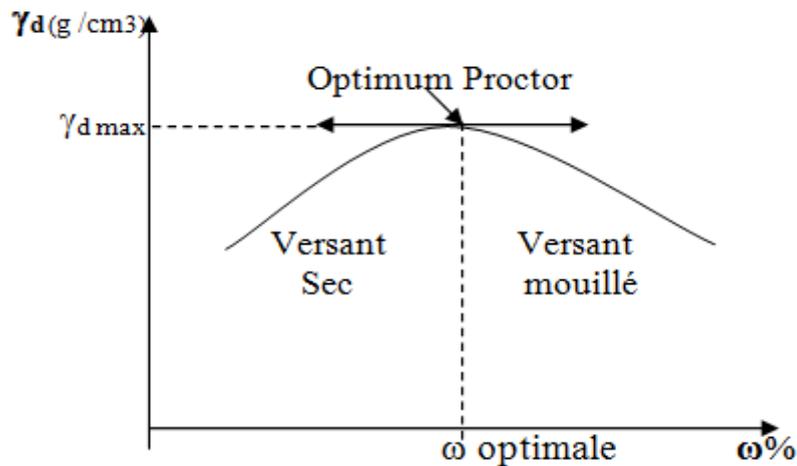


Figure IV.7 : Modèle de courbe Proctor.

IV.9.2.Principe de l'essai

L'essai consiste à soumettre des échantillons de même matériau à un compactage sous différentes teneurs en eau. Le but est de pouvoir tracer la courbe Proctor (versant sec et versant humide), à l'aide des points obtenus pour déterminer l'optimum Proctor.

IV.9.3.Matériel utilisé

Pour cet essai nous avons à notre disposition :

- Moule CBR,
- Dame Proctor Modifié,
- Règle à araser,
- Balance,
- Étuve,
- Éprouvette graduée.

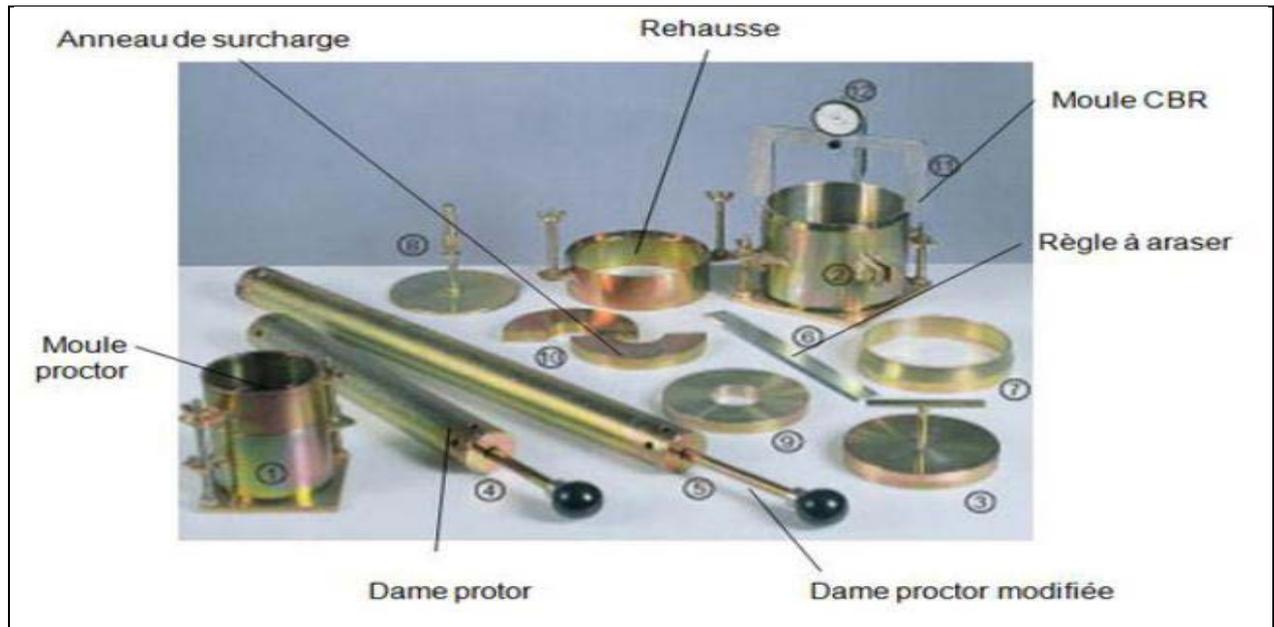


Figure IV.8 : Matériels utilisés pour l'essai Proctor modifié

IV.9.4. Mode opératoire

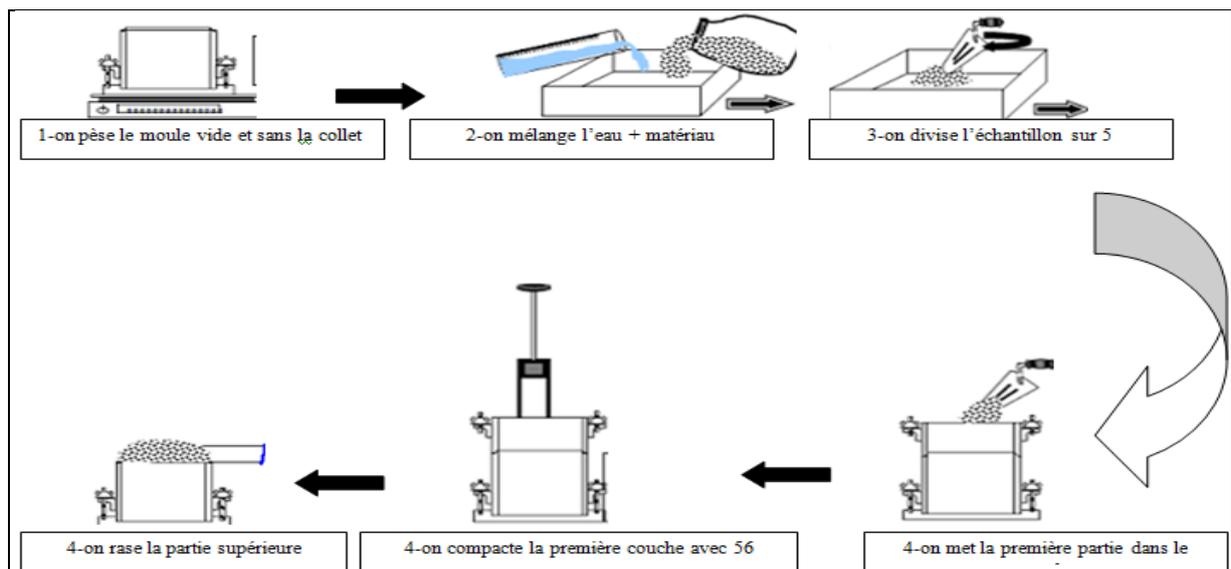


figure IV.9 : différentes étapes d'exécution de l'essai Proctor modifier

IV.9.5. Essais réalisés

Une série d'essai Proctor modifié a été réalisée dans la présente étude sur des échantillons de marne avec différentes proportions de Laitier, à savoir :

- Marne seule.
- Mélange de marne + 30% de laitier de haut fourneau;
- Mélange de marne + 50% de laitier de haut fourneau;
- Mélange de marne + 70% de laitier de haut fourneau;

IV.9.6.Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

- La teneur en eau ;
- La masse du matériau sec contenue dans le moule ;
- La masse volumique du sol humide ;
- La densité sèche ρ_d .

On portera chaque mesure de la densité sèche sur un graphe en fonction de la teneur en eau correspondante. Les résultats ainsi que les courbes obtenus sont présentés ci-dessous :

Échantillon de marne seule

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

Teneur en eau initiale(%)	Masse humide $M_h(g)$	Masse sèche $M_s(g)$	Teneur en eau $W(\%)$	Masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
4	4690	4502,88	4,15	2,12
6	4835,8	4588	5,4	2,14
8	5045	4680	7,79	2,20
10	5010	4528,80	10,6	2,13

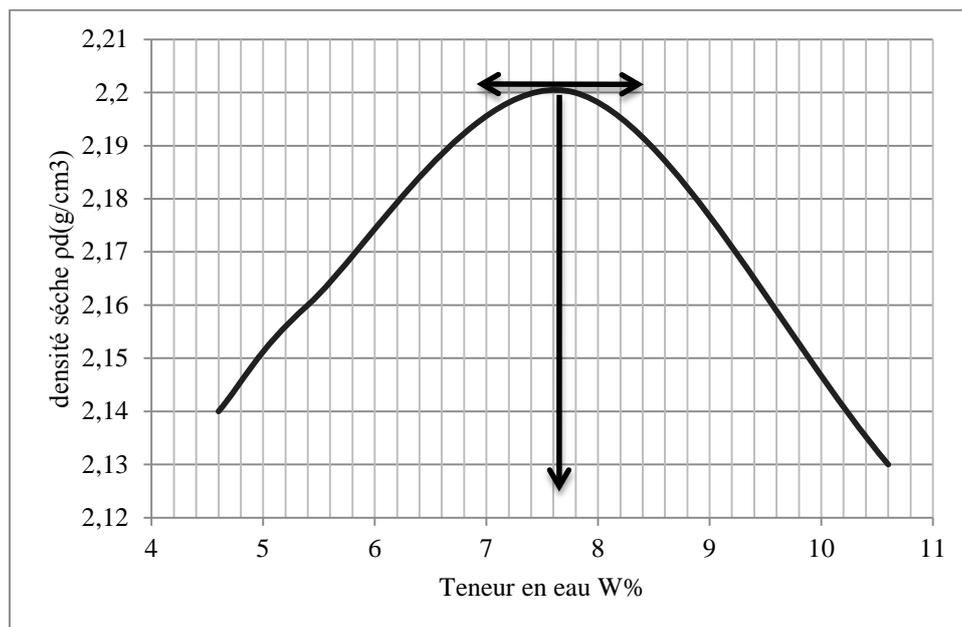


Figure IV.10 :courbe Proctor de la marne seul.

Échantillon de marne +30% de laitier

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor du matériau marne

Teneur en eau initiale(%)	Masse humide $M_h(g)$	Masse sèche $M_s(g)$	Teneur en eau $W(\%)$	Masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
6	4776,27	4545,88	6,07	2,12
7	4886,26	4566,6	7	2,15
8	5024,9	4630,32	8,22	2,18
10	4971,16	4525	9,86	2,13



Figure IV.11 : Courbe Proctor de la marne + 30% laitier

Échantillon de marne +50% laitier

Tableau IV.4: Résultats de l'essai Proctor du matériau marne +50% laitier

Teneur en eau initiale(%)	Masse humide $M_h(g)$	Masse sèche $M_s(g)$	Teneur en eau $W(\%)$	Masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
6	4644	4354,2	5,85	2,03
8	4725	4354	7,81	2,08
10	4960	4504	9,59	2,12
12	4813	4332	11,06	2,04

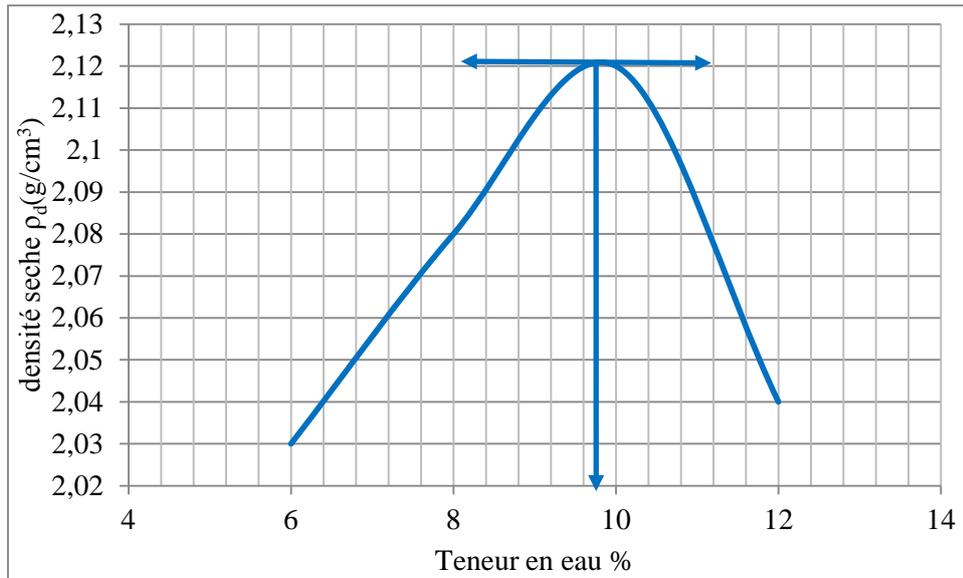


Figure IV.12 :courbe Proctor mélange marne +50% laitier.

4.Échantillon de marne + 70% laitier

Tableau IV.5 :Résultats de l'essai Proctor du matériau marne+70% laitier

Teneur en eau initiale(%)	Masse humide Mh(g)	Masse sèche Ms(g)	Teneur en eau W(%)	Masse volumique sèche ρ_d (g/cm ³)
6	4750	4400	7,4	2,071
8	4765	4411	8,2	2,076
10	4904	4431	9,62	2,086
12	4960	4421	10,8	2,081

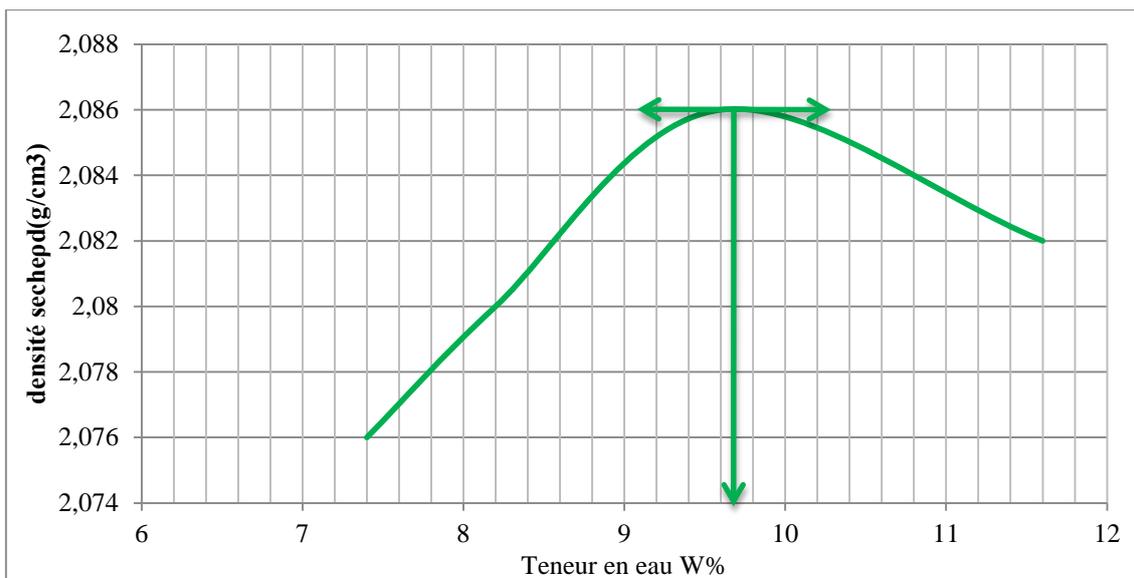


Figure IV.13 : courbe Proctor mélange marne +70% laitier.

IV.9.7. Interprétation des résultats

a. Superposition des courbes

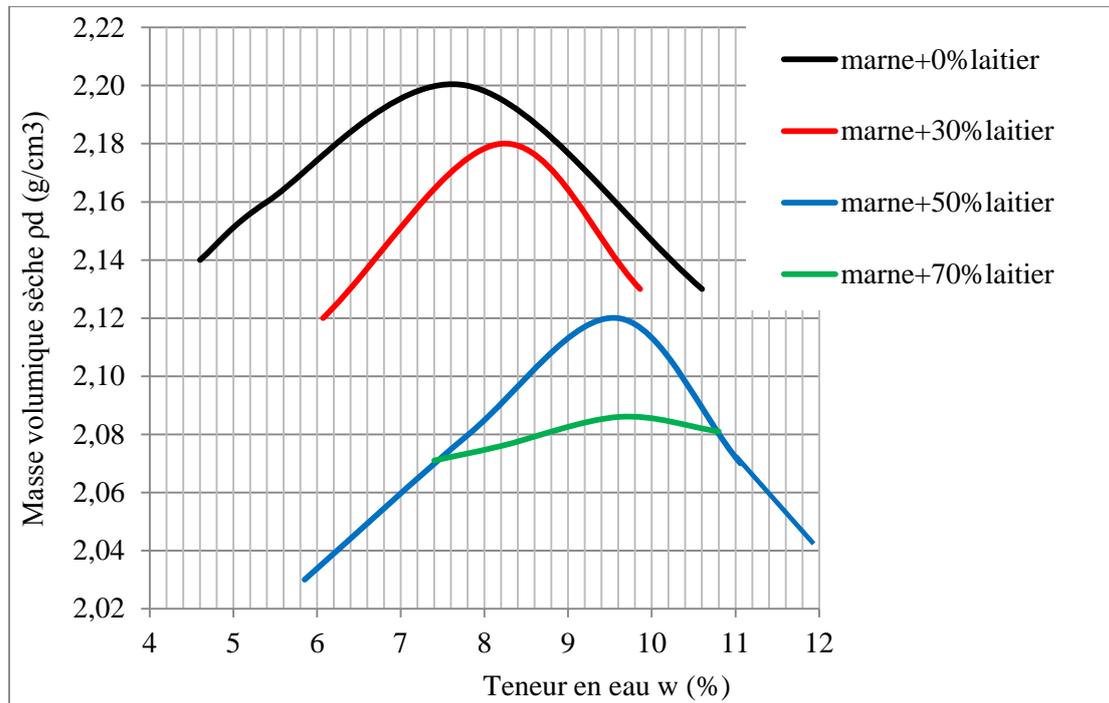


Figure IV.14 : courbe comparative des essais Proctor modifié

La sensibilité à l'eau des mélanges se traduit par des formes de courbes bombées. Selon la figure IV.14, on remarque que pour le matériau marne, la courbe de compactage présente en forme bombée remarquable, ce qui explique la sensibilité de ce matériau à l'eau, relativement aux autres mélanges.

Pour les mélanges à 30%, 50% et 70% de laitier, les courbes Proctor sont déplacées vers la droite, elles présentent une forme moins bombée avec l'ajout du laitier, ce qui traduit leur faible sensibilité à l'eau, notamment à 70% de laitier.

Tableau IV.6 : Évolution des teneurs en eau et des Masse volumiques sèche pour les différents mélanges

Échantillon	Teneur en eau W(%)	Masse volumique sèche $\rho_d(g/cm^3)$
Marne seul	7,79	2,20
Marne + 30% laitier	8,22	2,18
Marne + 50% laitier	9,59	2,12

b- Évolution de la teneur en eau des différents mélanges

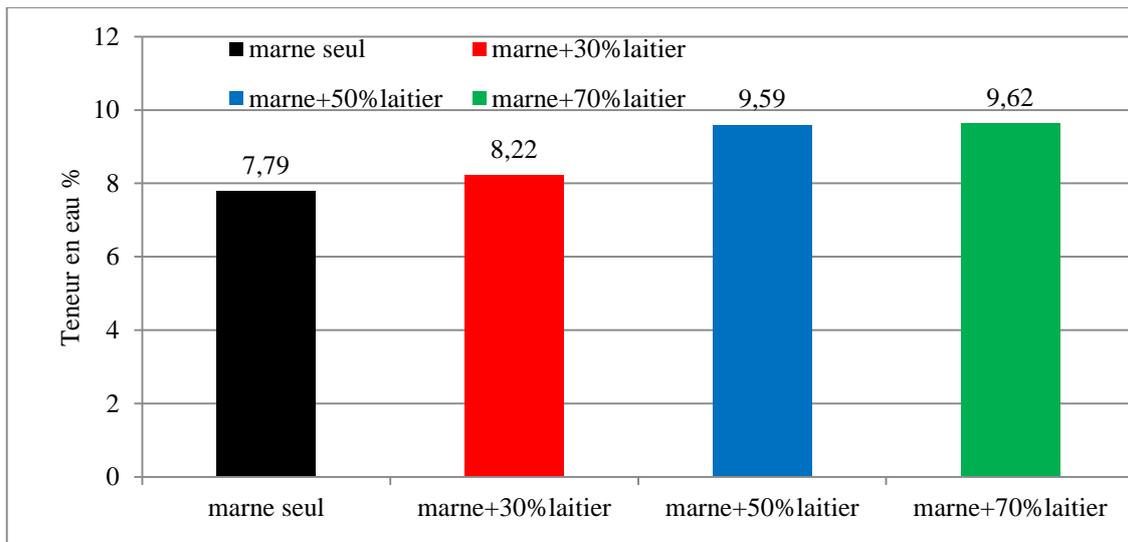


Figure IV.15 : Évolution de la teneur en eau des différents mélanges

c.Évolution des masses volumique sèches

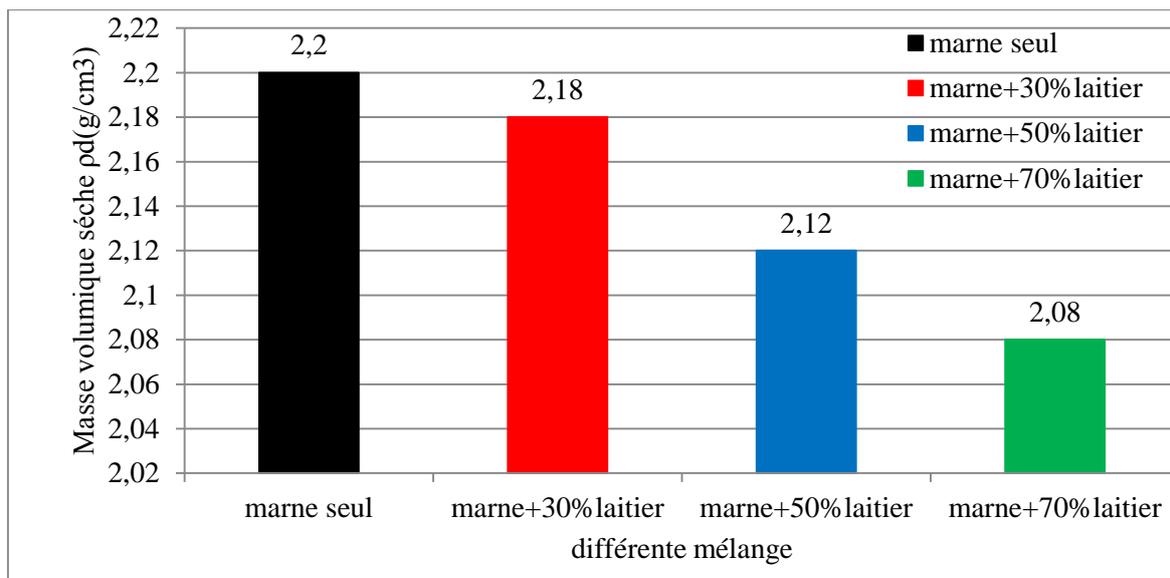


Figure IV.16 : Évolution de la masse volumique des différents mélanges.

La variation de la masse volumique sèche max et la teneur en eau optimal sont présentées sur les figures IV.15 et IV.16. Nous pouvons constater qu'un accroissement du pourcentage de laitier de 30% à 70% conduit à une diminution de la masse volumique sèche à l'optimum respectivement de 2,18 à 2,12 à 2,08 (g/cm³) ;

Par ailleurs la teneur en eau à l'OPM augmente avec le pourcentage de laitier additionnée, elle atteint sa valeur max de 9,62 % pour un pourcentage de laitier de 70%.

L'ajout des grains du laitier au matériau marne de différentes natures crée plus de vides dans les échantillons ce qui fait que leur densité diminue. Ces vides sont ensuite remplis d'eau au cours du compactage, ce qui fait augmenter la teneur en eau.

IV.10. Essai de portance Californien (California Bearing Ratio) (CBR) (NF P 94-078)

IV.10.1. Introduction

L'essai CBR est l'un des principaux essais routiers, utilisés pour le dimensionnement des chaussées, il fut entrepris à l'origine par le département des routes de l'état de Californie peu avant la 2^{ème} guerre mondiale. Le corps des ingénieurs de l'armée américaine adopta cette méthode pendant la guerre puis la développa et l'améliora. Plus tard, elle fut utilisée pratiquement par tous les pays du monde.

IV.10.2. But de l'essai

L'essai CBR a pour but, d'évaluer la portance ou la résistance au poinçonnement d'un sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées. En d'autres termes, il sert à évaluer l'aptitude des matériaux à supporter les charges verticales ayant tendance à les poinçonner. Cette caractéristique est indispensable dans les travaux routiers, en particulier pour la confection des remblais et les couches de forme, dans lesquels on admet que de faibles déformations.

L'indice CBR permet donc de :

- Établir une classification des sols GTR (Guide des terrassements routiers)
- Évaluer la traficabilité des engins de terrassement ;
- Dimensionner les couches de fondations nécessaires à la construction d'une chaussée en fonction du sol sous-jacent, du trafic et des charges par essieu et des conditions hydriques futures que subira la route (l'épaisseur des couches diminue lorsque l'indice CBR augmente).

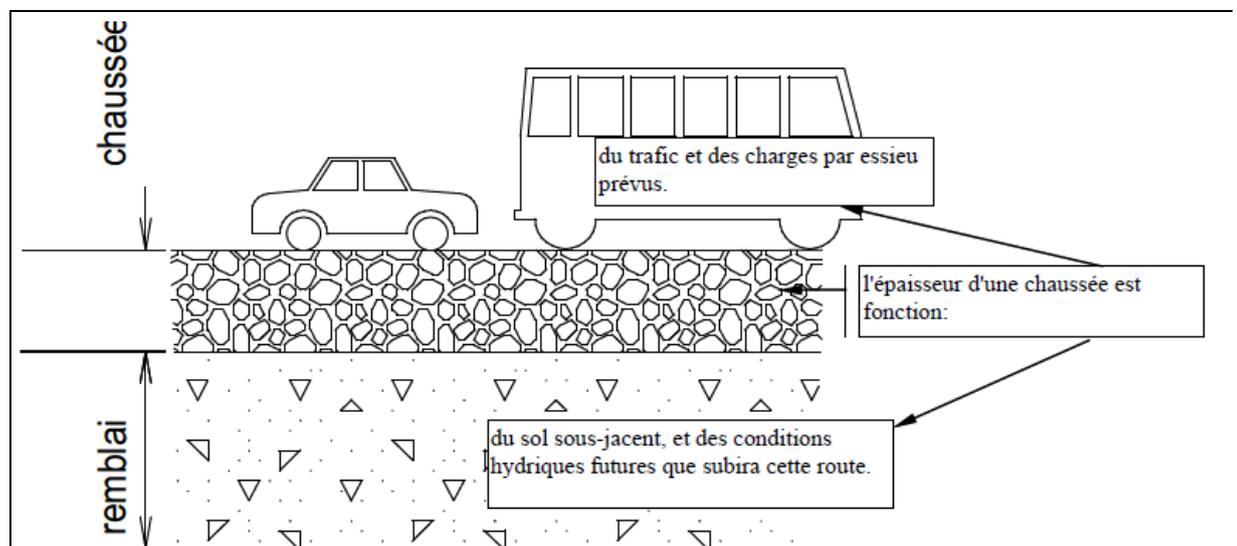


Figure IV.17 : dimensionnement de la chaussée selon le trafic.

IV.10.3. Principe de l'essai

Le matériau est compacté généralement à la teneur en eau optimale suivant les procédures de l'essai Proctor modifié dans un moule CBR compacté à 55 coups par couche (5 couches). Au cours de cet essai, l'échantillon est poinçonné par un piston normalisé de 19,35 cm² de section, enfoncé à une vitesse constante de 1,27 mm/mn. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué les enfoncements de 2,5 et 5 mm, sont alors rapportées aux valeurs 13,35 et 20 KN, qui sont les forces observées dans les mêmes conditions sur un matériau de référence.

Les essais CBR permettent de déterminer les indices CBR suivants :

-L'indice Portant Immédiat (IPI), pour évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins pendant la durée du chantier.

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

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

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

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

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

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

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

Avec :

Δh =variation de la hauteur mesurée (mm).

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

IV.10.4.Matériel utilisé

Pour la confection des éprouvettes, nous aurons besoins : d'un moule CBR, d'une dame Proctor modifiée, d'un disque d'espacement, d'une règle à araser, d'un bac, d'une éprouvette graduée, d'une balance et d'une étuve

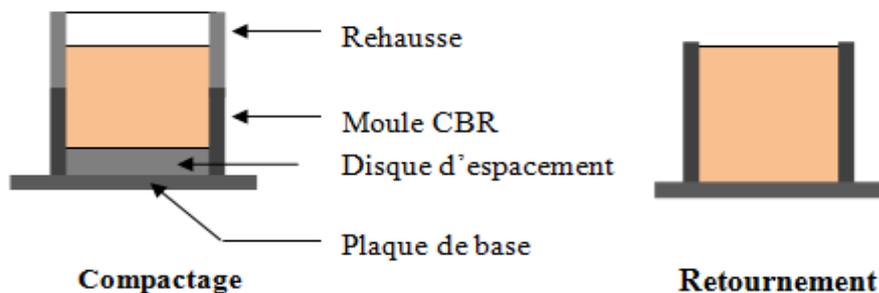


Figure IV.18 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

IV.10.5. Matériel de poinçonnement

Une presse de capacité minimale de 50 KN de 10 mm de course, équipée d'un poinçon cylindrique en acier de 19,35 cm² de section et de 10 cm de longueur. Munie de dispositifs de mesure de l'enfoncement et de l'effort de poinçonnement.

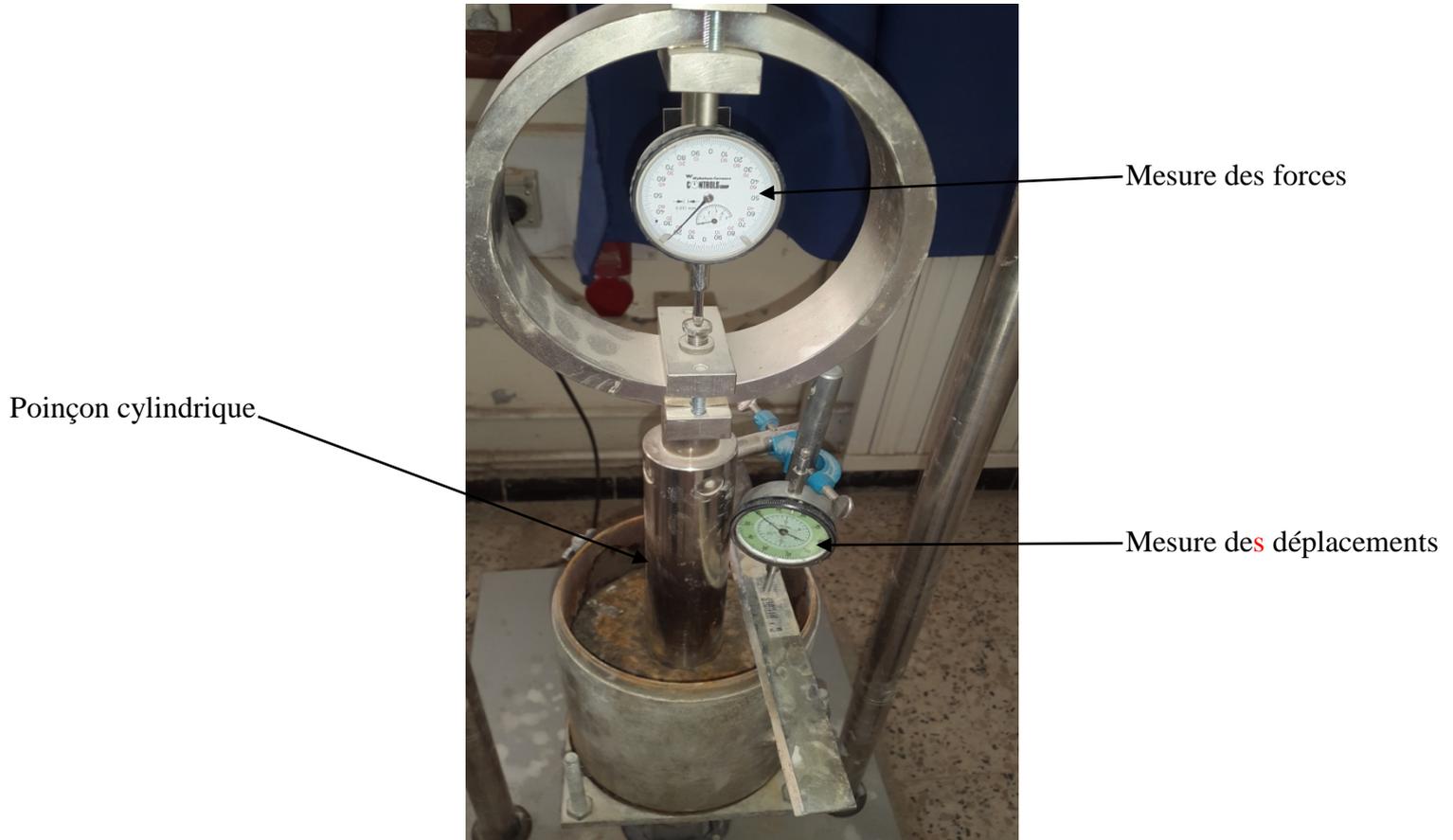


Figure IV.19 : Presse CBR.

IV.10.6. Préparation des échantillons

Les échantillons à poinçonner sont compactés dans les conditions de l'optimum, à différents teneurs en laitier de haut fourneau. Une fois préparés, nous passerons à l'étape du poinçonnement à la presse CBR.

IV.10.7. Détermination de l'indice portant immédiat (IPI)

- Placer l'ensemble « plaque de base, moule CBR, éprouvette » sur la presse, en position centrée par rapport au piston.
- Approcher la face supérieure de l'éprouvette vers le piston jusqu'à ce qu'il vienne affleurer le matériau (stopper dès que l'aiguille de l'anneau accuse un léger déplacement) ;
- Régler la mise à zéro du dispositif dynamométrique et celle du comparateur mesurant l'enfoncement du piston ;
- Exécuter le poinçonnement à vitesse constante
- Noter les efforts de poinçonnement correspondant aux enfoncements de 0,625 - 1,25 - 2 - 2,5 - 7,5 - 10 mm et arrêter le poinçonnement à cette valeur.



Figure IV.20: Éprouvette après le poinçonnement

IV.10.8.Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif)

IV.10.8.1.But de l'imbibition (immersion dans l'eau)

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

IV.10.8.2.Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement

- Bacs de hauteur suffisante pour l'immersion complète des éprouvettes ;
- disque ou plateau de gonflement perforé, réglable +papier filtre ;
- dispositif de mesure du gonflement (trépied pour comparateur).

IV.10.8.3.Mode opératoire

- Placer un papier-filtre à la surface puis disposer au- dessus le disque de gonflement et les surcharges comme indiqué précédemment ;
- Fixer le trépied support de comparateur sur le bord supérieur du moule et positionner le comparateur au centre du trépied.
- Placer l'ensemble dans le bac d'immersion de telle sorte que l'eau recouvre de 1 à 2 cm l'éprouvette ;
- Effectuer la mise à zéro du comparateur ;
- Placer l'ensemble dans le bac d'immersion de telle sorte que l'eau recouvre de 1 à 2 cm l'éprouvette ;
- Après la durée d'immersion nécessaire (4 jours), relever la mesure du gonflement (hauteur : Δh) indiquée par le comparateur. Laisser égoutter quelques minutes et enlever le trépied, les surcharge et le disque de gonflement ;
- Placer l'ensemble sur la presse, replacer les surcharges comme précédemment et procéder au poinçonnement.

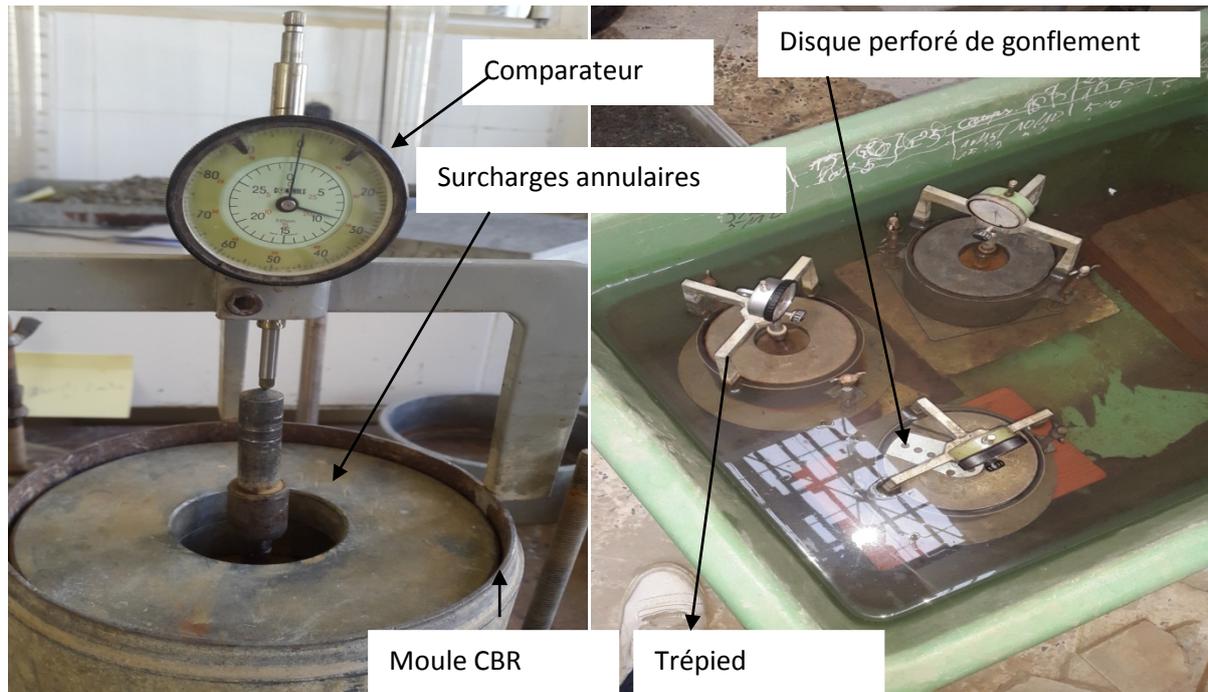


Figure IV.21 : Imbibition et gonflement (CBR après immersion)

IV.10.9.Expression des résultats

Une série d'essai CBR a été réalisée dans la présente étude sur des échantillon de marne et de laitier, afin de déterminer les indices portant immédiat (IPI) et l'indice CBR après immersion.

Plusieurs échantillons ont été préparés, à savoir :

- marne seule ;
- Mélange de marne + 30% de laitier ;
- Mélange de marne + 50% de laitier ;
- Mélange de marne + 70% de laitier.

Tableau IV.7 :Résultats d'essai CBR pour la marne + laitier.

Échantillon	Gonflement relatifs G(%)	Indice CBR immédiat (%)			Indice CBR après immersion(%)		
		I _(2,5)	I ₍₅₎	IPI	I _(2,5)	I ₍₅₎	I CBR
Marne seule	0,29	18,89	33,35	33,55	7,81	13,31	13,31
Marne+30%laitier	0,051	7,98	11,49	14,90	11,38	18,46	18,46
Marne+50%laitier	0,012	2,54	6,53	6,53	9,17	18,58	18,58
Marne+70%laitier	0,0086	1,86	5,84	5,84	24,29	30,92	30,92

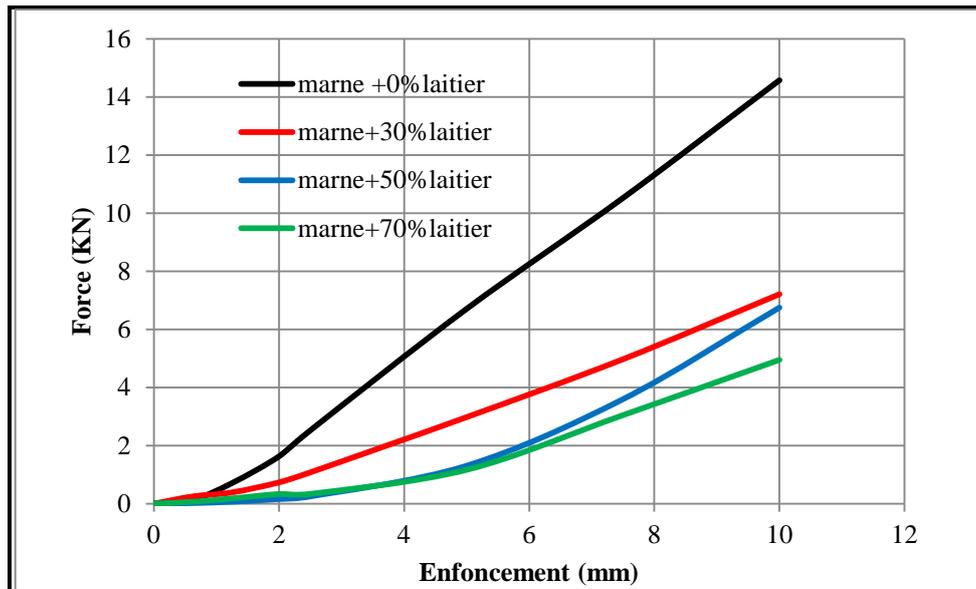


Figure IV.22 : Courbes enfoncements-forces

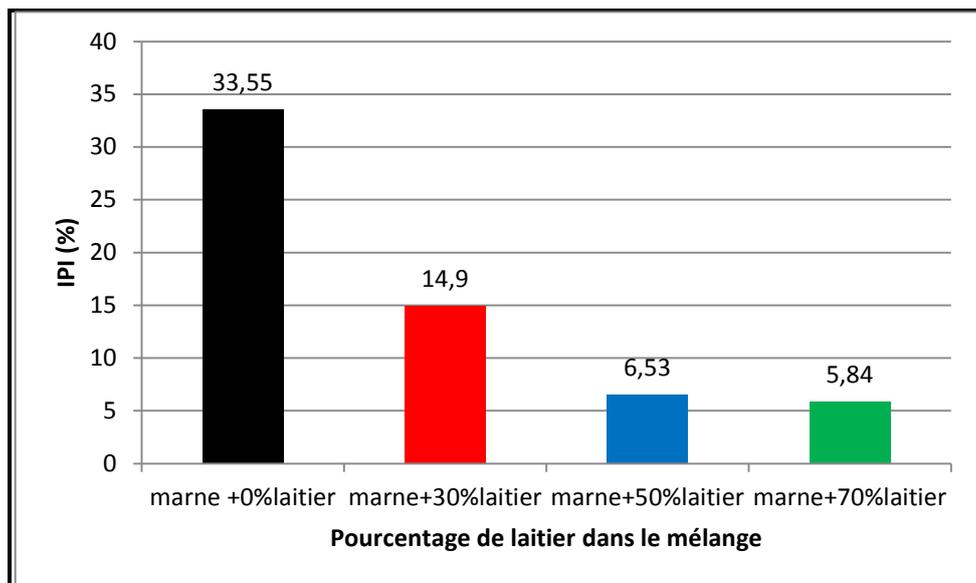


Figure IV.23 : Évolution des IPI en fonction du pourcentage du laitier (IPI, échantillons)

Les résultats des essais de portance CBR réalisés avant immersion (IPI) présentés sur les figures IV.22 et IV.23, permettent de constater à première vue que les courbes enfoncements-forces correspondantes aux mélanges (marne + laitier) se regroupent en un fuseau inférieur qui se distingue clairement de la courbe correspondante à la marne seule, ceci se traduit directement sur les portances des échantillons. En effet, la portance des mélanges diminue au fur et à mesure que le pourcentage de laitier augmente. Elle passe de 33,55 pour la marne seul à 5,84 pour le mélange à 70% de laitier. Ceci peut être dû à la grande résistance de la marne à l'état sec et la perturbation de la structure des échantillons par l'incorporation des grains de laitier diminuant ainsi la densité et la portance des mélanges.

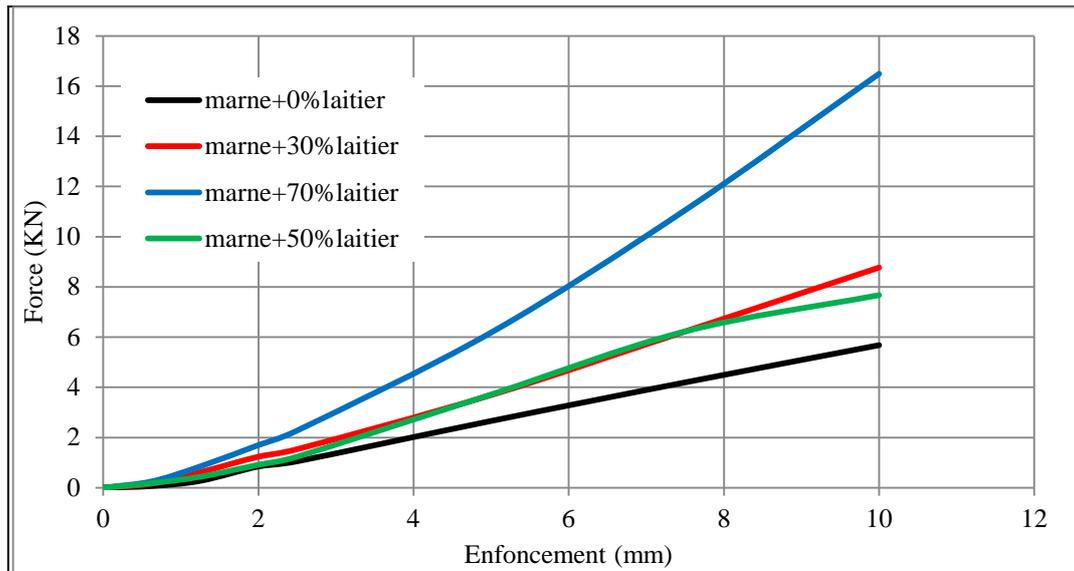


Figure IV.24 : Courbes enfoncements-forces

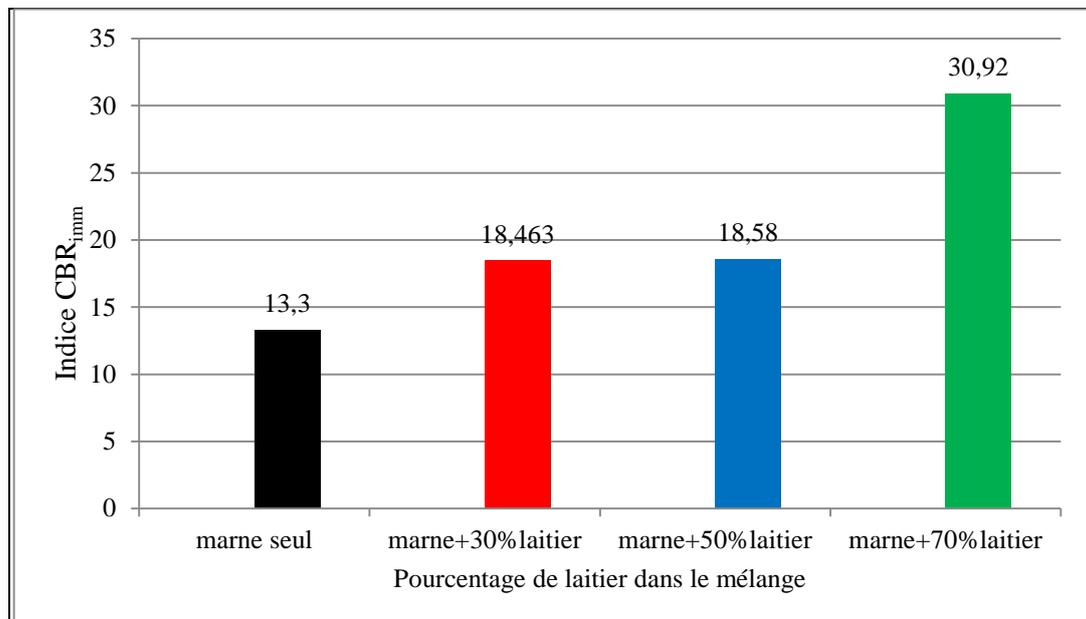


Figure IV.25 : Évolution des I CBR en fonction du pourcentage du laitier

D'après la figure IV.25 on constate que la portance des mélanges augmente au fur et à mesure que le pourcentage de laitier augmente. Elle passe de 13.3 pour la marne seul à 30,92 pour le mélange à 70% de laitier. Ceci peut être dû à la cimentation de la marne

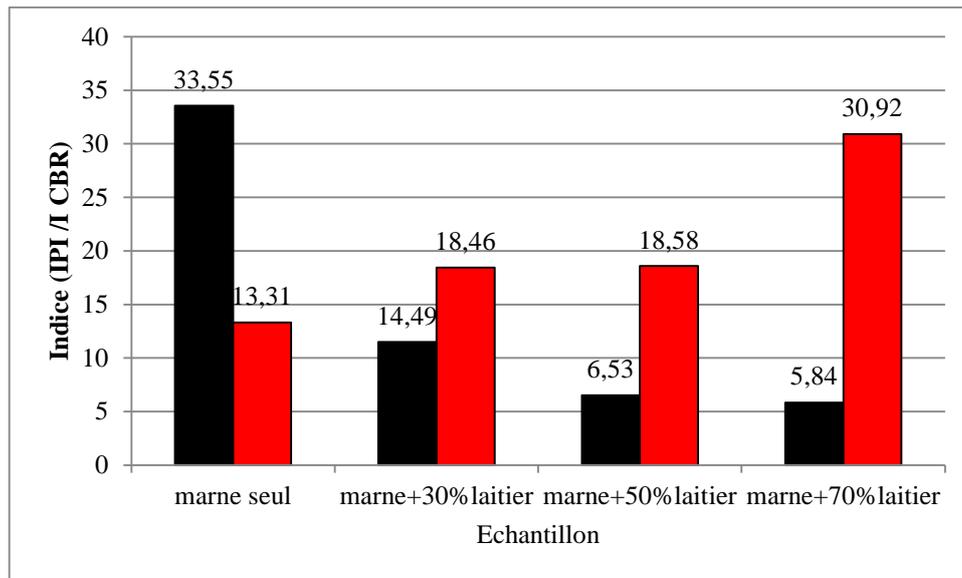


Figure IV.26: Courbes comparatives des IPI et I CBR des différents pourcentages de laitier.

A titre de comparaison, les résultats ci-dessus permettent de constater que les portances des échantillons étudiés avant immersion sont inférieures à celles développées après immersion, à l'exception du mélange à 70%.

Ainsi, nous pouvons dire que le laitier améliore la portance des mélanges et leur offre une meilleure stabilité après immersion.

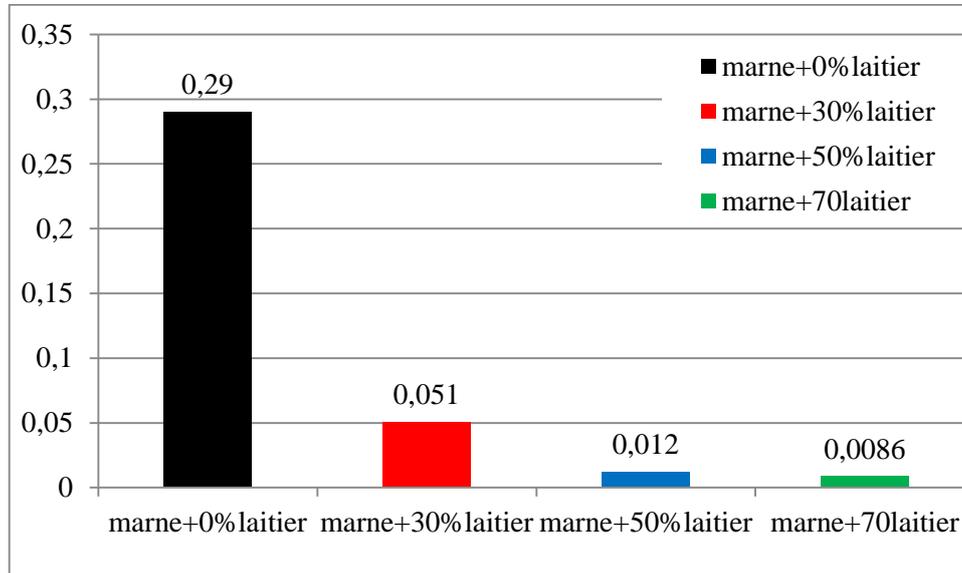


Figure IV.27: gonflement relatif des différents mélanges

La figure IV.27 présente les résultats d'essais de gonflement final après immersion. L'ajout du laitier fait diminuer de plus en plus le gonflement des mélanges en passant de 0,29 pour la marne seule à 0,0056 pour le mélange à 70% de laitier. Cette réduction de gonflement est expliquée par l'insensibilité du laitier à l'eau relativement au matériau marne. Ainsi les mélanges peuvent présenter une meilleure stabilité à l'état humide.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats obtenus aux essais de compactage Proctor et aux essais de portance CBR. En se basant particulièrement sur ces résultats, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés (mélange de marne + laitier) ont présenté dans certains cas des comportements très intéressants, particulièrement pour des teneurs en laitier au voisinage de 70 %. De tels mélanges peuvent être proposés pour une utilisation en couches inférieures de chaussées (couches de fondations et couches de base) de faible à moyen trafic, à condition d'obtenir des résultats acceptables sous d'autres essais routiers exerçant d'autres types de sollicitations. Certains de ces essais feront l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE V

ESSAIS MICRO DEVAL, LOS ANGELES, DEGRADABILITE ET FRAGMENTABILITE

V.1.Introduction

Certaines caractéristiques mécaniques des granulats ne sont déterminées par les différents essais mécaniques cités précédemment .Il existe par contre, d'autre essais permettant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages bien spécifiques, à titre d'exemple le degré d'usure, de fragmentabilité, de dégradabilité...etc. ; pour les granulats utilisés dans les couche de chaussées.

V.2.Essai Micro Deval (NF P18-572)

V.2.1.Définition

L'essai consiste à mesurer l'usure dans un broyeur, par frottements entre les granulats et une charge abrasive. Selon la norme P 18-572, il s'applique aux granulats naturels et artificiels utilisés dans le domaine routier, et le coefficient micro dévale (MDE) est un critère de classification des sols granulaires et matériaux rocheux. Plus le pourcentage d'usure est faible, plus l'échantillon est résistant à l'usure.



Figure V.1.Appareillage Micro Deval.

V.2.2.But de l'essai

L'essai consiste à mesurer la résistance à l'usure des granulats les plus usuels en technique routière.

V.2.3.Mode opératoire

- Mettre dans le cylindre 500g de notre matériau d'une fraction de : 6-6.3; 6.3-10; ou de 10-14;
- Ajouter les poids de la charge abrasive selon le type de classe granulaire;
- Complete avec 2.5 litres d'eau ;
- Régler la machine à 1200 tours.



Figure V.2 : Mise en place des granulats pour l'essai.

Une fois la rotation terminée, le contenu du cylindre est vidé sur un tamis de 1,6 mm
Le coefficient M_{DE} est calculé comme suit :

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

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.1 : Charge abrasives en fonction de la classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive
04-6,3	2000±5
6,3-10	4000±5
10-14	5000±5

Nous avons choisi dans notre cas la classe granulaire 04-6.3, avec une masse de charge abrasive de 2000g.

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

Tableau V.2 : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval

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

V.2.4. Matériaux utilisés

Nous avons réalisé quatre essais Micro Deval sur la classe 4 - 6,3 à savoir ;

- Marne seule ;
- Marne +30%laitier ;
- Marne +50%laitier ;
- Marne +70%laitier.

V.2.5. Résultats et interprétation

- Marne seul
$$MDE = \frac{500-0}{500} \times 100$$

Tableau V.3 : Calcul du coefficient Micro Deval

M(g)	M'(g)	MDE
500	0	100

- Marne +30%laitier
$$MDE = \frac{500-118}{500} \times 100$$

Tableau V.4 : Calcul du coefficient Micro Deval

M(g)	M'(g)	MDE
500	118	76,4

- Marne +50%laitier
$$MDE = \frac{500-176}{500} \times 100$$

Tableau V.5 : Calcul du coefficient Micro Deval

M(g)	M'(g)	MDE
500	227	54,6

- **Marne +70%laitier** $MDE = \frac{500-200}{500} \times 100$

Tableau V.6 : Calcul du coefficient Micro Deval

M(g)	M'(g)	MDE
500	317	36,6

Interprétation des résultats

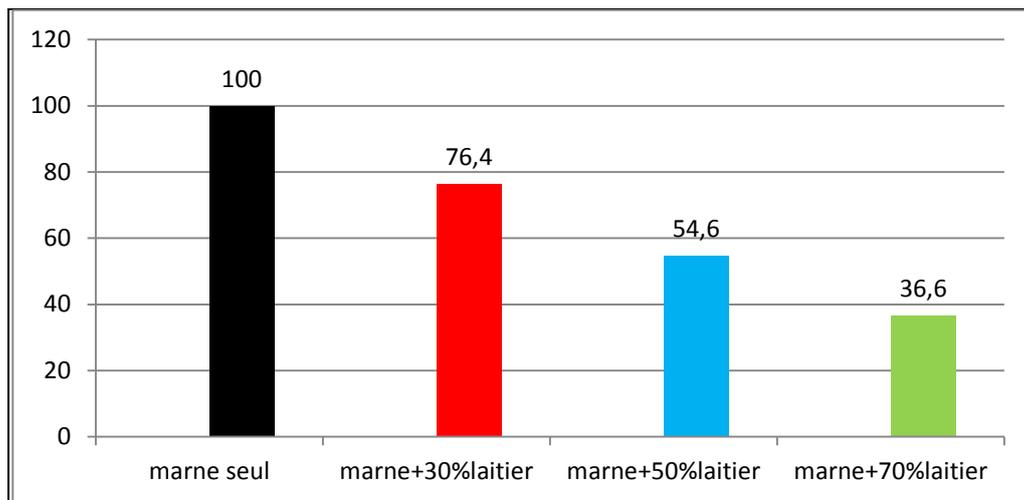


Figure V.3 : Courbe comparative des essais Micro Deval (marne seule et avec laitier).

Les résultats présentés sur la figure V.3 permettent de constater que la marne seule présente un coefficient M_{DE} supérieure à 35, ce qui signifie que nous sommes en présence d'un matériau médiocre. Ainsi, ce type de sols présente de faibles résistances à l'usure en présence d'eau. Par contre, les granulats de la marne + 70% de laitier présente une meilleure résistance à l'usure avec un coefficient M_{DE} au voisinage de 35, ce qui permet de classer le mélange dans la catégorie des matériaux de faible à moyenne résistance à l'usure. Ainsi, sont utilisation dans certaines couches de chaussées notamment à faible peut être envisagée.

V.3. Essai Los Angles (NF P18-573)

La mesure de la résistance à la fragmentation par choc est destinée à évaluer l'aptitude des granulats à se fragmenter sous l'action du trafic. Seul l'essai Los Angeles est pris en compte pour la définition des catégories de résistance mécanique normalisées.

V.3.1. But de l'essai

L'essai permet de mesurer les résistances à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des granulats utilisés dans les différentes couches d'une chaussée.

V.3.2 : Principe de la méthode

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments <1.6mm (tamis) produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

Si M : La masse de matériau soumis à l'essai , M' la masse des élément $<1.6\text{mm}$ produits au cours de l'essai ,la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements s'exprime par :

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

V.3.3.Appareillage

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

- Une série des tamis (1.6 ; 4 ;6.3 ;10 ;14 ;16 ;20 ;25 ;40et 50mm) ;
- Machine Los Angles ;
- Boulets en acier
- Bac
- Balance de précision ;
- Étuve.

V.3.4 : Exécution de l'essai

Après avoir lavé et tamiser les fractions 4/6,3 mm –6,3/10 mm –10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm. On prélève une quantité de 5000 (g) en rajoutant la masse de boulets indiquée dans le tableau ci-dessous.

Tableau V.7 :Charge de boulet suivant le type de classe granulaire

Classe granulaire Mm	Nombre de boulets
4-6.3	7
6.3-10	9
10-14	11

Pour l'essai réalisé dans cette étude, nous avons choisi la classe 10 -14 mm, nous avons donc ajouté en plus des 5000 g de marne, 11 boulets comme indiqué dans le tableau V.5. L'essai est mis en route en exécutant à la machine 500 rotations à une vitesse comprise entre 30 et 35 tr/min.



Figure V.4 :Mise en place des granulats pour l'essai Los Angeles

Une fois l'essai terminé, on reprend l'échantillon en faisant attention à ce qu'il n'y ait pas de perte ;

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



Figure V.5 :Lavage de matériau

V.3.5 : Matériaux utilisés

Nous avons réalisé quatre essais Los Angeles sur la classe 10-14 a savoir ;

- Marne seule ;
- Marne +30%laitier
- Marne +50%laitier
- Marne +70%laitier

V.3.6 : Résultats et interprétation

- **Marne seule**

$$LA = \frac{5000 - 2496}{5000} \times 100$$

Tableau V.8 : Calcul du coefficient Los-Angeles (marne+0% laitier)

M(g)	M'(g)	LA
5000	2496	50,08

- **Marne +30%laitier**

$$LA = \frac{5000 - 118}{5000} \times 100$$

Tableau V.9 : Calcul du coefficient Los-Angeles (marne+30%laitier)

M(g)	M'(g)	LA
5000	2675	46,5

- **Marne +50%laitier**

$$LA = \frac{5000 - 176}{5000} \times 100$$

Tableau V.10 : Calcul du coefficient Los-Angeles(marne+50%laitier)

M(g)	M'(g)	LA
5000	2800	44

- **Marne +70%laitier**

$$LA = \frac{5000 - 2990}{5000} \times 100$$

Tableau V.11 : Calcul du coefficient Los-Angeles (marne+70%laitier)

M(g)	M'(g)	LA
5000	2990	40,2

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

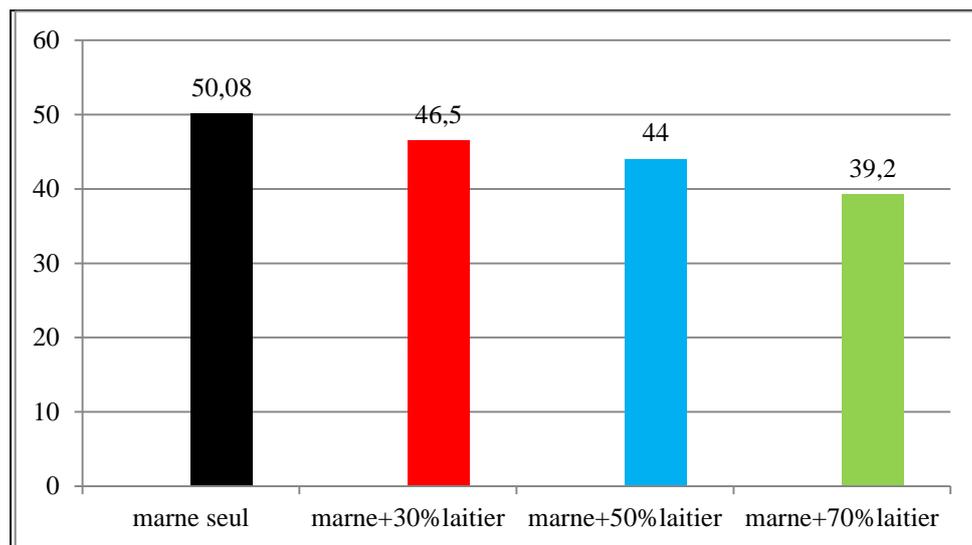


Figure V.6 : Courbe comparative des essais Los-Angeles (marne seule et avec laitier).

La figure V.6 montre que le coefficient Los Angeles diminue au fur à mesure que le pourcentage du laitier augmente. Il passe de 50,08 pour la marne seule à 39,2 avec 70% de laitier. Ceci nous permet de déduire que le laitier améliore la résistance des mélanges aux chocs, pour envisager leur utilisation dans certaines couches de chassées.

Tableau V.12 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure(Moron,BRGM).

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

Tableau V.13 : Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

	LA	MDE	MDE+LA	Catégorie
Marne seul	50,08	100	150,08	médiocre
Marne+30%laitier	46.5	76,4	123	médiocre
Marne+50%laitier	44	54,6	98.6	Catégorie F
Marne+70%laitier	39,2	36,6	75.8	Catégorie E

En se basant sur les valeurs de références présentées dans le tableau V.12, nous pouvons conclure que :

La marne seule et les mélanges à 30% et 50% de laitier sont médiocres et ne peuvent être utilisés à l'état actuel dans les corps de chaussées. Ce type de granulat présente de faibles résistances notamment à l'usure en présence d'eau.

Les mélanges de marne +70% de laitier présentent par contre une meilleure résistance permettant de les insérer dans la famille des matériaux de catégorie E. Ce type de matériau peut être utilisé en couche de forme (Fascicule 1 du guide technique SETRA).

V. 4 : Essai de fragmentabilité (NF P 94-066)

V.4.1 : Introduction

La granularité des matériaux évolue continuellement sous les différents types de sollicitations auxquelles ils sont soumis. Cette évolution est particulièrement plus importante dans le cas des matériaux routiers, vu qu'ils sont soumis à des sollicitations cycliques mécaniques et climatiques (fragmentation, usure...). Ainsi, avoir une idée sur l'évolution des grains permettra sans doute d'éviter certains désordres à court ou à long terme pouvant affecter les ouvrages construits.

V.4.2 : Principe de l'essai

Cet essai consiste à déterminer la réduction de D_{10} d'un échantillon de granularité d/D donné, soumis à un pilonnage conventionnel.

V.4.3 : Exécution de l'essai

L'essai consiste à la déterminer la réduction du D_{10} d'un échantillon de granularité 10/20mm donnée soumis à un pilonnage conventionnels selon la norme NF P 94-066.

Cette réduction s'exprime par le rapport :

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

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

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

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

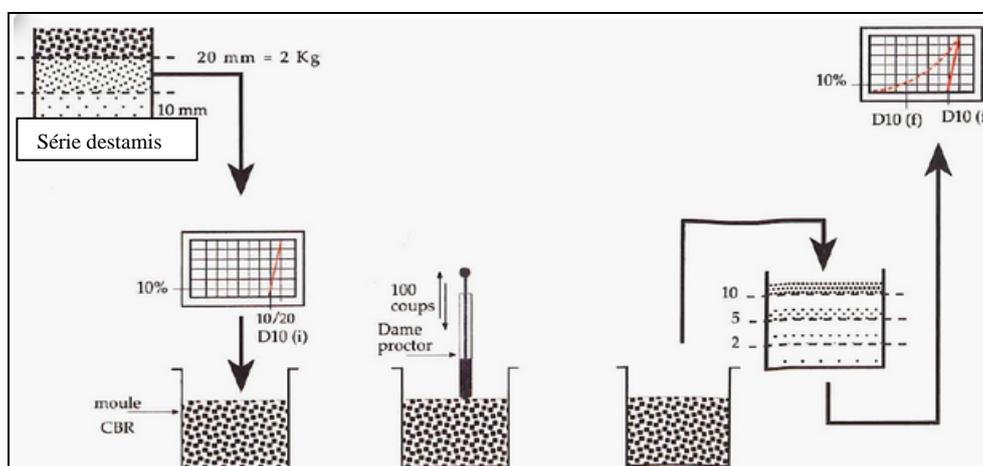


Figure V.7 : Différentes étapes de l'essai de fragmentabilité

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

Tableau V.14 : Valeurs de références.

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

V.4.4 : Matériaux utilisé

On a réalisé des essais de dégradabilité pour les différents mélanges, à savoir :

- La Marne seul
- La Marne +30% Laitier
- La marne +50% laitier
- La marne +70% laitier

V.4.5 : Résultats obtenus

Après avoir effectué cet essai sur le matériau marne, nous avons obtenu les résultats suivant :

- **La Marne seule**

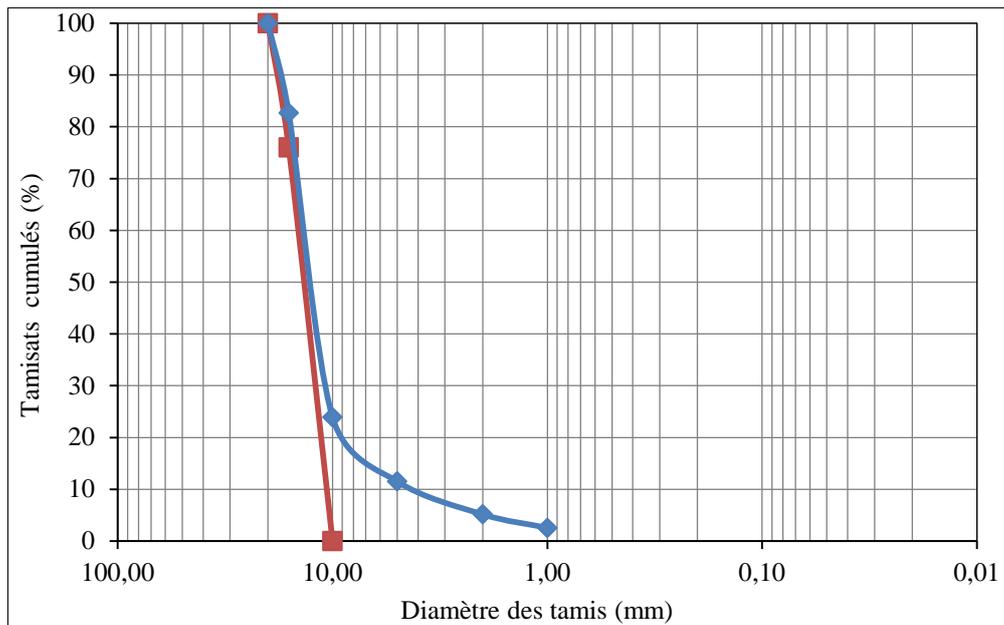


Figure V.8 : Courbe granulométrique de la marne +0% de laitier.

$$FR = \frac{11}{5} = 2,2$$

- **La Marne +30% de laitier**

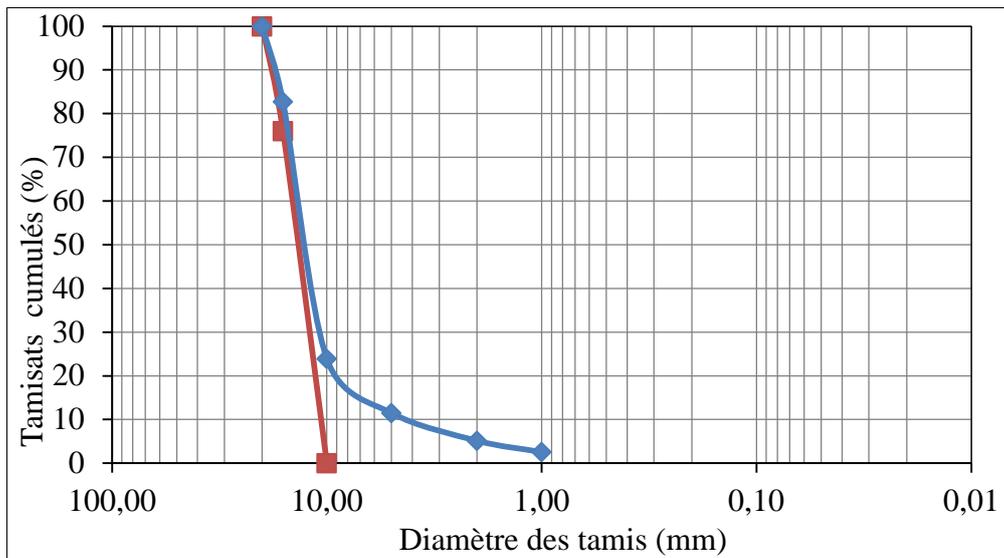


Figure V.9 : Courbe granulométrique de la marne +0% de laitier.

$$FR = \frac{11}{4,5} = 2,44$$

- **La Marne +50% laitier**

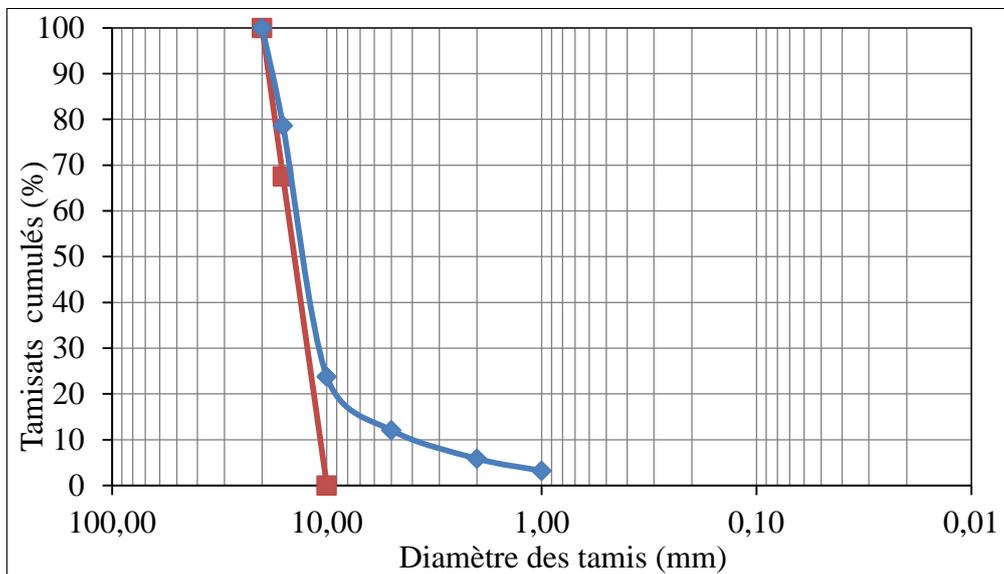


Figure V.10 : Courbe granulométrique de la marne + 50% de laitier.

$$FR = \frac{11}{4} = 2,75$$

- **La Marne +70% laitier**

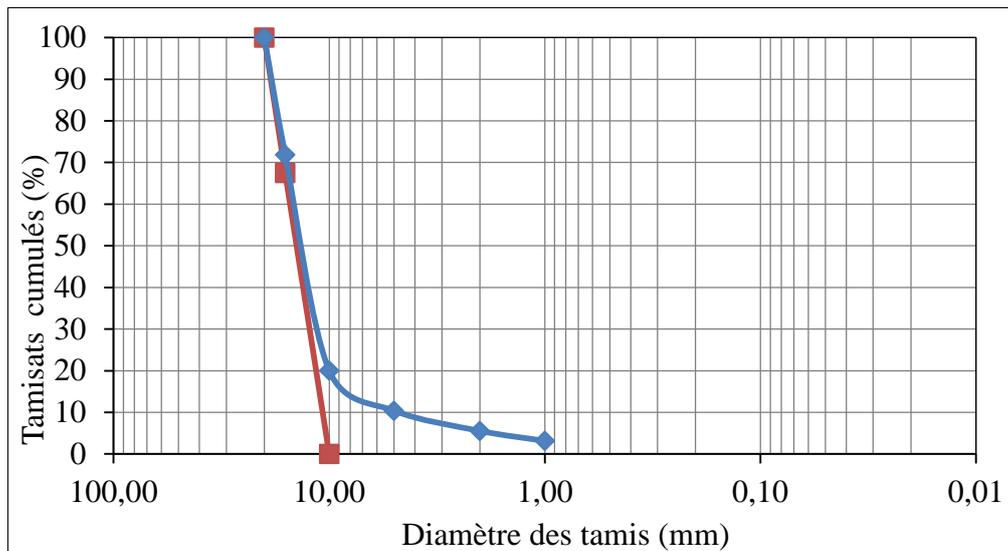


Figure V.11 : Courbe granulométrique de la marne + 70% de laitier.

$$FR = \frac{11}{3,7} = 2,97$$

V.4.6 : Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour les mélanges sont très intéressants. En effet, les coefficients FR déterminés sont inférieurs à 7, ce qui indique que les matériaux étudiés se sont très peu fragmentés. La marne seule a très bien supporté le pilonnage appliqué, toutefois, la résistance à la fragmentation des mélanges diminue au fer et à mesure que le pourcentage du laitier augmente. Elle passe de 2,2 pour la marne seule à 2,97 pour le mélange à 70% de laitier. Ceci peut être dû à l'action des grains du laitier qui sont très durs sur les grains de la marne.

Les résultats obtenus permettent ainsi d'envisager l'utilisation des matériaux étudiés du point de vue fragmentabilité en couches inférieures de chaussées sous tout trafic.

V.5. Essai de dégradabilité (NF P 94-067)

V.5.1. Principe de l'essai

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

V.5.2. Mode opératoire

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité 10/20mm donnée, soumis à quatre cycles imbibition-séchage conventionnels selon la norme NF P 94-056.

Cette réduction s'exprime par le rapport

$$DG = \frac{\text{D10 du matériau avant essai}}{\text{D10 du matériau apres essai}}$$

Avec : D10: Diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât.

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

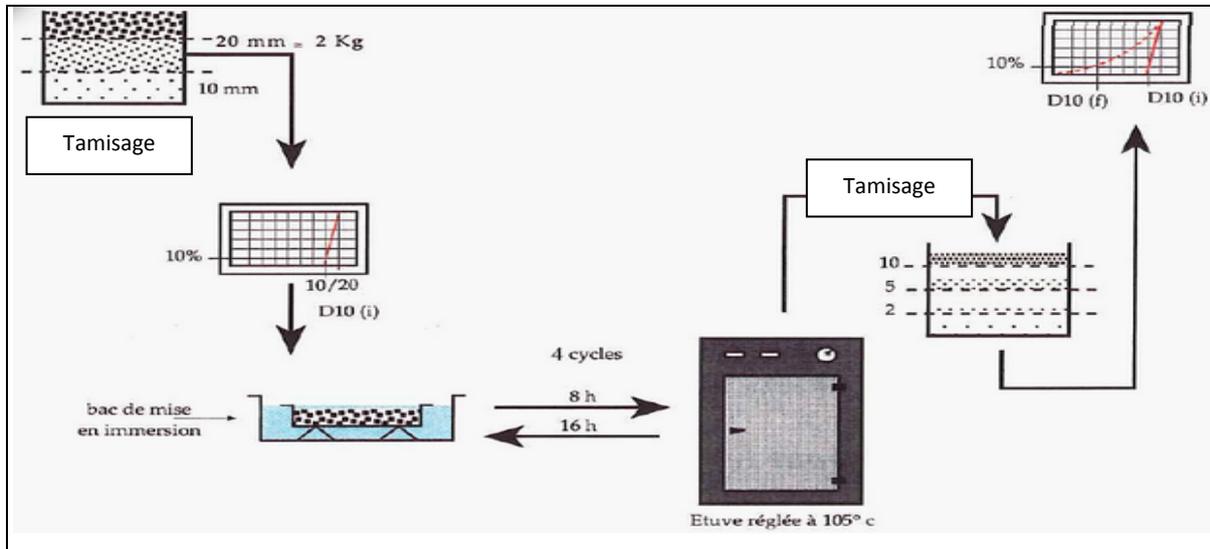


Figure V.12 : Différentes étapes de l'essai de dégradabilité.



Figure V.13 : Dégradation du matériau sous sollicitations hydriques

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

Tableau V.15 : classification des matériaux rocheux selon le coefficient DG.

Coefficient de dégradabilité	Nature de matériau
------------------------------	--------------------

DG>20	Matériaux rocheux très dégradables
5<DG<20	Matériaux rocheux moyennement dégradables
DG<5	Matériaux rocheux peu dégradables

V.5.3. Matériaux utilisés

On a réalisé des essais de dégradabilité pour les différents mélanges, à savoir :

- La Marne seul
- La Marne +30% Laitier
- La marne +50% laitier
- La marne +70% laitier

V.5.4. Résultats obtenus

Après avoir effectué cet essai sur le matériau, nous avons obtenu les résultats suivants :

- **La Marne seule**

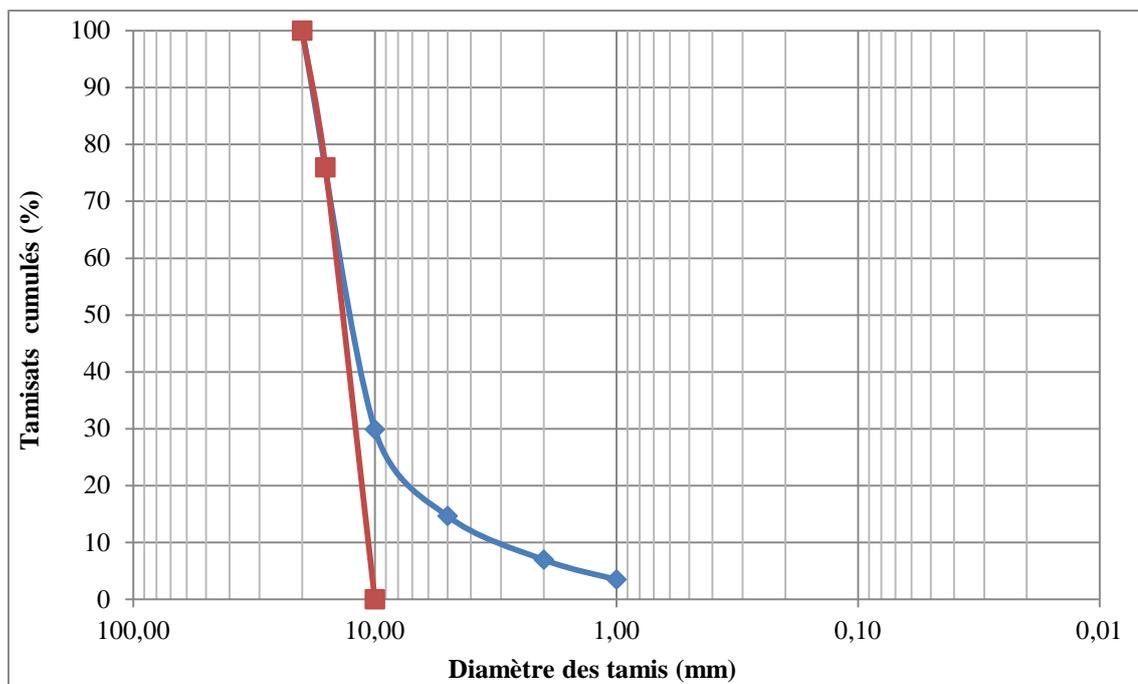


Figure V.14 : Courbe granulométrique de la marne + 0 % de laitier.

$$DG = \frac{11}{2,7} = 4,07$$

- **La Marne +30% laitier**

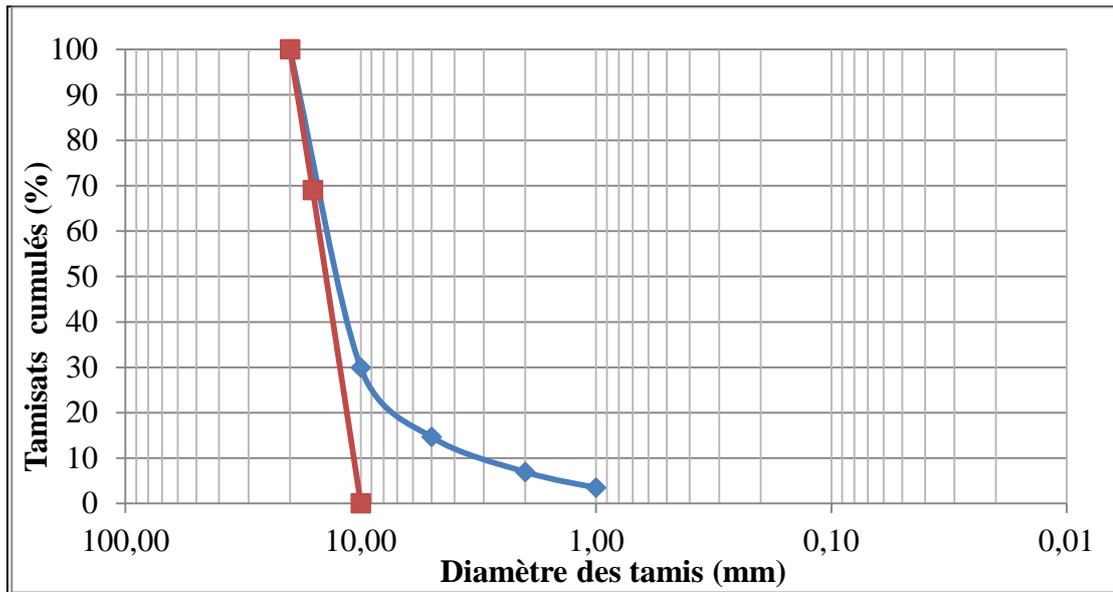


Figure V.15 : Courbe granulométrique de la marne +30% de laitier.

$$DG = \frac{11}{4,5} = 3,66$$

- **Marne +50% laitier**

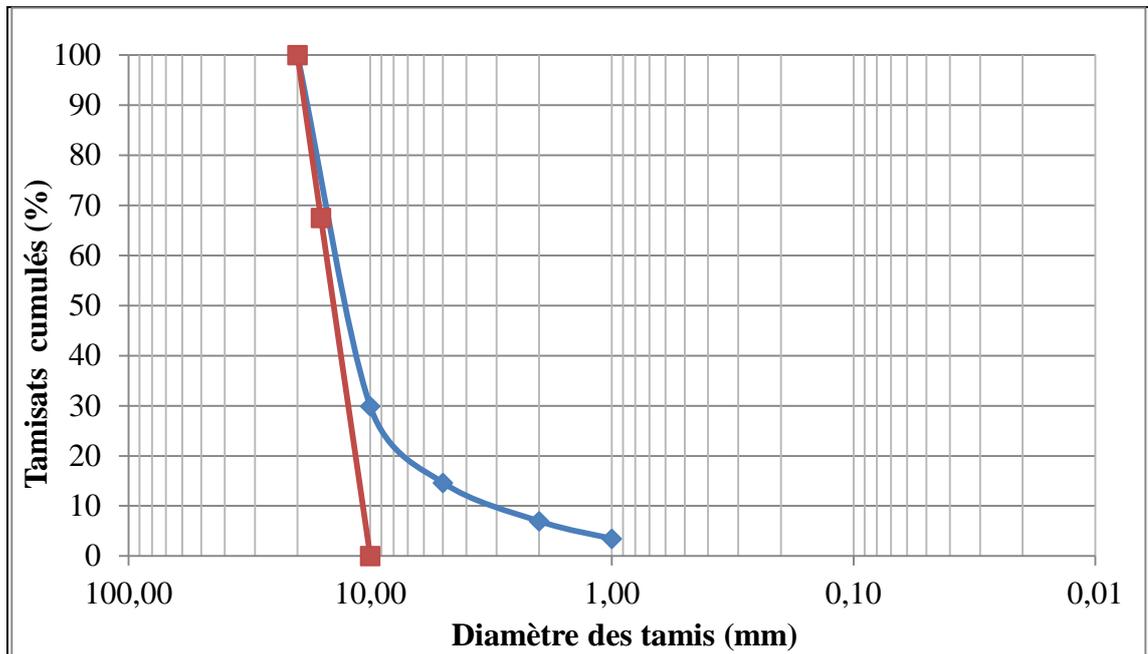


Figure V.16 : Courbe granulométrique de la marne +50% de laitier.

$$DG = \frac{11}{4} = 3,66$$

- **La Marne +70% laitier**

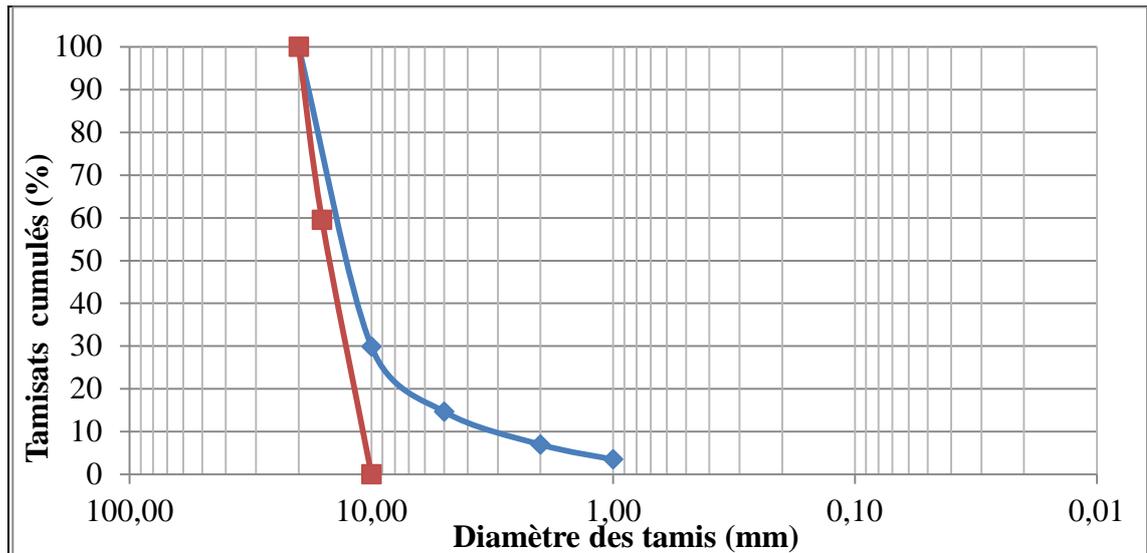


Figure V.17 : Courbe granulométrique de la marne +70% de laitier

$$DG = \frac{11}{3,7} = 3,66$$

V.5.5. Interprétation des résultats

En se référant aux valeurs présentées dans le tableau V.15, nous déduisons que la marne étudié fait partie des matériaux rocheux peu dégradables, ($FR = 4,07 < 5$). Son utilisation en couches de chaussées est très envisageable. Toutefois, l'ajout du laitier améliore sensiblement la résistance à la fragmentation des mélanges. En effet, DG passe de 4,07 à 3,66 dans le cas de la marne avec 70% de laitier.

Cette amélioration est expliquée par la nature du laitier qui ne se dégrade pas sous sollicitation hydrique.

Les mélanges étudiés sont donc peu dégradables et leur utilisation en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations) est fortement recommandée.

V.6. Conclusion

Les séries d'essais réalisées dans ce chapitre ont permis d'évaluer la résistance des mélanges aux différentes sollicitations routières. En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons conclure que le matériau étudiés (mélange de la marne + laitier cristallisé) ont présenté dans certains cas des comportements très intéressants, particulièrement pour des teneur en laitier au voisinage de 70% de tels mélanges peuvent être proposés pour une utilisation en couches inférieures de chaussées (couche de fondations et couche de base) de faible à moyen trafic, à condition d'obtenir des résultats acceptables sous d'autres essais routiers exerçant d'autres types de sollicitations.

Cependant, pour cerner d'avantage le comportement des mélanges étudiés sous d'autres types de sollicitations, nous les avons soumis aux efforts de cisaillement, développés notamment au cours du freinage et de l'accélération des véhicules. Les essais de cisaillement direct à la boîte feront l'objet du dernier chapitre suivant.

CHAPITRE VI

RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX ETUDIES

VI.1.Introduction

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondation, ouvrages de soutènement, remblais, talus, etc.), il est nécessaire de connaître la résistance du sol. Cette résistance est souvent difficile à déterminer, spécialement lorsqu'il s'agit d'un sol cohérent.

Elle peut être déterminée par plusieurs essais in situ ou au laboratoire. Le présent mode opératoire s'applique exclusivement à l'essai de cisaillement direct à la boîte de Casagrande qui permet d'évaluer la résistance au cisaillement du sol en place ou des granulats d'apport afin d'assurer la sécurité des ouvrages construits et d'éviter toutes surprises après construction afin d'assurer la sécurité des ouvrages construits et d'éviter toutes surprises après construction (LCPC, 1987).

Dans ce chapitre nous allons étudier la résistance au cisaillement des mélanges de marne avec laitier cristallisé en utilisant la boîte de cisaillement.

VI.2. Résistance au cisaillement

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

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

En effet, si on porte l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la déformation dans le plan de cette contrainte de cisaillement, on obtient le graphe suivant (Figure VI.1).

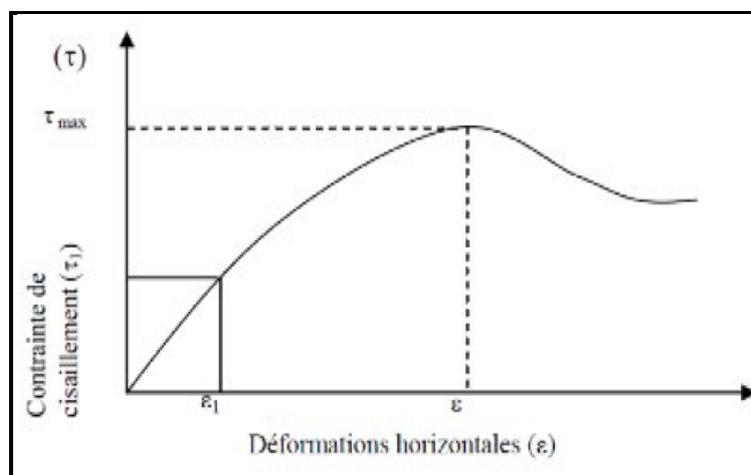


Figure VI.1 : Courbe de contrainte-déformation

Selon le (LCPC 21, 1987), la résistance au cisaillement peut être définie, sur ce graphique, Comme étant :

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

VI.3. Résistance et rupture des sols

On définit la résistance au cisaillement comme la contrainte de cisaillement maximale que le sol peut supporter.

VI.3.1 Définition de la rupture du sol

En pratique, la rupture d'une éprouvette de sol s'apprécie d'après les déformations du sol : on trace en cours d'essai la courbe représentant la variation de la déformation du sol en fonction de la sollicitation qu'il produit. Ces courbes ont, suivant la nature et l'état du sol, l'une des deux allures représentées sur la figure VI.2 :

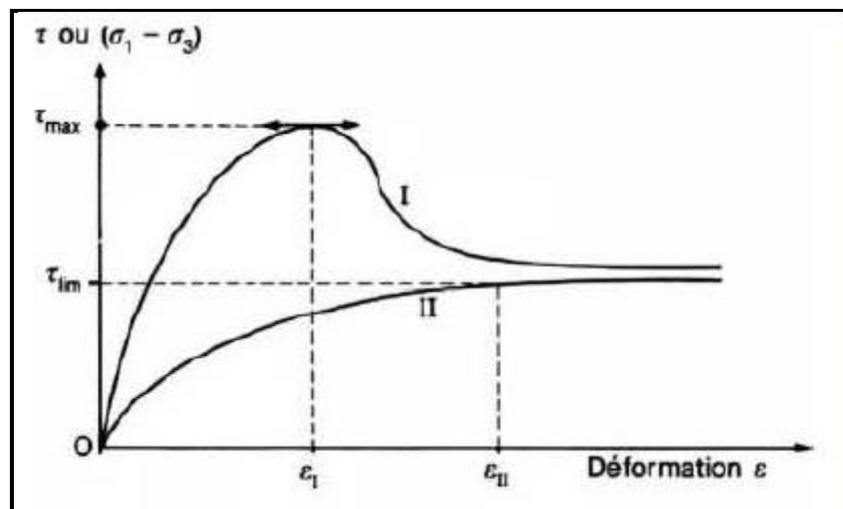


Figure VI.2 : courbe contrainte-déformation

- la courbe I présente un maximum. On admet que ce maximum τ_{\max} correspond à l'état de rupture, la déformation continuant de croître au-delà de ε_I alors que la sollicitation appliquée diminue ou, au mieux, reste constante ;

- la courbe II a une allure asymptotique : on définit arbitrairement la rupture à une valeur maximale de la déformation (τ_{\lim} correspondant à ε_{II}), au-delà de laquelle le comportement de l'ouvrage est incompatible avec sa destination.

La forme de la courbe de déformation en fonction de la sollicitation appliquée est révélatrice de l'état du sol : les sables denses présentent un pic de résistance, comme les argiles à structure intacte lorsqu'elles sont surconsolidées, tandis que les sables lâches et les argiles remaniées ont habituellement un comportement de type asymptotique.

VI.3.2 Mécanisme de rupture d'un sol

Dans un sol saturé, l'application d'une charge se porte dans un premier temps sur l'eau interstitiel progressivement ensuite, elle se repose sur le squelette solide du sol.

La rapidité de ce repos est fonction de la perméabilité du sol, Ce repos peut être instantané si le sol ne comporte pas d'éléments très fins ou argileux, dans ce cas la résistance au cisaillement au milieu est essentiellement due au frottement des grains les uns sur les autres.

Elle dépend donc :

- De la nature et de la forme des grains
- De leur disposition par rapport aux directions principales du champ des contraintes

Si au contraire la perméabilité du sol est faible (charge des éléments fins) le processus de cisaillement dépend beaucoup de la vitesse d'application des contraintes.

On peut donc envisager pour ces sols, deux types de comportement :

❖ Comportement à long terme :

Dans ce cas la pression interstitielle peut se dissiper lentement ; la résistance au cisaillement est alors celle du squelette solide. Si ce squelette est constitué d'élément argileux, sa cohésion est d'abord mobilisée.

❖ Comportement à court terme :

L'application brutale des contraintes, conduit à une rupture instantanée ; la résistance au cisaillement du sol est dans ce cas conditionnée par le comportement de l'ensemble solide/eau (Pression interstitielle).

VI.4. Les paramètres intrinsèques

• L'angle de frottement interne

L'angle de frottement interne ϕ traduit le frottement lors du glissement des grains, les uns sur les autres. Il varie d'un sol à un autre. Pour les sols pulvérulents, la valeur de l'angle de frottement interne ϕ dépend sensiblement de l'état de compacité du sol. Pour un état donné de compacité, ϕ croît avec l'augmentation du diamètre moyen des grains et l'étalement de la granulométrie du sol. Ce paramètre dépend également de la forme et de la nature de la surface des grains. par contre, l'angle de frottement interne est pratiquement indépendant de la teneur en eau du sol (Magnan, 1991), (Robitaille et Tremblay, 1997).

Dans le cas des sols fins, on a pu mettre en évidence l'influence de la nature minéralogique des composants argileux sur la valeur de ϕ . On note ainsi que la présence de montmorillonite, qui donne naissance à des valeurs élevées de plasticité fait diminuer inéluctablement la résistance au cisaillement. ce matériau ayant, de plus, la faculté de gonfler en présence d'eau est source de nombreux ennuis (Lerou, 2005).

• La cohésion

Elle exprime la résistance au cisaillement du sol sous contrainte normale indépendamment de la contrainte normale σ . Elle constitue la résistance propre de la structure due essentiellement aux liaisons de type physico-chimique pouvant exister entre les grains et créées par la cimentation. la cohésion est nulle dans les sols grenus étant donné qu'ils ne possèdent pas de telles liaisons. En revanche, cette dernière apparaît dans les sables humides ou légèrement cimentés en raison des ménisques d'eau existants aux points de contact entre les grains créant ainsi une certaine adhérence entre ces derniers et qui disparaît dès que la teneur en eau du sable augmente (Magnan, 1991). La cohésion est relativement élevée pour les sols cohérents, surtout dans les sols fortement surconsolidés. Mais celle-ci disparaît dès que les liaisons sont cassées par le cisaillement, ce qui correspond approximativement au maximum de la courbe de rupture (Lerou, 2005).

VI.4.1. Paramètres c et φ pour différents types de sols

Trois grandes catégories de sols sont couramment rencontrées :

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

• Cas des Sols pulvérulents

Dans ce cas, la droite de Coulomb passe par l'origine (figure VI.3) c'est-à-dire que le terme c est nul. (Cordary, 1994)

L'équation de Coulomb devient : $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi$

L'angle φ appelé « angle de frottement interne », dépend essentiellement de la compacité du sol, de la forme et de l'état de surface des grains solides. (Schmitt et al, 2008).

La résistance au cisaillement pour ces types de sols est assurée par le frottement et l'enchevêtrement des grains.

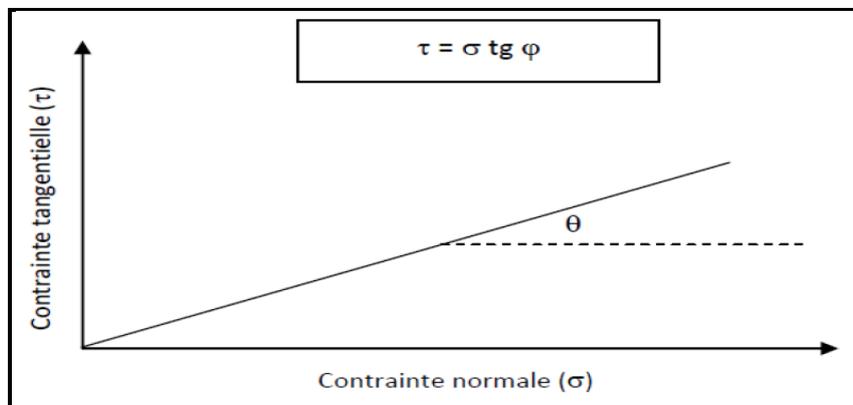


Figure VI.3: Courbe intrinsèque d'un sol pulvérulent

• Cas des sols purement cohérents

Dans le cas des sols purement cohérents illustrés dans la figure VI.4, la droite de Coulomb ne passe pas par l'origine, elle est parallèle à l'axe des abscisses, c'est-à-dire que le terme φ est nul (Robitaille et Tremblay, 1997).

La résistance au cisaillement pour ces types de sols est assurée par le frottement et l'enchevêtrement des grains. L'équation de Coulomb devient :

$$\tau = c.$$

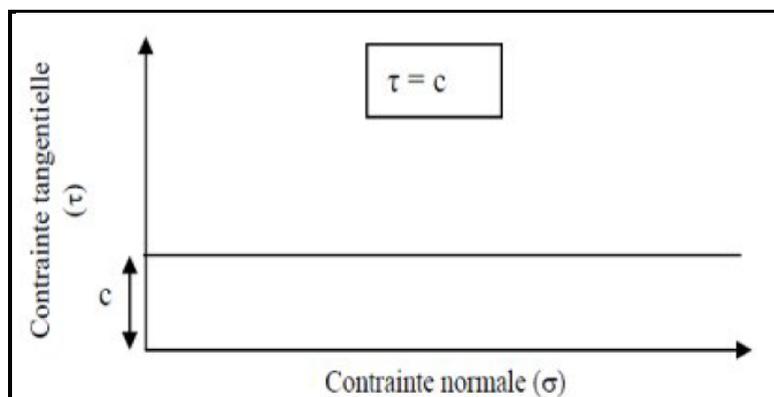


Figure VI.4 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent

- **Cas des sols cohérents et frottants**

Dans ce cas la droite de Coulomb ne passe pas par l'origine (voir la figure VI.5), c'est-à-dire que les deux termes "c et φ " sont différents de zéro ($c \neq 0$ et $\varphi \neq 0$).

L'équation de Coulomb est exprimée par :

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

La résistance au cisaillement pour ces types de sols est assurée à la fois par le frottement et l'enchevêtrement grains et les forces de cohésion qui se développent entre les particules

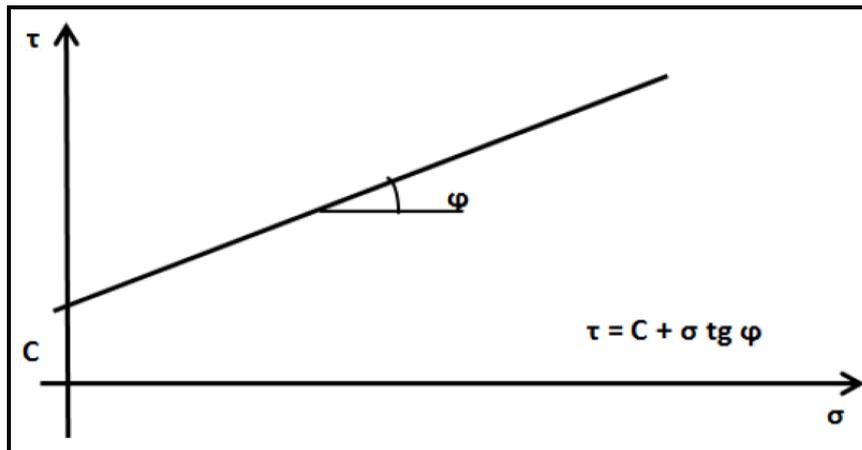


Figure VI.5 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent et frottant

VI.5.Facteurs influant sur la résistance au cisaillement

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

Dans le cas des sols fins, argileux ou organiques, la résistance au cisaillement augmente avec la vitesse de déformation, que ce soit en comportement drainé ou en comportement non drainé.

Pour tous les sols, la résistance à l'état remanié, après modification de la structure naturelle du sol, par exemple lors du prélèvement des éprouvettes soumises aux essais, diffère de la résistance du sol dans son état naturel.

La plupart des sols naturels sont anisotropes. Pour cette raison, les différents types d'essais qui permettent de mesurer la résistance au cisaillement ne donnent pas tous les mêmes résultats. (Gonnouni)

VI.6.But de l'essai de cisaillement

Il s'agit de déterminer les caractéristiques mécaniques d'un sol en procédant au cisaillement rectiligne d'un échantillon sous charge constante.

L'essai de cisaillement permet de tracer la courbe intrinsèque du sol étudié, et de déterminer son angle de frottement interne φ et sa cohésion **C**.

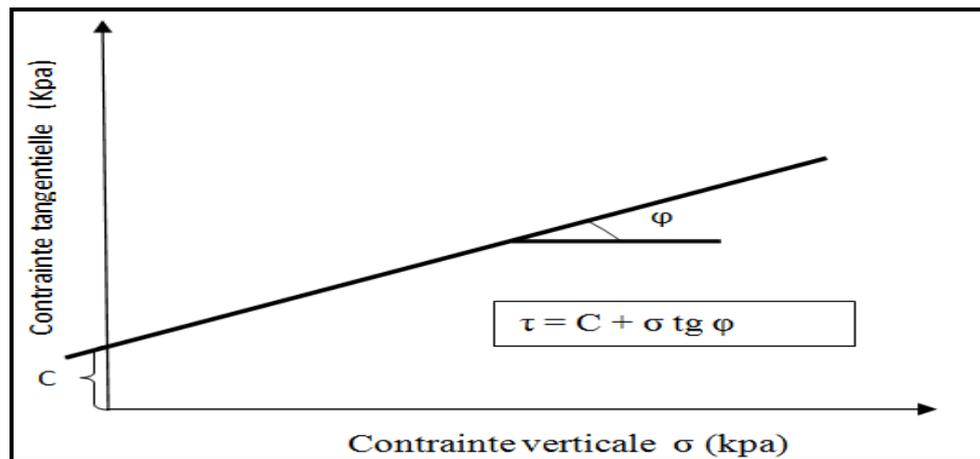


Figure VI.6 : Courbe intrinsèque

VI.7. Type d'essais réalisés à la boîte de cisaillement

Trois types d'essais sont couramment réalisés :

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

L'éprouvette ne subit aucune consolidation, ni aucun drainage préalable, sous la contrainte normale σ de l'essai. C'est un essai rapide et sauf dans des cas très particuliers, la droite de coulomb dans le diagramme (τ, σ) est horizontale (pour un sol cohérent saturé). La rapidité de l'essai doit être telle qu'elle ne permet aucun drainage de l'échantillon. Ce type d'essai est le plus couramment utilisé pour les études de fondation.

$$\tau = C_u$$

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

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

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

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

Cet essai est mené comme l'essai du type consolidé non drainé, néanmoins la vitesse de cisaillement est suffisamment lente pour que la pression interstitielle de l'eau puisse se dissiper et être considérée comme nulle à chaque instant ($U=0$). Il en résulte que $\sigma = \sigma'$. La contrainte de cisaillement à la rupture est donnée par l'équation :

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

VI.8. Avantages et inconvénients de la boîte de cisaillement

➤ **Avantage**

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

➤ **Inconvénients**

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

VI.9. Principe de l'essai de cisaillement à la boîte

Le principe consiste à placer l'échantillon de sol à étudier entre deux demi boîtes indépendantes qui peuvent se déplacer horizontalement l'une par rapport à l'autre dont le plan de séparation forme un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'échantillon. Un piston permet d'exercer sur le sol une contrainte normale déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement N est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. (Techouani, 1999).

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

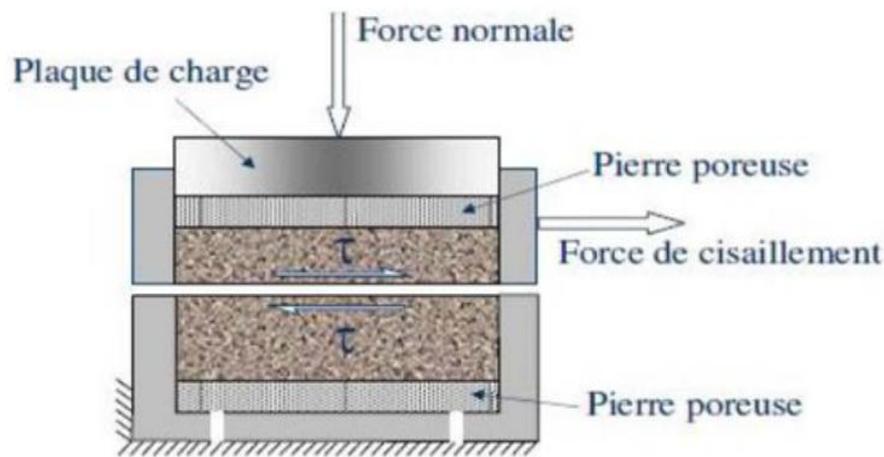


Figure VI.7 : Principe de la boîte de cisaillement.

VI.10. Mode opératoire

1. Solidariser les deux demi-bottes et mettre l'échantillon dans la boîte.
2. Placer la boîte sur le chariot et positionner les comparateurs ou capteurs pour prendre des lectures (déplacement horizontal, déplacement vertical et force tangentielle);
3. Appliquer sur la face supérieure un effort vertical N représentant les contraintes normales $\sigma = 100, 200, 300$ et 400 kPa ;

4. Régler tous les comparateurs à zéro et démarrer l'essai à une vitesse constante (0.5 mm/min) ;
5. Prendre les lectures simultanées sur les différents comparateurs (force, déplacement horizontal et déplacement vertical), à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15 secondes) ;
6. La rupture est atteinte lorsqu'un pic ou un palier est obtenu du graphe $\tau = f(\Delta l)$, ce qui permet d'arrêter l'essai après quelques lectures décroissantes ou stabilisées, sinon l'essai est poursuivi jusqu'à la fin de course.

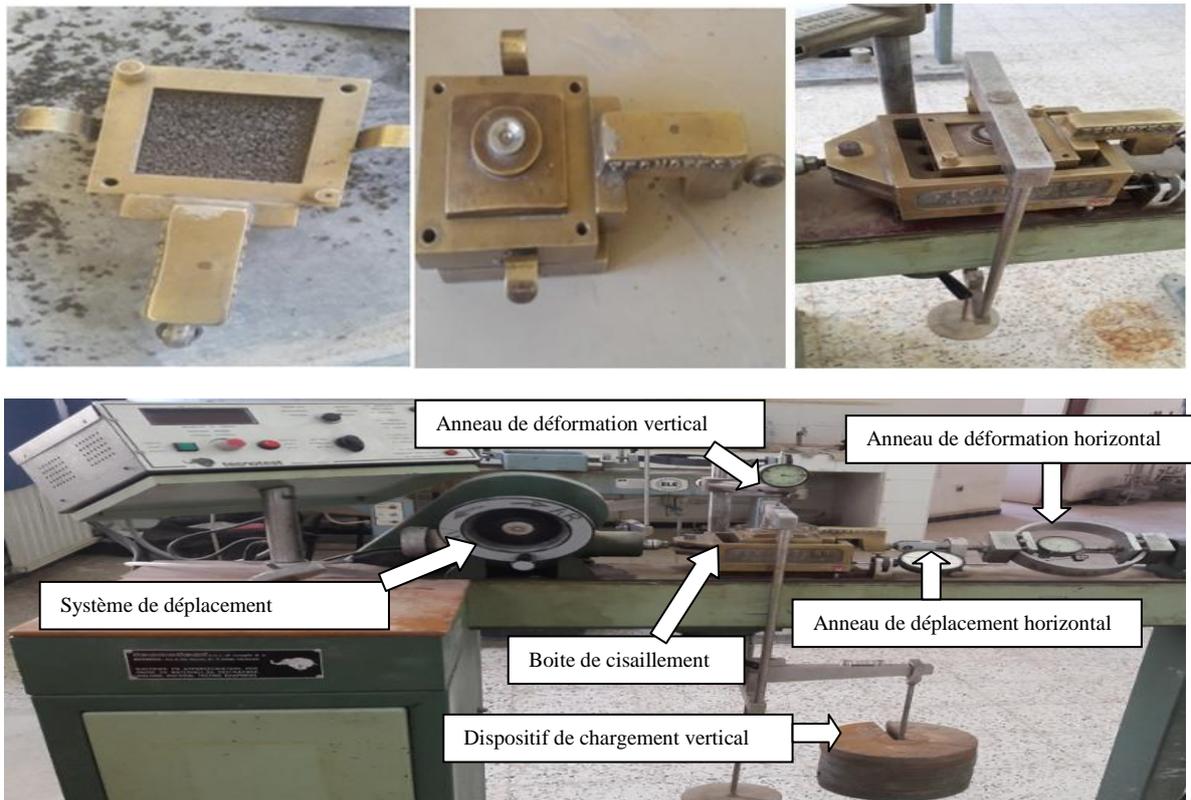


Figure VI.8 : Appareillage de l'essai de cisaillement à la boîte.

VI.11.Expression des résultats

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

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

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

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

Avec :

T : Force tangentielle de cisaillement [daN] ; S_c : section corrigée [cm²].

S_c : La section corrigée : $S_c = L(L - \Delta L)$ [mm²]

Avec :

L : Longueur du côté de la boîte de cisaillement (L=60mm) ;

ΔL : Déplacement horizontal [mm] ;

ΔV : Déplacement vertical [mm].



Figure VI.9 : Échantillon après cisaillement.

VI.12. Essais réalisés

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

- Marne + 00 % de laitier ;
- Marne + 30 % de laitier ;
- Marne + 50 % de laitier ;
- Marne + 70 % de laitier.

VI.13.Présentation des résultats

Marne seule

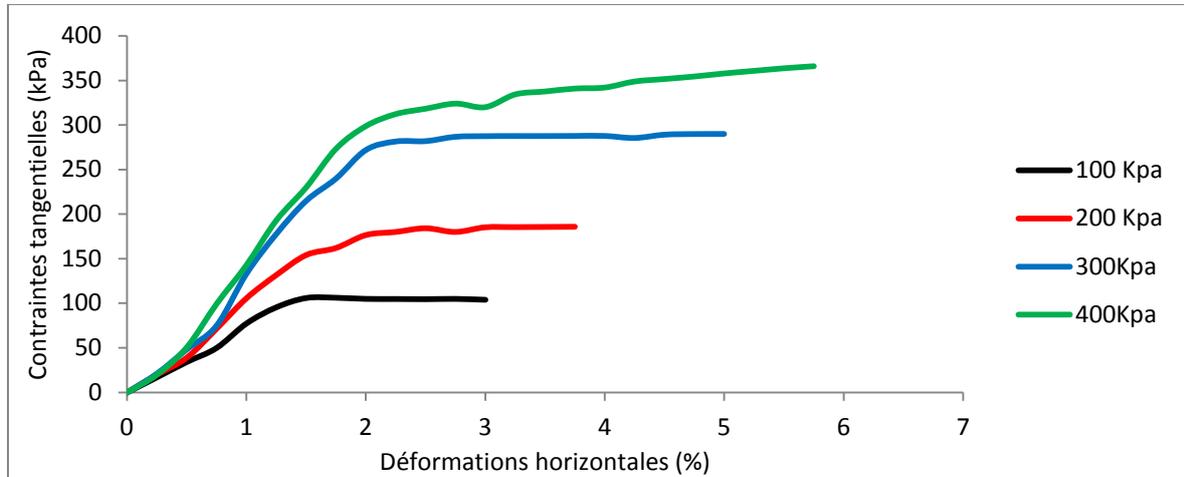


Figure VI.11 : Courbes contraintes-déformations.

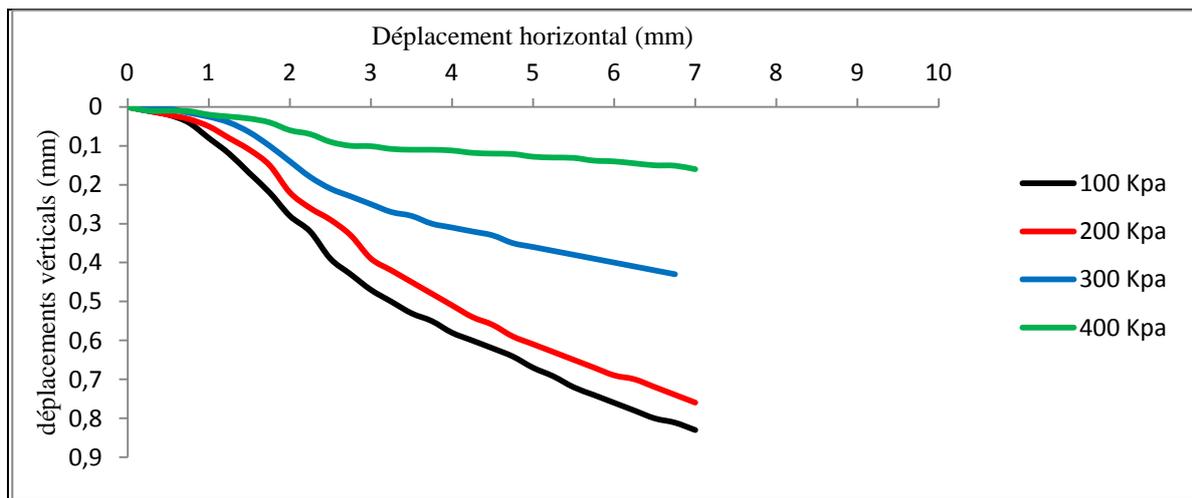


Figure VI.10 : Courbes de variation du volume.

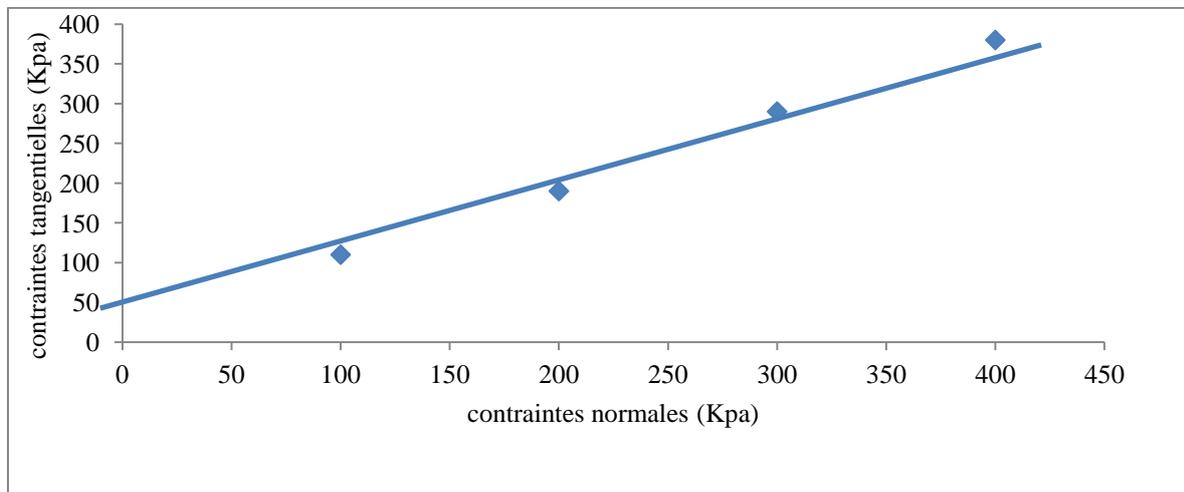


Figure VI.12 : Droite intrinsèque (marne seul).

Marne +30% laitier

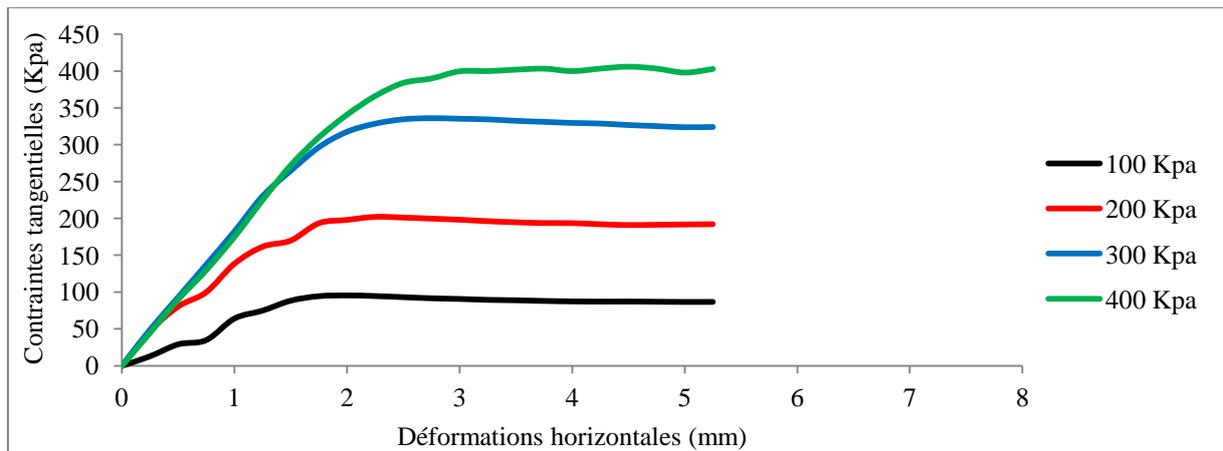


Figure VI.14 : Courbes contraintes-déformations.

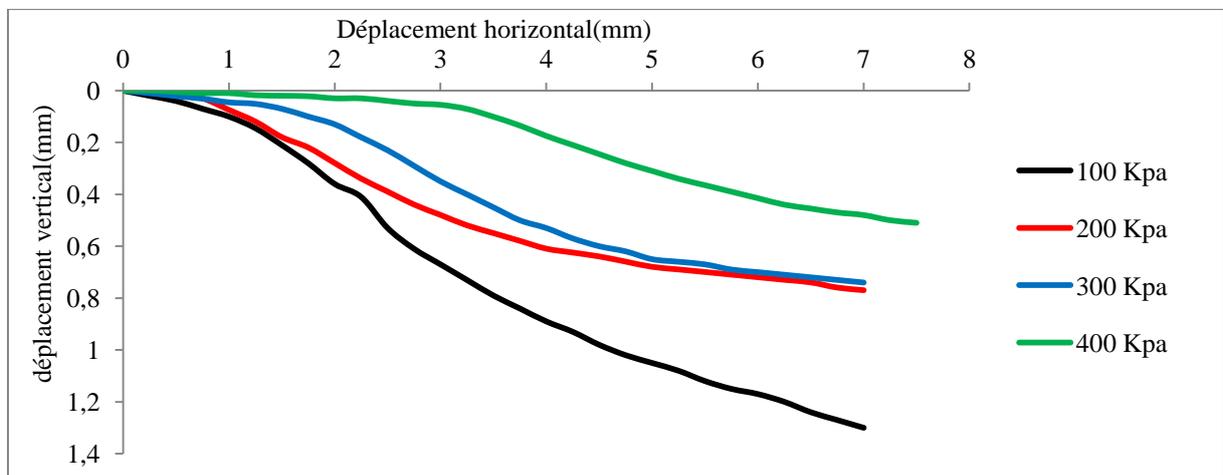


Figure VI.13 : Courbes de variation du volume.

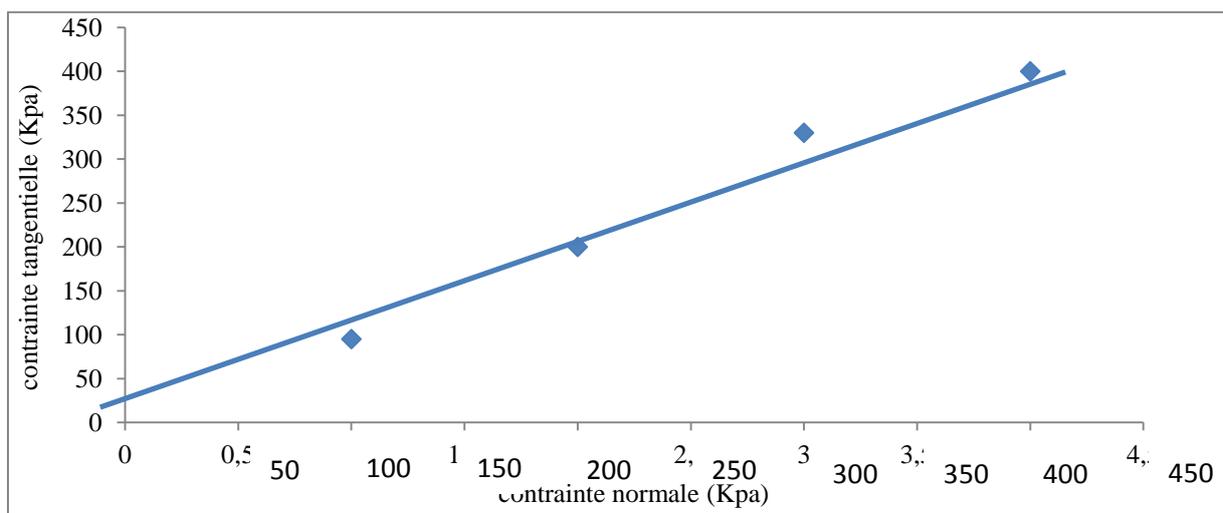


Figure VI.15: Droite intrinsèque (marne +30% laitier).

Marne +50% laitier

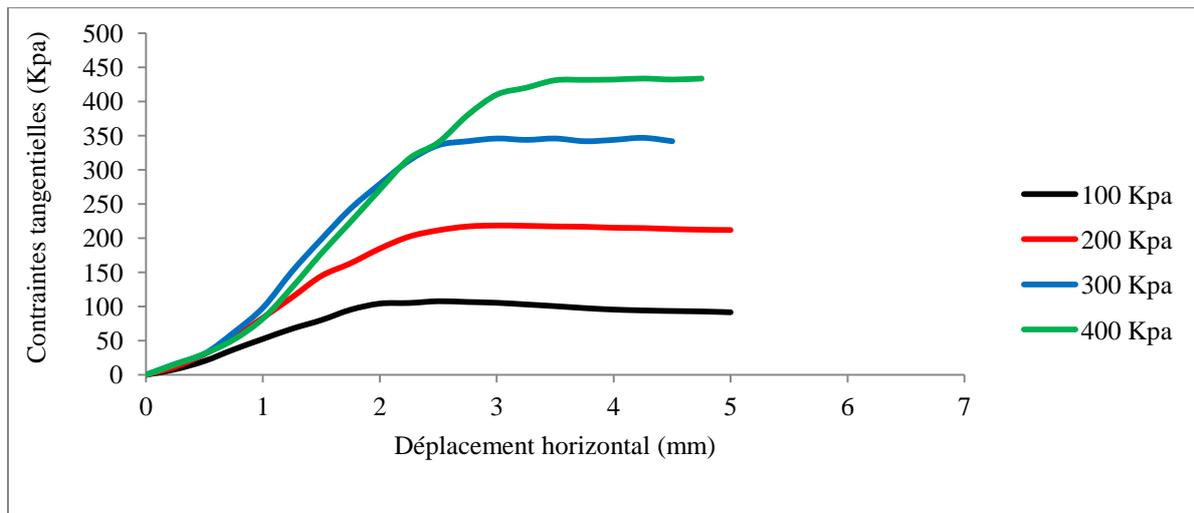


Figure VI.17 : Courbes contraintes-déformations.

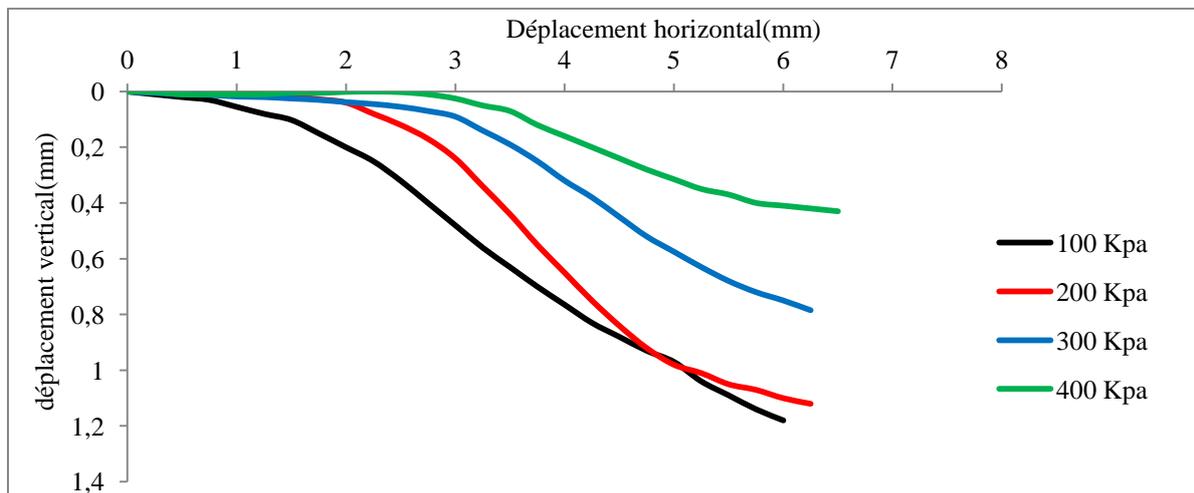


Figure VI.16 : Courbes de variation du volume.

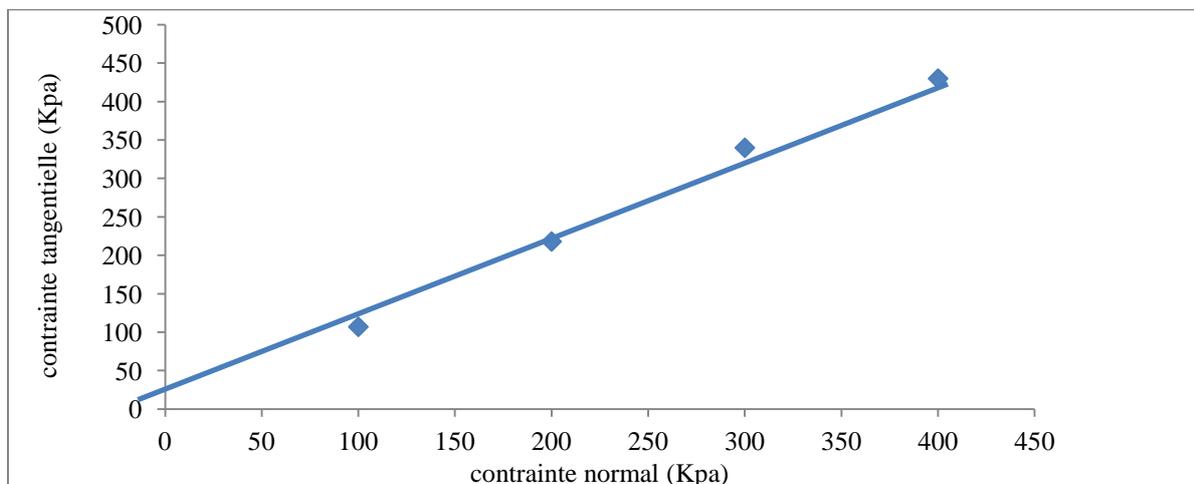


Figure VI.18 : Droite intrinsèque (marne +50% laitier).

Marne +70% laitier

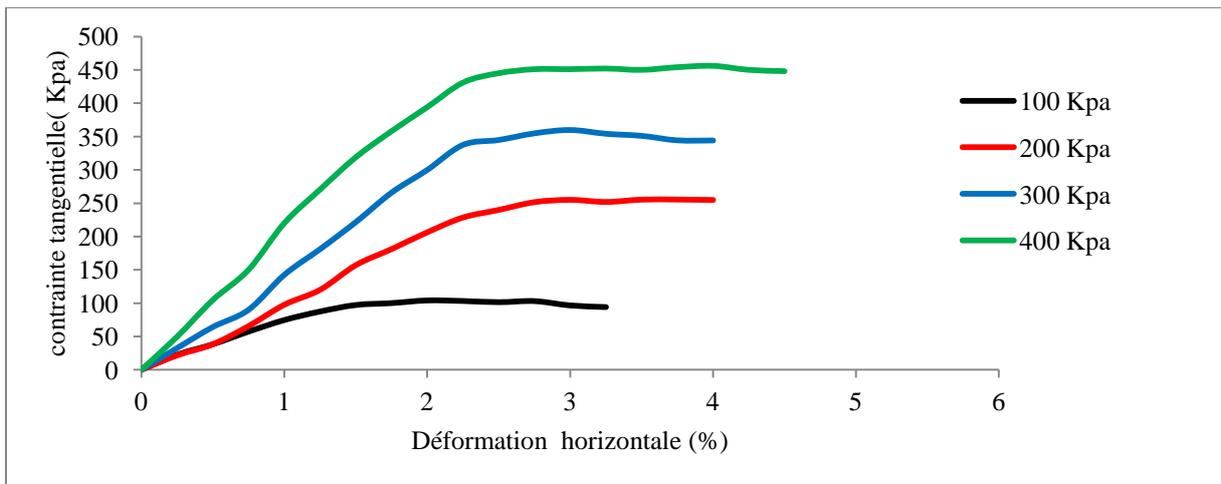


Figure VI.20 : Courbes contraintes-déformations.

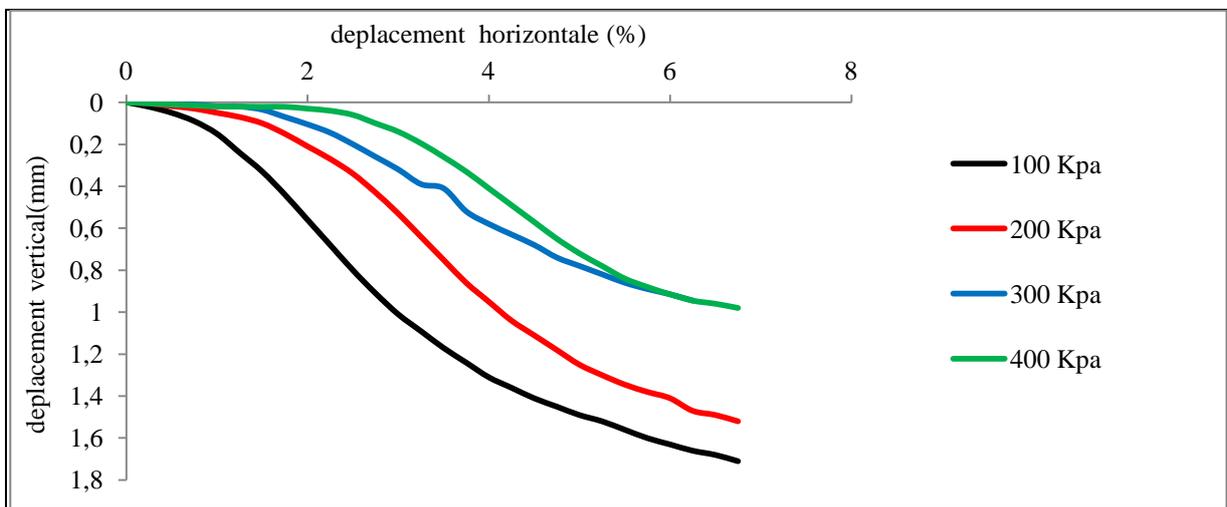


Figure VI.19 : Courbes de variation du volume

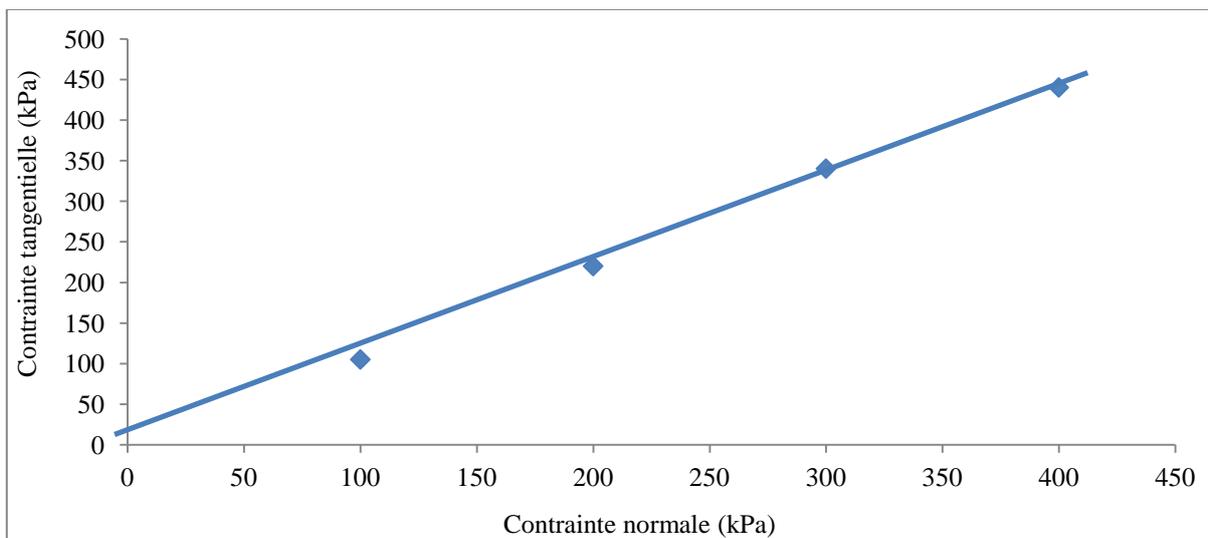


Figure VI.21 : Droite intrinsèque (marne +70%laitier).

Les courbes présentées sur les figures VI.11, VI.14, et VI.17 et VI.20 montrent que 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 resserrement des grains et donc, un frottement plus important et une résistance plus grande à la sollicitation.

On remarque également 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, (Figure VI.10, VI.13, VI.16 et VI.20).

Tableau VI.1 : Cohésion des différents mélanges

Mélange	Cohésion(Kpa)
Marne +0 % laitier	50
Marne +30% laitier	30
Marne +50% laitier	25
Marne +70% laitier	20

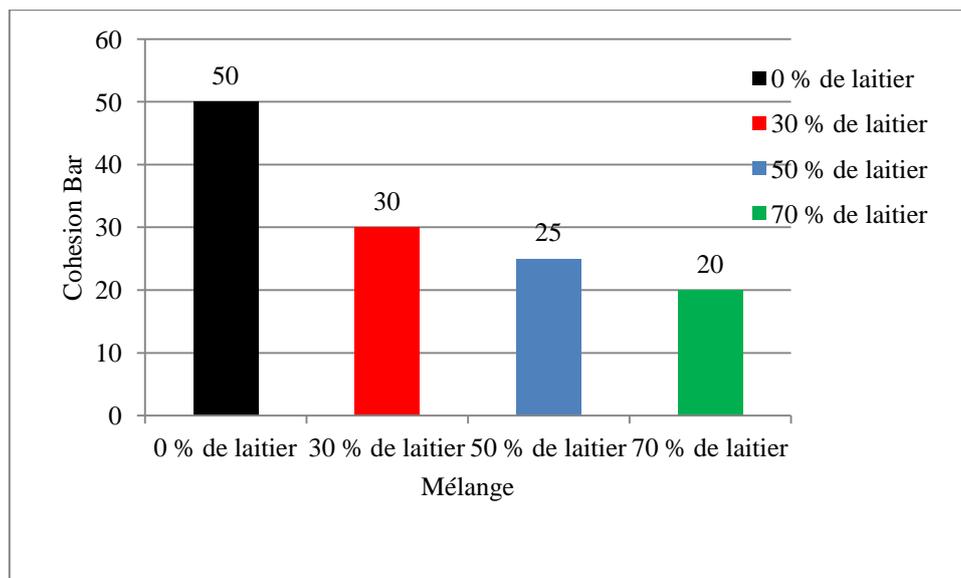


Figure VI.22 : comparaison de la cohésion des différents mélanges

Comme le montre la figure VI.27, les cohésions des mélanges sont assez faibles et diminuent au fur et à mesure que le pourcentage du laitier augmente. Cette diminution en cohésion peut être liée aux discontinuités créées par l'ajout des granulats de laitier perturbant l'état cohérent du matériau marne.

Tableau VI.2 : Angle de frottement des différents mélanges

Mélange	Angle de frottement ϕ (°)
Marne +0% de laitier	36,86
Marne +30% de laitier	43,6
Marne +50% de laitier	44,9
Marne +70% de laitier	46

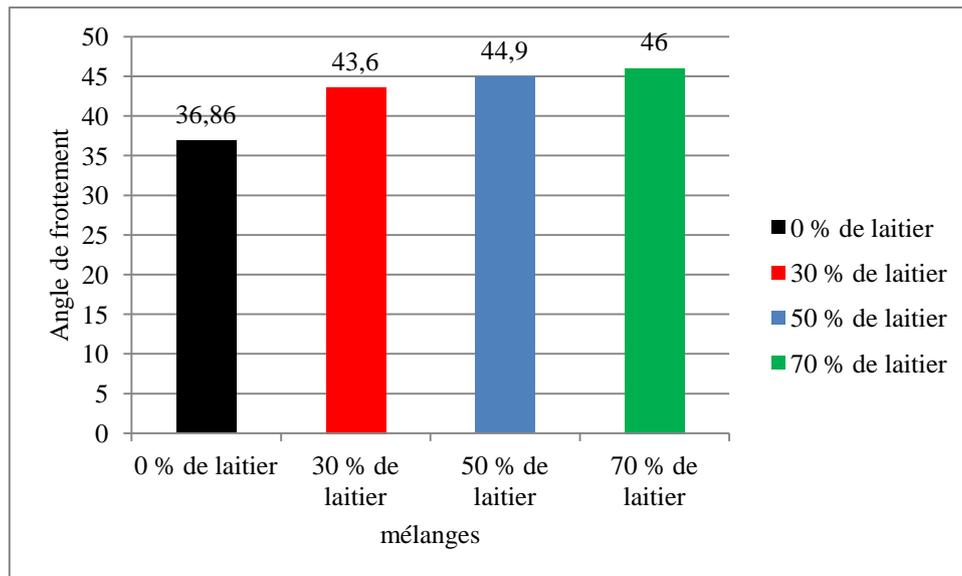
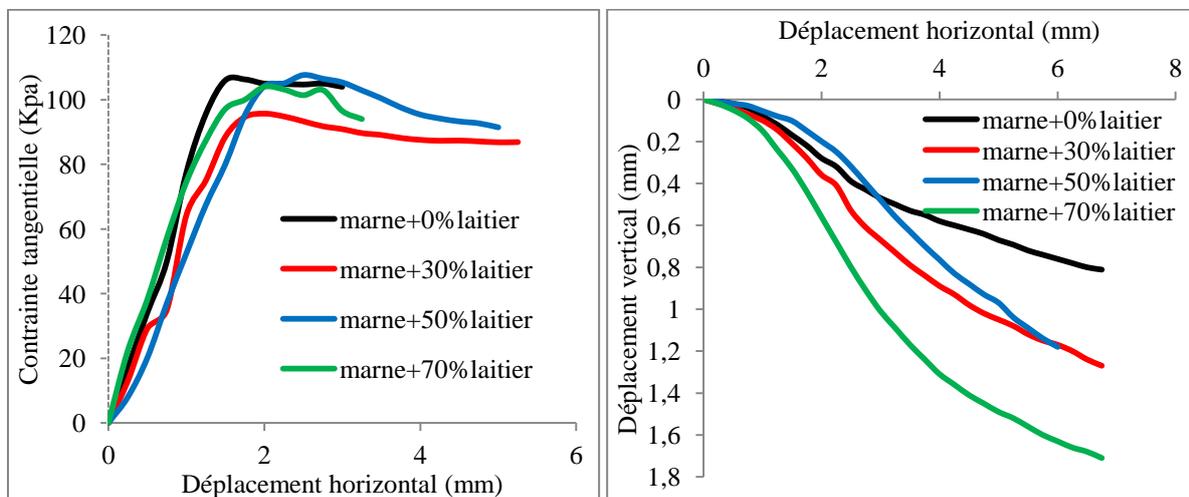


Figure VI.23 : Angle de frottement des différents mélanges

L'accroissement de l'angle de frottement interne avec l'ajout des granulats de laitier est illustré par la figure VI.23. Cette amélioration est certainement liée à la forme et la nature du laitier. En effet, ce dernier présente sous forme de granulats de forme très anguleuse avec un état de surface très rugueux, ce qui favorise le frottement et l'enchevêtrement des grains, se traduisant par des angles de frottement de plus en plus importants en rapport avec les fortes proportions du laitier dans le mélange.

Figure VI.24 : courbes comparatives à $\sigma = 100$ Kpa.

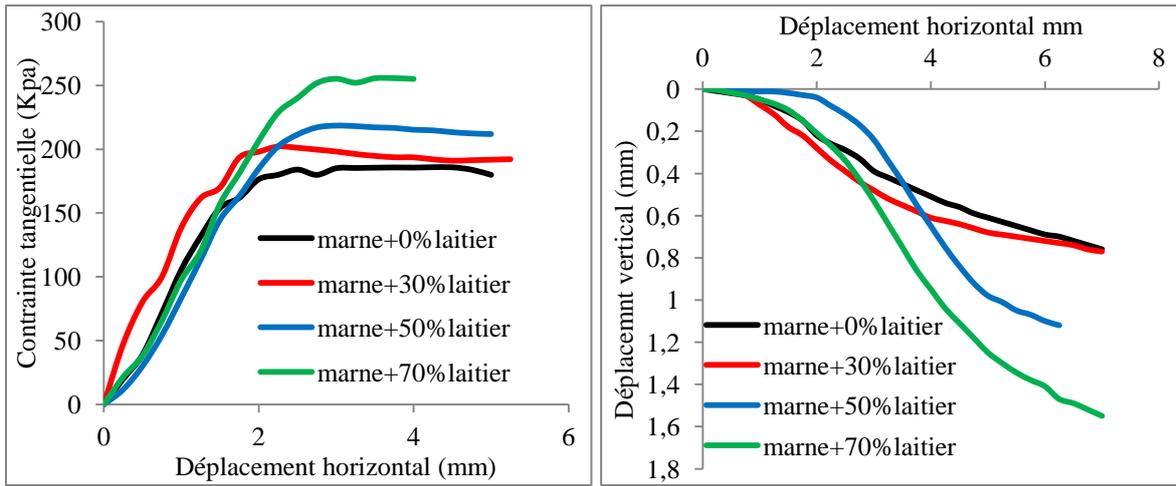


Figure VI.25 : courbes comparatives à $\sigma = 200$ Kpa.

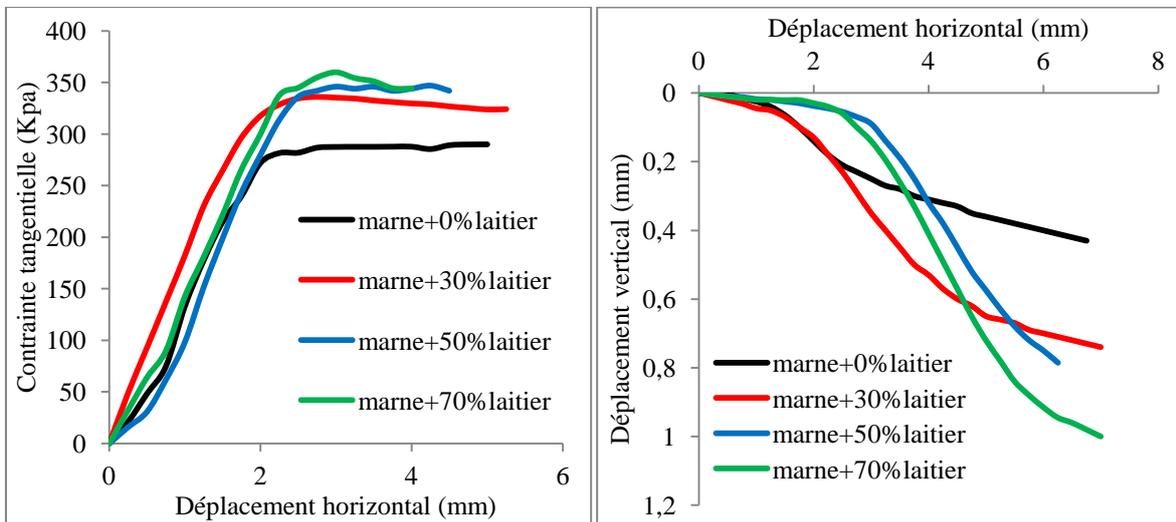


Figure VI.26 : courbes comparatives à $\sigma = 300$ Kpa.

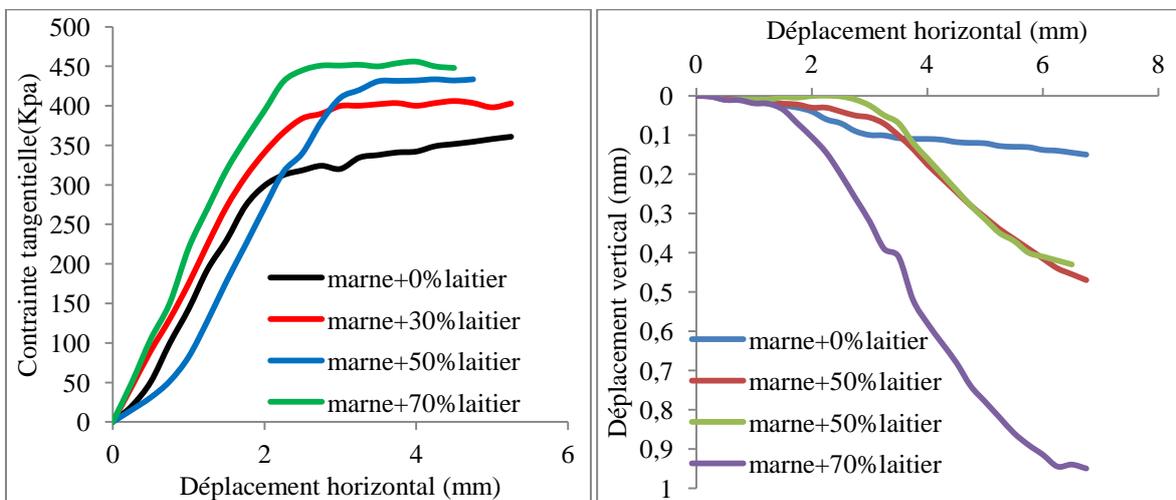


Figure VI.27 : courbes comparatives à $\sigma = 400$ Kpa.

En se basant sur les courbes comparatives des contraintes-déformations en fonction de la proportion du laitier sous une même contrainte normale présentés sur les figures VI.24 ,VI.25,VI.26 et VI.27 nous pouvons constater une amélioration sensible de la résistance au cisaillement des mélanges au fur à mesure avec l'augmentation de la teneur en laitier. Il est à signaler également que les mélanges à fortes proportions de laitier développent un comportement plus contractant.

Conclusion

A la lumière des résultats obtenus dans ce chapitre, nous pouvons conclure que l'ajout du laitier présente des résultats très intéressants au cisaillement direct à la boîte. Le comportement mécanique des différents mélanges est sensiblement amélioré comparé à celui de la marne seule.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La consommation de matériaux lors de la construction des routes étant énorme, le recyclage des matériaux de chaussée permet la réutilisation des matériaux existants avec ou sans modification des caractéristiques des matériaux.

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

Les matériaux sélectionnés (la marne et laitier cristallisé) présentent plusieurs avantages que ce soit sur le plan économique ou sur le plan environnemental, à savoir :

- Disponibilité ;
- Facilité de préparation.

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

- Les mélanges étudiés développent des densités sèches réduites comparativement à celles développées par la marne seule, néanmoins, elles restent assez importantes (supérieures à 2) et satisfaisantes comparativement aux seuils fixés par les normes dans le cas d'un matériau routier.

- L'ajout du laitier cristallisé améliore par contre, sensiblement la portance des mélanges même en présence d'eau (après immersion), tout en présentant des gonflements faibles. Ces résultats sont très intéressants et dépassent les qualités espérées pour ce type de matériaux. En outre, les matériaux étudiés présentent des gonflements faibles en présence d'eau.

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

- En ce qui concerne la résistance aux chocs, les résultats obtenus pour les échantillons étudiés présentent des résistances faibles à moyennes, comparativement aux matériaux modèles de référence ; par contre la résistance à l'usure s'améliore au fur et à mesure que la teneur en laitier cristallisé augmente. Par ailleurs, les essais de dégradabilité et de fragmentabilité révèlent respectivement que les matériaux marne et laitier cristallisé sont peu dégradables sous sollicitations hydriques et peu fragmentables sous sollicitations mécaniques.

Les mélanges étudiés (la marne + laitier cristallisé) présentent ainsi des comportements et des propriétés mécaniques très intéressantes, notamment pour de fortes teneurs en laitier (70 %).

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

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

A l'issue des résultats obtenus, nous pouvons conclure que le laitier cristallisé d'El Hadjar ne peut être considéré comme un déchet industriel, mais comme un résidu industriel valorisable dans les techniques routières.

Références bibliographiques

ADEME, 2014. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie. Les déchets.

Alain Damien, Guide de traitement des déchets 6^{ème} édition.

Arabi N , Molez L. les matériaux silico-calcaires ; substitution de chaux éteinte par le laitier granulé du haut fourneau, 2011

Arquie G. "Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats du compactage", BLPC. p. 61- 62. Vol. 179.

Belouettar R. journal de recherche chimique, n°7, 2003.

Berg . Lr, Raven P, Hassenzahi D, 2009. Environnement. Edition : De Boeck, Bruxelles. 605-619.

Berthaud Y, Buhan P, Schmitt N, 2008. Aide-mémoire mécanique des sols, Edition Dunod de paris.

Bertoling G, 1990. Le marché des ordures. Edition : L'harmattan, Paris

Direction départementale de l'agriculture et du forêt juin (2004), service de l'aménagement.

Catalogue des dégradations. 1984.

Catalogue des structures de chaussées.2003.

CDER, 4 octobre 2014, l'Algérie vise le recyclage de 40% des déchets en 2016.

Cherfa H, Ait Mokhtar K. « Valorisation des déchets industriels pour la stabilisation des couches de chaussées : Innovation et Valorisation dans le Génie Civil ». Les 5 -7 février 2009 à Hammamet, Tunisie Communication pages79 -89.

CTPL, 2004. Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques Laitier de Haut-Fourneau Vitriifié granulé ou bouleté.

CIF (Colloque international francophone) , « Le développement durable : débats et controverses », 15 et 16 décembre 2011, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.

Coquand R, 1978. Routes (Circulation –Tracé –Construction), livre II ,construction et entretien , 6eme éditions , Eyrolles.

Cordary D, 1995. Mécanique des sols.

Degoutte."Petit Barrage : recommandation pour la conception, la réalisation et suivi", cemagref édition, 2002.

Djedid A et Bekkouche A et Benyelles Z, "introduction a la mécanique des sols. 1" : département de génie civil, université Tlemcen (Algérie) , 1998. p. 5.

Élaboration d'un catalogue de dégradation des chaussées au Sénégal .école supérieure polytechnique.2012.

Fabien B, stagiaire ADEME Picardie, juin 2012.

Faure M ,1998 .Les Routes, cours de l'ENTPE, Tome II, édition Aléas.

Guetouche ,2015 Mécanique des sols I Cours et exercices.

GTR (Guide technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme) septembre 1992.

Guy D ,2007 Québec. Les granulats.

Ialy Radio D et Terki Hsaine M. "Contribution à l'étude du compactage au laboratoire" mémoire. université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen (Algérie) ,1990.

Kahil A, Meziani F, Gabi S, 2013.Amélioration de la résistance mécanique des chaussées souples par ajout de granulats de pneus recyclés.

Kalli F, 2014. Manuel d'essais routiers .École Nationale Supérieure des Travaux Publics-Alger.

Lamtigui A et BENDANI Y, 2014. Étude bibliographique valorisation des laitiers d'aciéries en génie civil. École des mines de Douai.

LCPC, 1987. Essai de cisaillement a la boîte, Laboratoire centrale des ponts et chaussées.

LCPC, 1994.Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide technique.

Léreau J, 2006."Cours en génie civil chapitre 3 compactage des sols": INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE TOULOUSE, 2006.

Lerouil S, P Magman J et Taven F. (Remblais sur argiles molles) LCPC et technique et documentation, Lavoisier ,1983.

Malek A. Caractéristiques physico-chimiques du laitier de haut fourneau. Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques-Annaba 29 et 30 Nov.1998.p17-25.

Melbouci B ,2016.Étude comparative du traitement du sol marneux a la chaux et au ciment dans les couches de forme des chaussées.

Moletta.R ,2009. Le traitement des déchets. Paris(France) Lavoisier, 685p.

Mourad Behim, 2005.sous produit industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'EL HADJAR, dans les matériaux à matrice cimentaire, thèse doctorat en génie civil. Université Badji mokhtar Annaba.

NF EN 13-285 (2010). Graves non traitées – Spécifications.

NF P 98-113. Assises de chaussées - Méthodologie d'étude en laboratoire des matériaux traités aux liants hydrauliques.

NF P 98-116. Assises de chaussées - Graves traitées aux liants hydrauliques.

NF P 98-129. Assises de chaussées - Graves non traitées.

NF P 98-170. Béton de structures Constituants du béton routier.

Norme AFNOR C.B.R (NF P 94 – 078).

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

Norme AFNOR masse volumique des particules solides (NF P 94 - 054).

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

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

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

Norme AFNOR dégradabilité des sols (NF P 94-056).

Norme AFNOR fragmentabilité des sols (NF P 94-066).

Robitaille V, Tremblay D, 1997. Mécanique des sols (Théorie et pratique). Edition modulo. Saadani Sabrina, (2002). Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Mémoire de magister en génie civil. Université Mentouri Constantine.

SEMINAIRE ATR-COTITA Sud-ouest .2012.

Saadani S ;(2002). Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Mémoire de magister en génie civil. Université Mentouri Constantine.

SETRA ,1996. Guide pratique courant d'entretien des chaussées.

Techouani Nana J ,1999. (Cours de mécanique des sols. Tome 1, Propriété des sols). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Groupe EIERETSHER.

Torregrossa Emilie ,Timmerans M et Pico J, janvier (2006). Centre de développement des énergies renouvelables ; La valorisation des déchets.

OCDE, septembre (1977). Rapport préparé par un groupe de recherche routière de paris.

Organisation de coopération et de développement économiques utilisation de déchets et sous produits en technique routière.

Varlet H, "Barrages, Réservoirs : barrages en terre et en enrochements. Paris : Eyrolles, 1966. p. 36 -58. Tome III.