

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

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



MEMOIRE DE MASTER RECHERCHE

Spécialité : Génie Civil
Option : Géotechnique

Thème

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

Présenté par : Mr MESSANI Yahia

Devant le jury composé de :

Mr MELBOUCI Bachir

Professeur à l'UMMTO

Président.

Mme OUKID Ouiza

Maitre de conférence B à l'UMMTO

Examinatrice.

Mr BOUDLAL Omar

Maitre de conférences A à l'UMMTO

Promoteur.

Promotion : 2017 / 2018

SOMMAIRE

Remerciements.

Dédicaces

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
a. Le sol support.....	4
b. La couche de forme.....	4
I.3.2. La couche d'assise.....	4
a. Couche de fondation.....	4
b. Couche de base	4
I.3.3. Couche de surface.....	5
a. La couche de roulement.....	5
b. La couche de liaison.....	5
I.4. Les différents types de chaussées.....	5
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. Paramètres pris en compte pour le dimensionnement d'une chaussée.....	7
• Le trafic.....	7
• L'environnement.....	7
• Le sol support.....	8
• Les matériaux.....	8
I.6. Matériaux utilisé.....	8
I.6.1. Les granulats.....	8

I.6.2. Les caractéristiques exigées des granulats	8
I.6.3. Les graves non traité 0/D (GNT).....	8
I.6.4. Les matériaux d/D (pierres cassées).....	9
I.7. Dégradation des chaussées.....	9
I.7.1. Cause de dégradations des chaussées.....	9
I.7.1.1. Le trafic.....	9
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 des chaussées.....	10
I.7.2.1. Les déformations.....	10
I.7.2.2. Les fissurations.....	11
I.7.2.3. Les arrachements.....	13
I.7.2.4. Les remontées.....	14
I.8. Conclusion.....	15

CHAPITRE II : VALORISATION DES DECHETS

II.1 Introduction.....	16
II.2. Origine de la production de déchets	16
II.3. Définition du recyclage.....	16
II.3.1. Définition d'un déchet.....	17
II.3.2. Pourquoi en recycle ?.....	17
II.4. Impacts du recyclage sur l'environnement.....	17
II.5. Les grandes catégories de déchets.....	18
II.5.1. Déchets ménagers et assimilés.....	18
II.5.2. Déchets non dangereux des activités économiques.....	18
II.5.3. Déchets dangereux des activités économiques.....	19
II.5.4. Déchets inertes.....	19
II.5.5 : Déchet sidérurgiques.....	20
II.6. Production de déchets solides dans le monde	20
II.7. Valorisation des déchets (Torregrossa et al, 2006).....	20
II.8. Déchets et recyclage en Algérie.....	21
II.9. Déchets valorisables en génie civil.....	22
II.9.1. Pneus usagés.....	22
II.9.2. Déchets des chantiers de BTP.....	22
II.9.3. Laitiers sidérurgiques.....	23
II.9.3 .1. Différente catégorie de laitier sidérurgique.....	23
a. Laitier d'aciérie de conversion (LAC).....	23

b. Laitiers d'aciéries électriques.....	24
c. Laitier du haut fourneau.....	24
II.9.3.2.Génération du laitier de haut-fourneau.....	25
• Laitier de haut-fourneau vitrifié (granulé ou bouleté).....	26
• Laitier de haut-fourneau cristallisé.....	26
II.9.3.3. Production du laitier de haut-fourneau cristallisé.....	27
II.9.3.4.Composition chimique du laitier cristallisé.....	27
II.9.3.5.Analyse minéralogique de Laitier cristallisé d'EL HEDJAR.....	28
II.9.3.6.Contrôle de la qualité du laitier cristallisé.....	28
II.10.Valorisation de laitier à travers le monde.....	29
II.10.1.Valorisation de laitier en Algérie.....	29
II.10.2. valorisation de laitier cristallisé dans les travaux routiers et en génie civil.....	29
a. Dans le béton.....	29
b. Construction des assises de chaussées.....	30
c. Ballast pour voies ferrées.....	30
d. Autres utilisations.....	30
II.11.Conclusion.....	31
 CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX ET PREPARATION DES ECHANTILLONS	
III.1. Introduction.....	32
III.2. Les matériaux utilisés.....	32
III.3. Les schistes.....	34
III.3.1.Définition des schistes.....	34
III.3.2 Les schistes de la Grande Kabylie.....	34
III.3.3. Les différents types de schiste.....	36
III.3.3.1. Schistes du métamorphisme général très faible.....	36
III.3.3.2. Schistes du métamorphisme général faible (Epizonal).....	36
III.3.3.3. Schistes du métamorphisme général plus fort (Catazonal).....	36
III.3.3.4. Schistes du métamorphisme de contact.....	36
III.4.Essais d'identification.....	37
III.4.1. Teneur en eau (w).....	37
III.4.2. Les masses volumiques.....	38
III.4.2.1.La masse volumique sèche (ρ_d) par pesée hydrostatique	38
III.4.2.2.La masse volumique humide ρ_h	39
III.4.2.3.La masse volumique des particules solide ρ_s (pycnomètre).....	39
III.4.2.4.Indice des vides, degré de saturation et porosité.....	40
a. Indice des vides (e).....	40

b. Degré de saturation Sr.....	41
c. Porosité n.....	41
III.5.Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051).....	42
III.5.1.Définition.....	42
III.5.2.But de l'essai.....	42
III.5.3.Appareillage d'usage courant.....	43
III.5.4.Détermination de la limite de liquidité WL.....	43
III.5.5.Détermination de la limite de plasticité Wp.....	44
III.5.5.1.Définition.....	44
III.5.5.2.L'indice de plasticité Ip.....	44
III.6.Analyse minéralogique par diffraction des rayons X.....	45
III.7.Laitier cristallisé.....	45
III.7.1.Présentation de laitier utilisé.....	45
III.7.2.Quelques propriétés de laitier cristallisé d'EL HADJAR.....	46
III.8.Préparation des échantillons.....	46
III.9.Conclusion.....	47
 CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES	
IV.1.Introduction.....	48
IV.2. Définition du compactage.....	48
IV.2.1. Objectif du compactage.....	48
IV.3.Classification des sols en vue du compactage.....	49
IV.3.1. Groupe I : Enrochements.....	49
IV.3.2. Groupe II : Sables et graviers.....	49
IV.3.3. Groupe III : Limons, sols siliceux.....	49
IV.3.4. Groupe IV : Argiles.....	49
IV.4. Les facteurs qui influencent le compactage.....	49
IV.4.1. Energie de compactage.....	49
IV.4.2. Teneur en eau.....	50
IV.4.3.Nature du sol.....	51
IV.5. Les essais de compactage au laboratoire.....	51
IV.5.1. L'essai Proctor.....	52
IV.5.2.L'essai Proctor Normal (PN).....	52
IV.5.3.L'essai Proctor Modifié (PM).....	52
IV.6. L'essai Proctor modifié (PM).....	53
IV.6.1.But de l'essai (NF P 94-093).....	53
IV.6.2.Principe de l'essai.....	53

IV.6.3. Matériels utilisé.....	53
IV.6.4.Essais réalisés.....	54
IV.6.5. Expression des résultats.....	54
• Schiste + 0 % de laitier.....	55
• Schiste + 30% de laitier.....	55
• Schiste + 40% de laitier.....	56
• Schiste + 50% de laitier.....	57
• Courbe comparative de tous les échantillons.....	57
• Densités sèches maximales pour les mélanges de schiste + laitier cristallisé	58
• Teneur en eau optimales pour les mélanges de schiste + laitier cristallisé	59
IV.7. Essais de portance CBR (California Bearing Ratio) NF P 94-078.....	60
IV.7.1.Définition.....	60
IV.7.2.But de l'essai.....	60
IV.7.3.Principe de l'essai.....	60
IV.7.4. Matériel utilisé.....	61
IV.7.5. Mode opératoire.....	62
IV.7.5.1.Préparation des échantillons.....	62
IV.7.5.2. Détermination de l'IPI.....	62
IV.7.5.3. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif)	62
IV.7.6. Expression des résultats.....	63
IV.7.6.1. Interprétation des résultats (CBR).....	63
IV.7.6.2. Interprétation des résultats (CBRimm).....	64
IV.7.6.3. Interprétation des résultats (CBR et CBRimm).....	66
IV.8.Conclusion.....	66
 CHAPITRE V : ESSAIS MICRO DEVAL, LOS ANGELES, DEGRADABILITE ET FRAGMENTABILITE	
V.1.Introduction.....	67
V.2.Essai micro Deval.....	67
V.2.1.Définition et But de l'essai (NF P18-572).....	67
V.2.2 principe de l'essai.....	67
V.2.3 Matériaux utilisées.....	68
V.2.4 résultats de l'essai.....	69
V.3 Essai Los Angeles.....	70
V3.1 Définition et but de l'essai (NF P18 573).....	70
V.3.2. Principe de l'essai.....	71
V.3.3.Matériaux utilisées.....	72

V.3.4.Résultats des essais.....	72
V.4.Essai de dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-056).....	74
V.4.1 principe de l'essai	74
V.4.2.Exécution de l'essai.....	74
V.4.3.Matériaux utilisé	74
V.5.Essai de fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066).....	77
V.5.1.Principe de l'essai.....	77
V.5.2.Exécution de l'essai.....	77
V.5.3.Matériaux utilisés.....	78
V.5.4.Résultats des essais.....	78
V.6.Conclusion.....	80

CHAPITRE VI : ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE DE CASAGRANDE

VI.1.Introduction.....	81
VI.2. Notion de résistance au cisaillement.....	81
VI.3. But de l'essai.....	82
VI.4. Paramètres c et ϕ pour différents types de sols et différents types d'essais.....	82
• Cas des Sols pulvérulents.....	82
• Cas des sols purement cohérents.....	83
• Cas des sols cohérents et frottant.....	83
VI.5.Type d'essais peuvent être réalisés à la boite de cisaillement.....	84
VI.6. Facteurs influant sur les paramètres de résistance au cisaillement.....	85
VI.7.Avantages et inconvénients de la boite de cisaillement.....	85
VI.8.Principe de l'essai de cisaillement à la boite.....	85
VI.9.Mode opératoire.....	86
VI.10.Expression des résultats.....	87
VI.11.Essais réalisés.....	88
VI.12.Présentation des résultats.....	88
VI.13.Conclusion.....	95

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....96

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Remerciements

J'exprime mes remerciements à :

Mr MESSAHEL Hamid sans lui ce travail n'aurais jamais vu le jour.

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

Mr MELBOUCI Bachir, Professeur à l'UMMTO pour avoir accepté de présider le jury.

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

Les responsables du laboratoire MDS de l'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 contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

∞ Dédicace ∞

Tout D'abord je remercie le bon dieu qui m'a donné le courage pour arriver à ce stade de fin d'études Je dédie ce modeste travail :

∞ *Pour la personne la plus chère, qui est absente de l'œil, mais qui est à l'intérieur du cœur, mon cher père.*

∞ *A la femme la plus chère au monde, à celle qui a sacrifié sa jeunesse pour me voir réussir et me voir concrétiser mes projets, à celle à qui je dois tout, Yemma.*

∞ *Mon très cher frère Rezak et sa petite famille*

∞ *A tous mes amis sans exceptions Smail, Hdoudou, Ouzien, Lyes, Sadek, Hakim, Hassen, Nacer, Mounir.*

∞ *A l'équipe MACAHU*

∞ *A ma copine Melissa*

∞ *A Mon ami et binôme de travail Hamoudi Ali*

∞ *A Toute la promotion géotechnique 2017 / 2018*

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

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

Figure I.2 : Chaussée souple (LCPC, 1994).

Figure I.3 : Chaussée bitumineuses épaisses (LCPC, 1994).

Figure I.4 : Chaussée à assise traités aux liants hydrauliques (LCPC, 1994).

Figure I.5 : Chaussée à structure mixte (LCPC, 1994).

Figure I.6 : Chaussée à structure inverse (LCPC, 1994).

Figure I.7 : grave non traité.

Figure I.8 : Matériaux concassés.

Figure I.9 : Orniérage grand rayon.

Figure I.10 : Affaissement de rive.

Figure I.11 : Flache.

Figure I.12 : Fissures transversales.

Figure I.13 : Fissures longitudinales.

Figure I.14 : Faiénçage.

Figure I.15 : Nid de poule nécessitant un bouchage d'urgence.

Figure I.17 : Plumage généralisé.

Figure I.18 : Ressuage sur emploi partiels à l'émulsion.

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.

Figure 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 : Site de prélèvement des échantillons de schiste au niveau de la Grande Kabylie (Algérie).

Figure III.2 : Les granulats de schiste.

Figure III.3 : le laitier cristallisé.

Figure III.4 : Gisement de schiste dans la Grande Kabylie.

Figure III.5 : Coupe géologique du mont Belloua.

Figure III.6 : Granulats de schiste après concassage.

Figure III.7 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN - 13285(2010).

Figure III.8 : Mode opératoire.

Figure III.9 : Exécution de l'essai.

Figure III.10 : Différents états de consistance (Robitaille et Tremblay, 1997).

Figure III.11 : Appareillage d'usage courant.

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

Figure III.13 : Etape de la limite de plasticité.

Figure III.14 : Diffractogramme du schiste étudié.

Figure III.15 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN - 13285(2010).

Figure III.16 : laitier cristallisé.

Chapitre IV

Figure IV.1 : Influence de l'énergie de 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 essai de compactage.

Figure IV.5 : Appareillage Proctor.

Figure IV.6 : Matériau schiste préparé pour essai Proctor.

Figure IV.7 : Courbe Proctor (schiste + 0% de laitier).

Figure IV.8 : Courbe Proctor de schiste + 30% de laitier.

Figure IV.9 : Courbe Proctor de schiste + 40% de laitier.

Figure IV.10 : Courbe Proctor de schiste + 50% de laitier.

Figure IV.11 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

Figure IV.12 : Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de laitier.

Figure IV.13 : Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de laitier cristallisé.

Figure IV.14 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

Figure IV.15 : Presse CBR.

Figure IV.16 : Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement.

Figure IV.17 : Courbes enfoncements-forces (cas des IPI).

Figure IV.18 : Evolution des indices CBR en fonction des pourcentages de laitier.

Figure IV.19 : Courbes enfoncements-forces (cas des CBR imm).

Figure IV.20 : Evolution des CBR imm en fonction des pourcentages de laitier.

Figure IV.21 : Courbes comparatives des IPI et CBR_{imm} des différents pourcentages de laitier.

Chapitre V

Figure V.1 : Machine Micro Deval.

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

Figure V.3 : Courbe comparative des essais micro Deval.

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

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

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

Figure V.7 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste seul).

Figure V.8 : Courbes granulométriques avant et après imbibition du schiste +30% laitier.

Figure V.9 : Courbes granulométriques avant et après imbibition du schiste +40% laitier.

Figure V.10 : Courbes granulométriques avant et après imbibition du schiste +50% laitier.

Figure V.11 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste +0% laitier).

Figure V.12 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage du schiste + 30% laitier.

Figure V.13 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage du schiste + 40% laitier.

Figure V.14 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage du schiste + 50% laitier.

Chapitre VI

Figure VI.1 : Courbe de contraintes-déformations.

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

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

Figure VI.4 : Droite intrinsèque des sols purement cohérents.

Figure VI.5 : Droite intrinsèque pour le cas des sols cohérents et frottant.

Figure VI.6 : Principe de la boîte de cisaillement.

Figure VI.7 : Appareillage de l'essai de cisaillement à la boîte.

Figure VI.8 : Échantillon après cisaillement.

Figure VI.9 : Courbes de variation du volume.

- Figure VI.10 : Droite intrinsèque (schiste seul).
- Figure VI.11 : Courbes contraintes-déformations.
- Figure VI.12 : Courbes contraintes-déformations.
- Figure VI.13 : Droite intrinsèque (schiste + 30% laitier).
- Figure VI.14 : Courbes de variation du volume.
- Figure VI.15 : Courbes contraintes-déformations.
- Figure VI.16 : Droite intrinsèque (schiste + 40% laitier).
- Figure VI.17 : Courbes de variation du volume.
- Figure VI.18 : Courbes contraintes-déformations.
- Figure VI.19 : Droite intrinsèque (schiste + 50% laitier).
- Figure VI.20 : Courbes de variation du volume.
- Figure VI.21 : Evolution de la cohésion en fonction de la teneur en laitier.
- Figure VI.22 : Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de la teneur en laitier
- Figure VI.23 : Courbes comparatives à $\sigma = (100 \text{ KPa})$.
- Figure VI.24 : Courbes comparatives à $\sigma = (200 \text{ kPa})$.
- Figure VI.25 : Courbes comparatives à $\sigma = (300 \text{ kPa})$.
- Figure VI.26 : Courbes comparatives à $\sigma = (400 \text{ kPa})$.

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 en Algérie.

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 de laitier a travers au monde.

Tableau II.7 : Utilisation des laitiers (OCDE ,1977).

Chapitre III

Tableau III.1 : Détermination de la teneur en eau.

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

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

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

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

Tableau III.6 : Résumés des résultats précédents.

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

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

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

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

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

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Conditions des essais Proctor normal et Modifié.

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

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 30% de laitier.

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 40% de laitier.

Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 50% de laitier.

Tableau IV.6: Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.

Tableau IV.7 : Résultats des essais CBR immédiat.

Tableau IV.8 : Résultats des essais CBR immergé.

Figure IV.9 : Résumé des résultats d'essai CBR (CBR et CBR imm).

Chapitre V

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

Tableau V.2 : Calcul du coefficient 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 : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire.

Tableau V.7 : Calcul du coefficient Los Angeles.

Tableau V.8 : Calcul du coefficient Los Angeles.

Tableau V.9 : Calcul du coefficient Los Angeles.

Tableau V.10 : Calcul du coefficient Los Angeles.

Tableau V.11 : Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

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

Tableau V.13 : Classification des matériaux rocheux.

Tableau V.14: Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR.

Chapitre VI

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 tamisas cumulés ;
D₃₀ : Diamètre correspondant à 30% des tamisas cumulés ;
D₆₀ : Diamètre correspondant à 60% des tamisas 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

Les infrastructures de transport, parmi lesquelles se distinguent les routes, sont conçues et mises en œuvre selon des critères techniques et économiques assez précis. En sus de son rôle social, une route doit satisfaire ses objectifs techniques tout en étant la moins coûteuse possible.

La croissance socio-économiques impose la préservation et la rénovation des moyens de communication notamment dans le domaine des travaux publics. Par souci de maintenir en phase motorisation et infrastructure de transport, et répondre aux exigences de confort et sécurité de transport, un véritable programme de modernisation et d'élargissement du réseau routier est reconnu impératif.

Ceci nécessite une demande en agrégats de plus en plus croissante au point où les carrières restent parfois incapables de satisfaire les besoins nationaux. Dans le bâtiment, la demande s'élève annuellement à plusieurs millions de tonnes de mètre cube de sable et de gravier. La quantité est certainement, plus importante dans le cas des travaux publics.

Cependant, pour limiter l'extraction abusive des matériaux naturels classiques, très utilisés dans de vastes programmes de construction, le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme solution d'avenir. Elle permet simultanément de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Plusieurs matériaux ont fait l'objet de recyclage et sont utilisés comme matériaux de travaux publics.

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 schiste à différentes proportions de laitier (0 à 50%).

Après avoir identifié les matériaux sélectionnés, les mélanges (schiste +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 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 (schiste et laitier), afin de déterminer les caractéristiques physiques, 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 également 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

Les travaux publics, notamment le domaine des routes, constituent un secteur stratégique, et contribue sensiblement au développement économique et social des pays, des villes, des provinces, et des régions lointaines. Le terme route vient du mot latin «viarupta» qui signifie voie frayée. C'est donc une voie de communication terrestre permettant de relier un point à un autre, un village à un autre, etc.

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

I.2.Définition d'une chaussée

Une chaussée est une structure qui est constituée de plusieurs couches de matériaux mises en œuvre sur un sol terrassé appelé sol support. (LCPC, 1994).

La chaussée moderne a été définie également comme étant « un espace correctement aménagé pour recevoir un ou plusieurs courants de circulation construite dans le respect des règles de l'art. (Franco et al, 1999)

Son rôle est de supporter les sollicitations du trafic (les actions mécaniques des véhicules) et à les reporter sur le terrain de fondations sous-jacent, sans que se produisent des déformations permanentes, ni dans ce terrain, ni dans la chaussée elle-même. (Coquand, 1978).

I.3.Les principales couches de chaussées

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini comme le montre la figure.1 (LCPC, 1994). Tout d'abord le sol terrassé ou sol-support est surmonté généralement d'une couche de forme. L'ensemble sol-couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise. Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise.

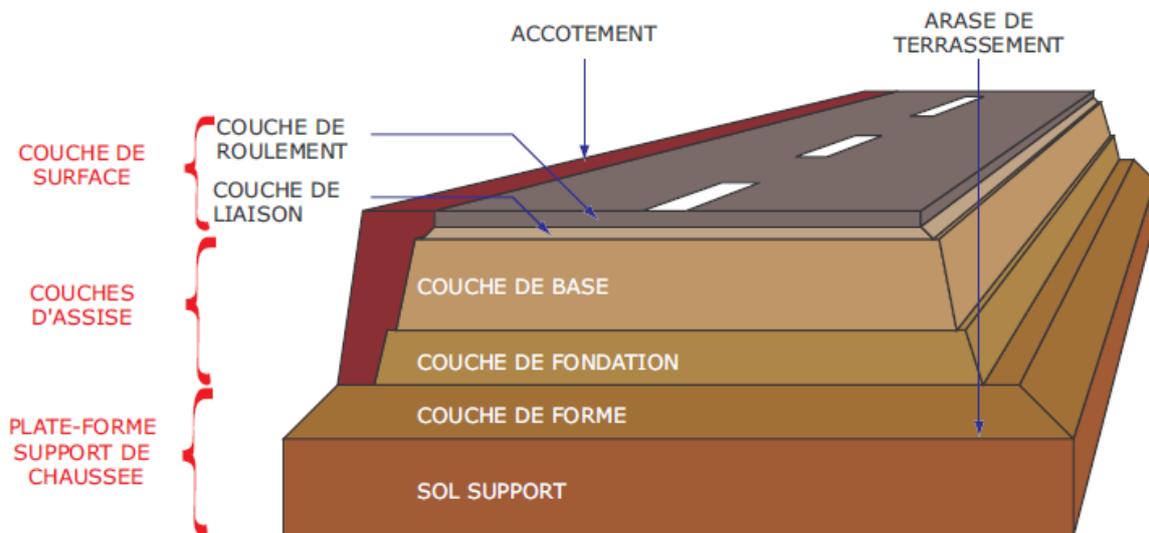


Figure I.1 : Les différentes couches qui constituent une chaussée.

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

Bien que ne faisant pas partie de la chaussée proprement dite, elle participe à son intégrité de part ses fonctions :

- Pendant les travaux, elle contribue au nivellement et assure le trafic d'engins et de véhicules sur le chantier ;
- Elle permet d'égaliser le terrain naturel ;
- Elle protège contre le gel ;
- Elle est constituée de matériaux réutilisés.

I.3.2. La couche d'assise

la couche d'assise est constituée d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elle apporte à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

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.

I.3.3. Couche de surface

Elle est composée de la couche de roulement ainsi que celle de liaison, elle assure la protection des couches d'assises contre les infiltrations d'eau, elle offre aussi un confort de conduite (plus les caractéristiques de surfaces sont bonnes, plus le confort apporté est meilleur).

a. La couche de roulement

C'est la couche supérieure de la chaussée qui est directement exposée aux agressions conjuguées du trafic et du climat, cette couche doit avoir une forte adhérence, une bonne drainabilité ainsi qu'une réduction du bruit de roulement des véhicules.

b. La couche de liaison

L'apport structurel de cette couche est secondaire, sauf dans le cas des chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée. (Brunel, 2005).

I.4. Les différents types de chaussées

I.4.1 Les chaussées souples

On appelle chaussée souple une structure comportant une couverture bitumineuse d'épaisseur inférieure ou égale à 15cm et une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités.

- **Fonctionnement**

Etant donné la faible épaisseur de matériaux traités. Ces structures de chaussées transmettent les contraintes engendrées par la circulation en les atténuant que faiblement.

Dans ces conditions, la répétition de ces contraintes va entraîner une déformation plastique de l'assise granulaire ou du sol et se traduit par des déformations permanentes en surface. (LCPC, 1998)



Chaussées souples:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (< 15 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (20 à 50 cm)
4. Plate-forme support

Figure I.2 : Chaussée souple (LCPC, 1994).

I.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

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

- **Fonctionnement**

La rigidité et la résistance en traction des couches d'assises permettent de diffuser, en les atténuant fortement, les contraintes verticales engendrées par le trafic et transmises au support de l'assise celui-ci est suffisamment protégé pour ne pas subir des déformations port. (LCPC, 1998)



Chaussées bitumineuses épaisses:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (de 15 à 40 cm)
3. Plate-forme support

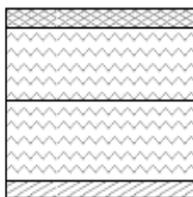
Figure I.3 : Chaussée bitumineuses épaisses (LCPC, 1994).

I.4.3. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures sont qualifiées couramment de “semi-rigides”. Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 15 à 50 cm.

- **Fonctionnement**

La grande rigidité de ces assises s'accompagne d'une faible capacité à se déformer qui les rend sujettes à la fissuration transversale sous l'effet des retraits de prise et thermique. (LCPC, 1998)



Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux (6 à 14 cm)
2. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50 cm)
3. Plate-forme support

Figure I.4 : Chaussée à assise traités aux liants hydrauliques (LCPC, 1994).

I.4.4. Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux traité aux liants hydrocarbonés reposant sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.

Dans ce type de chaussée, l'épaisseur des couches bitumineuses est le plus souvent comprise entre 15 et 25 cm et celle des matériaux traités aux liants hydrauliques entre 20 et 30 cm.

- **Fonctionnement**

La rigidité élevée de ces chaussées limite très fortement les contraintes transmises au sol support. Les risque de déformation plastique de celui-ci sont inexistant tant que l'intégrité de la structure est conservé. La rigidité de couche de fondation la rend sujettes à la fissuration transversale sous l'effet de retrait de prise et thermique. (LCPC, 1998)



Chaussées à structure mixte:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
4. Plate-forme support

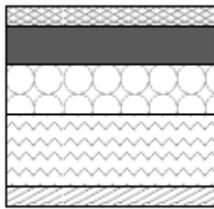
Figure I.5 : Chaussée à structure mixte (LCPC, 1994).

I.4.5. Les chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, 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.

- **Fonctionnement**

La rigidité élevée de la couche de fondation assure la protection de son support contre les contraintes verticale engendré par le trafic. Cette couche de fondation la rend sujettes à la fissuration transversale sous l'effet de retrait de prise et thermique comme les chaussées mixtes. (LCPC, 1998)



Chaussées à structure inverse:

1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
3. Matériaux granulaires non traités (~ 12 cm)
4. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
5. Plate-forme support

Figure I.6 : Chaussée à structure inverse (LCPC, 1994).

I.4.6. Les chaussées en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal ("béton armé continu"), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints.

- **Fonctionnement**

Le module d'élasticité élevée du béton du ciment explique que les efforts induit par le trafic sont essentiellement repris en flexion par la couche de béton. Les contraintes de compression transmises au sol sont donc faible tant que les conditions d'appui des dalles restent bonnes. (LCPC, 1998).

I.5. Paramètres pris en compte pour le dimensionnement d'une chaussée

Selon Coquand, (1978) et Faure, (1998), le dimensionnement d'une chaussée se fait suivants quatre paramètres essentielles, cette dernière doit répondre à la qualité ainsi qu'à la durée de vie recherchée tout en ayant un coût économique.

- **Le trafic:** C'est le premier paramètre qui entre en jeux pour le dimensionnement d'une chaussée, car le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux est directement lié au poids auxquels sera confrontée la chaussée.
- **L'environnement:** Le comportement des structures est influencé directement ou indirectement par les conditions climatiques. La température affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux (module élastique et tenue en fatigue). Elle génère aussi des cycles d'ouverture/fermeture des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques.

- **Le sol support:** Les structures des chaussées reposant sur un ensemble "plate-forme support de chaussée" constitué du sol naturel terrassé, éventuellement traité, surmonté en cas de besoin d'une couche de forme.
- **Les matériaux:** Il est nécessaire que les matériaux utilisés résistent aux sollicitations répétées dues au passage continu des véhicules lourds.

I.6. Matériaux utilisés

I.6.1. Les granulats

Ils peuvent provenir soit :

- De ballastières ou gravières

Ce sont alors des matériaux roulés (de forme arrondie) qui ne peuvent être utilisés en technique routière qu'après avoir été concassés au moins en partie.

- De carrières de roches massives.

Ces roches peuvent être de nature ou d'origine :

- Calcaire (matériaux tendres à durs) ;
- Eruptive (diorites, basalte, etc...) ;
- Sédimentaire (grès, quartzite, etc...).

Ces granulats ont d'excellentes qualités pour les travaux routiers.

I.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 mesuré 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).

I.6.3. Les graves non traité 0/D (GNT)

Les graves non traitées ont une granularité continue. On peut utiliser des 0/20 ou plus généralement des 0/14. Les fines ne doivent pas être argileuses.

- Les avantages
 - Coût faible ;
 - Matériaux largement disponibles et stockables. L'épaisseur de mise en œuvre peut varier de 2 à 15 cm par couche et peuvent convenir aux routes du 2ème groupe.
- Les inconvénients
 - Par température élevée, il est nécessaire d'arroser le support, et maintenir une humidité de la surface jusqu'à son revêtement, un enduit superficiel à l'émulsion;
 - Nécessité d'un traitement de surface avant mise sous circulation ;
 - Matériaux sensibles à la ségrégation (séparation des plus gros éléments du reste du mélange) et aux fortes variations de teneur en eau.

Remarque : Ces matériaux ne conviennent pas aux routes à trafic élevé.



Figure I.7 : Grave non traité.

I.6.4. Les matériaux d/D (pierres cassées)

Ce sont des matériaux concassés non traités dont les plus petits éléments sont supérieurs ou égaux à d et dont les plus gros ont une taille inférieure ou égale à D .

- Les avantages

Matériaux disponibles dans toutes les carrières et stockables.

- Les inconvénients

Ces matériaux, une fois mis en œuvre, comportent beaucoup de vides et nécessitent, avant mise en circulation, un traitement spécifique de surface consommant beaucoup de liant (de 6 à 8 kg d'émulsion par m^2). L'épaisseur maximale de chaque couche doit être voisine de $2,5 D$.

Remarque : Ils ne doivent pas être utilisés pour les routes à trafic élevé. Pour celles du trafic moyen, ils peuvent être employés en sous couche d'enrobé à froid. (SETRA, 1996)



Figure I.8 : Matériaux concassés.

I.7. Dégradation des chaussées

I.7.1. Cause de dégradations des chaussées

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

I.7.1.1. Le trafic

Au passage d'un véhicule la chaussée accuse une petite fatigue. De ce point de vue les poids lourds sont particulièrement agressifs : le passage d'un essieu de 13 tonnes a autant d'effet sur

la structure de la chaussée que celui d'un million de véhicules de tourisme. La répétition des charges entraînent une fatigue générale de la chaussée qui présente alors des dégradations. Le frottement des pneumatiques en mouvement sur la couche de roulement conduit également par usure à son vieillissement. Les efforts tangentiels et transversaux notamment pour les chaussées de giratoire peuvent donner lieu à des dégradations de la chaussée.

I.7.1.2. Les conditions climatiques

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

I.7.1.3. Les malfaçons

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

I.7.1.4. les accidents et les incidents

Des dégradations ponctuelles peuvent être causées suite à des accidents de circulation ou des utilisations anormales du domaine public. (SETRA, 1996).

I.7.2. Types de dégradations des chaussées

On distinguera quatre familles de dégradations des chaussées

I.7.2.1. Les déformations

a. L'orniérage à grand rayon

Déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80 cm de large.



Figure I.9 : Orniérage grand rayon.

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

b. L'affaissement de rive

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



Figure I.10 : Affaissement de rive.

- **Causes** : sous-dimensionnement de l'assise ou sol support ou épaulement/drainage défectueux/retrait hydrique du sol (climat-végétation). Dégradation aggravée par la présence d'eau qui reste stockée dans le bas coté.
- **Évolution** : faïençage au droit de l'affaissement.

c. L'affaissement hors rive (flashe)

Enfoncement ponctuel, flache quand l'affaissement a une forme circulaire.

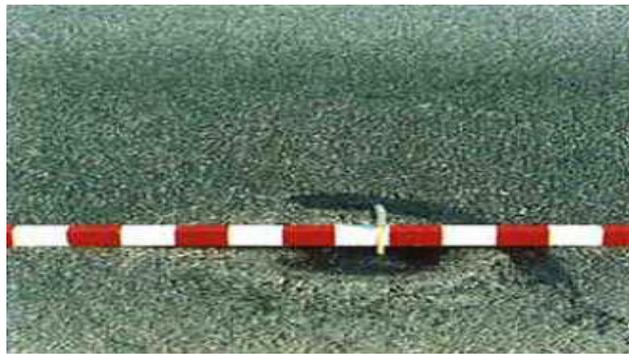


Figure I.11 : Flache.

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

I.7.2.2. Les fissurations

a. La fissuration transversale

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



Figure I.12 : Fissures transversales.

- **Causes** : remontée en surface d'une fissure de prise ou de retrait thermique ou remontée d'un joint transversal de mise en œuvre de l'assise traitée ou joint de reprise d'un tapis d'enrobé.
- **Évolution** : ouverture fine au début puis ramification, épaufrure puis faïençage puis départ de matériaux.

b. La fissuration longitudinale en bande de roulement

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



Figure I.13 : Fissures longitudinales.

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

c. Le faïençage dans les bandes de roulement

Ensemble de fissures entrelacées ou maillées. (Lesbats et Pejouan, 2012)



Figure I.14 : Faiençage.

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

I.7.2.3. Les arrachements

a. Nid de poule

Trou apparaissant à la surface de la chaussée ou stade final d'un faiençage ou bien d'une flache.



Figure I.15 : Nid de poule nécessitant un bouchage d'urgence.

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

b. Pelade

Etat d'un enduit présentant des manques par plaques



Figure I.16 Pelade sur enrobé de faible épaisseur

- **Cause** : trop faible épaisseur de la couche de roulement (1 à 2 cm) avec collage défectueux (absence ou insuffisance de la couche d'accrochage) qui, sous l'action des efforts horizontaux dus au trafic, se décolle du support.
- **Evolution** : arrachement progressif de la couche de surface.

c. Plumage

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



Figure I.17 : Plumage généralisé.

- **Causes**
 - Sous dosage en liant d'un enduit superficiel ;
 - Mise en œuvre dans des conditions atmosphériques défavorables (température trop basse, pluie...) ;
 - Utilisation de gravillons sales ;
 - Compactage insuffisant ;
 - Répandage de liant inadapté ;
 - Remise trop rapide sous circulation.

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

- **Evolution** : arrachement progressif de la totalité des gravillons.

I.7.2.4. Les remontées

a. Le ressuage

Etat d'un enduit caractérisé par la remontée de liant en plaque recouvrant la mosaïque



Figure I.18 : Ressuage sur emploi partiels à l'émulsion.

- **Causes**
 - Surdosage de bitume sur des emplois partiels à l'émulsion ou sur des enduits ;
 - Enfouissement des granulats dans un support bitumineux trop «mou» ou trop «gras» (enrobé trop riche en mastic) ;
 - Délai insuffisant entre les réparations localisées à l'émulsion et la réalisation de l'enduit.
- **Evolution** : Ces phénomènes sont aggravés par forte chaleur Sous circulation, l'ensemble de la couche de roulement peut être arraché par les véhicules par collage aux pneumatiques. (SETRA, 1996).

I.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 apparait est liée également à la nature et l'épaisseur des matériaux utilisés et à leur condition de fabrication et leur mise en œuvre.

Ainsi, le concepteur doit prendre certaines précautions lors du choix des matériaux constituant les différentes couches. Ces matériaux peuvent être d'origines naturelles ou artificielles, à savoir les matériaux industriels (recyclés) constituant généralement les déchets de fabrications de différents produits (déchets plastiques, débris de construction et de démolition, débris de verre, laitier du haut fourneau...).

Le chapitre suivant est consacré, à l'évolution de la filière du recyclage ainsi que les différents matériaux recyclés, réutilisés dans les différents domaines de constructions, particulièrement la construction routière.

CHAPTRE 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 Saadani, (2002) 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'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15g de bois.

II.5. Les grandes catégories de déchets

Selon ADEME, (2014) 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 économique 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

Selon Torregrossa et al, (2006) 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.

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 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 déconstruction. 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 trempe 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

II.9.3.2.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.

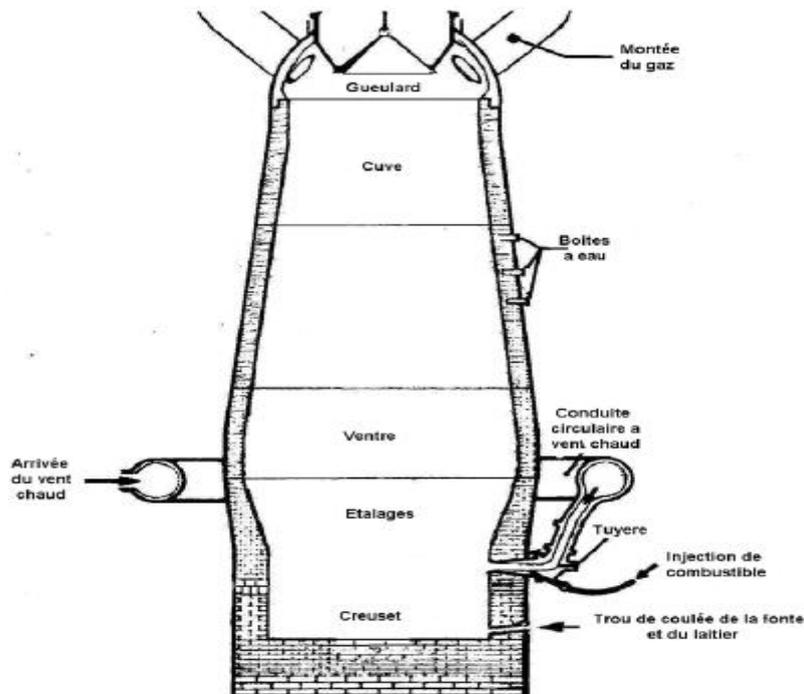


Figure II.10 : Coupe schématique du haut fourneau.

- **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 (trempage) 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'haut-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.

II.9.3.3. 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.

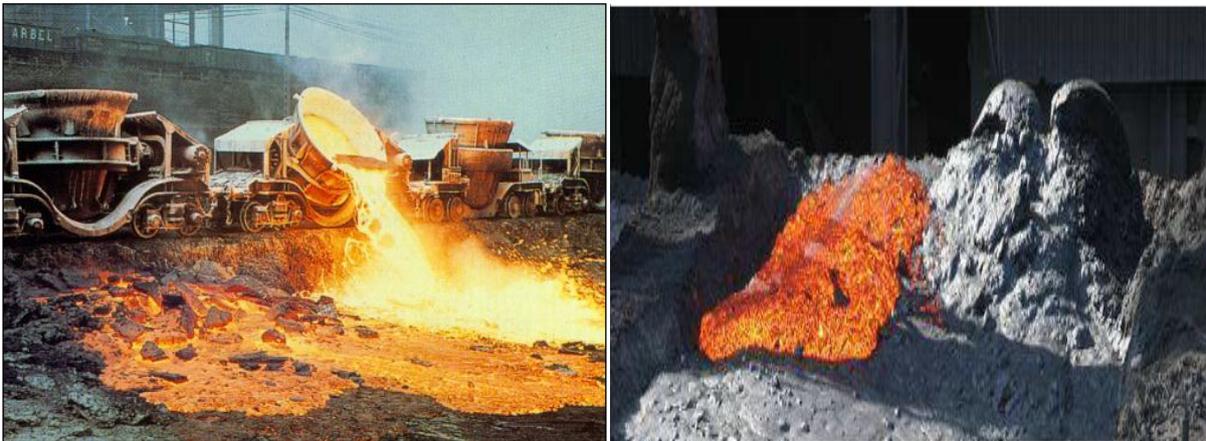


Figure II.13. Refroidissement de laitier cristallisé.

II.9.3.4. 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 désulfurants 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

II.9.3.5. 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.

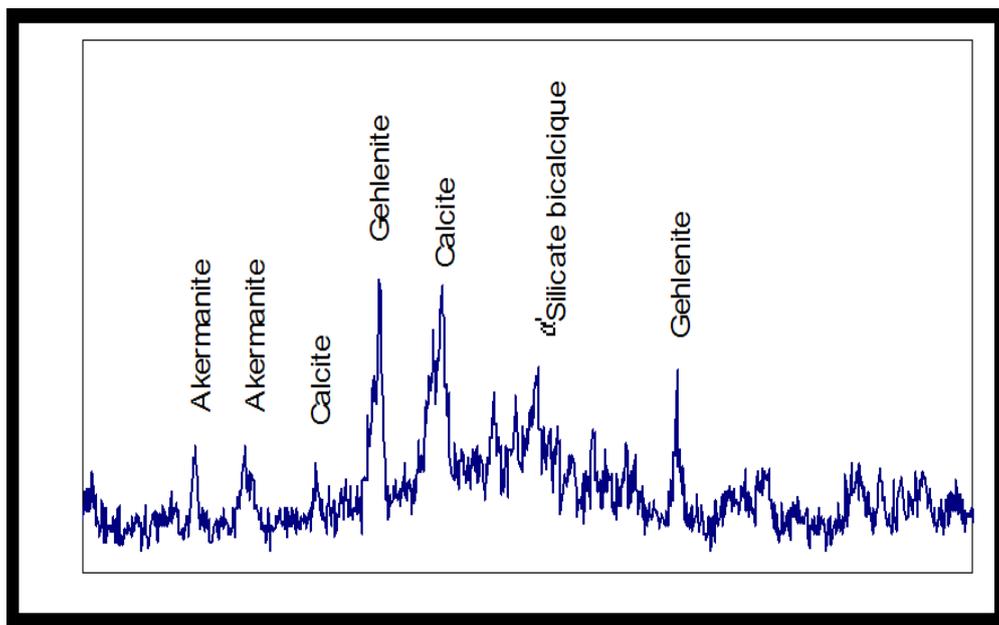


Figure II.14. Diffractogramme aux rayons X d'un laitier cristallisé (Malek, 1988).

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

Les minéraux	Désignation	Formule chimique
Gehlénite	C ₃ AS ₂	3CaO.Al ₂ O ₃ .2SiO ₂
Akermanite	C ₂ MS ₂	2CaO.MgO.2SiO ₂
Calcite	CC	CaCO ₃
α Silicate bicalcique	α C ₂ S	2CaO.SiO ₂

II.9.3.6. 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.6 : Utilisation de laitier a travers le monde (OCDE, 1977)

	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.7 : 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

II.11.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 ET PREPARATION DES ECHANTILLONS

III.1. Introduction

Il est évident que le monde des matériaux est très vaste et qu'on manque souvent de critères pour les différencier avec certitude. Ainsi, ayant en main un sol quelconque, il est souvent difficile d'affirmer. Le but n'est pas d'examiner toutes les méthodes possibles mais plutôt de donner quelques pistes simples pour permettre rapidement et sans moyens lourds, d'identifier la famille à laquelle appartient le matériau.

L'identification des matériaux peut, bien sûr, se pratiquer dans des laboratoires convenablement équipés en moyens scientifiques pour déterminer un ensemble de propriétés (physiques, chimiques, minéralogiques,...) qui permettent de le caractériser et de faciliter la compréhension de son comportement. Ces propriétés sont déterminées par des essais de laboratoire, appelés «essais d'identification» :

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

III.2. Les matériaux utilisés

Dans ce travail, les mélanges étudiés sont composés de deux matériaux essentiels, à savoir les granulats de schistes et laitiers. Le schiste étudié est extrait au niveau de la wilaya de Tizi Ouzou dans le massif du Belloua, situé à 10 km environ (Figure III.1). Il est extrait sous forme de blocs sur site, ensuite concassé par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée.

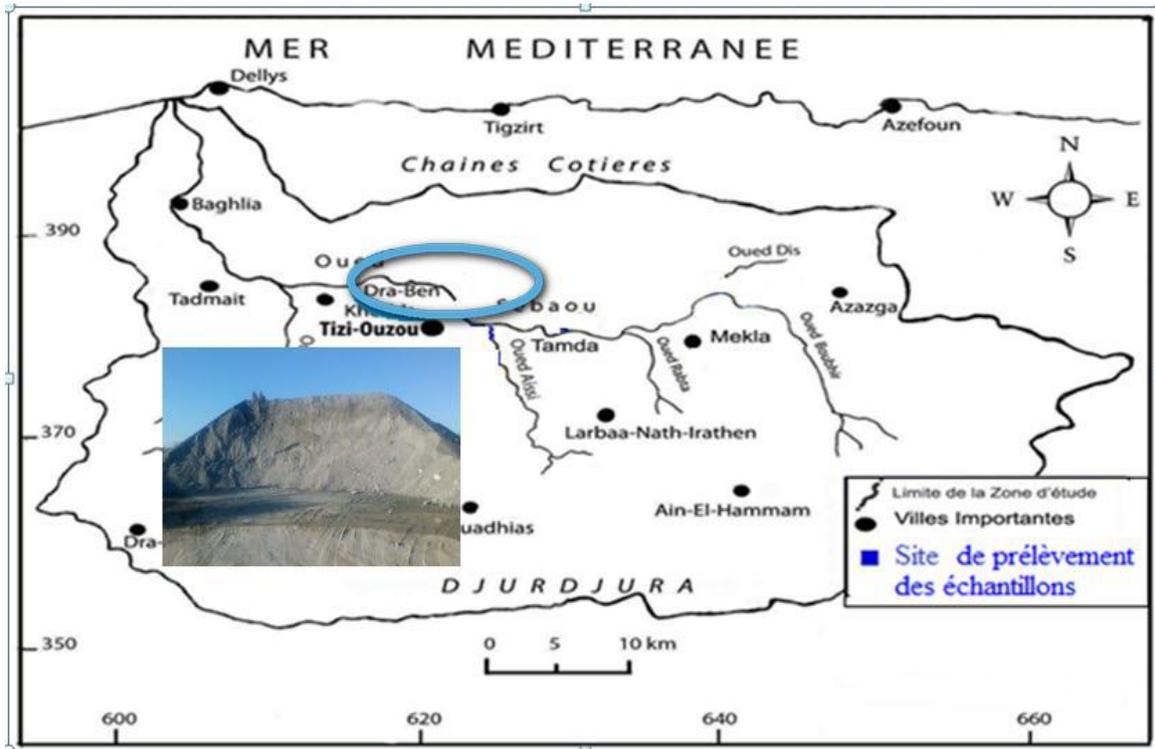


Figure III.1 : Site de prélèvement des échantillons de schiste au niveau de la Grande Kabylie (Algérie)

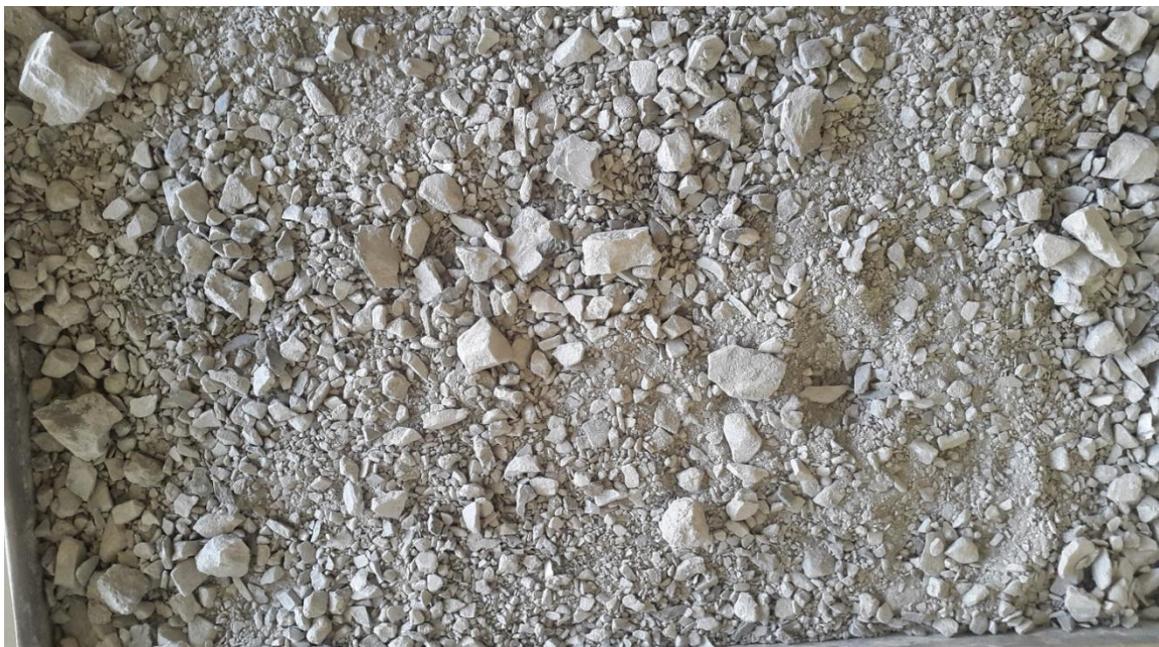


Figure III.2 : Les granulats de schiste.

- Le laitier utilisé est ramené du complexe sidérurgique d'EL HEDJAR à Annaba.



Figure III.3 : le laitier cristallisé.

III.3. Les schistes

III.3.1. Définition des schistes

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

La schistosité est un feuilletage présenté par certaines roches, acquis en profondeur, suivant des plans parallèles, sous des contraintes tectoniques de pression. Les roches présentant une schistosité sont qualifiées de schistes et peuvent plus ou moins facilement se débiter en dalles ou feuillets de pierres plates. (François, 2016)

III.3.2 Les schistes de la Grande Kabylie

Le massif ancien de la Grande Kabylie est constitué d'un socle gneissique fortement métamorphique et d'une couverture schisteuse épimétamorphique (Brossière, 1971) ; ces deux ensembles sont eux même recouverts en discordance par une série peu ou non métamorphique (Brossière et Raymond, 1972). Cette couverture est constituée essentiellement d'un ensemble de sericitoschistes et de chloritoschistes présentant des passées gréseuses.



Figure III.4 : Gisement de schiste dans la Grande Kabylie.

Les études de PERON (1867) sur la géologie de la Grande Kabylie permettent de montrer des détails importants sur les formations de schistes cristallins dans les massifs montagneux de la région. A titre d'exemple, la coupe géologique du mont Belloua présentée sur la figure III.5 :

COUPE DU DJEBEL BELLOUA, A L'EST DE TIZI-OUZOU

prise en suivant la gorge de l'oued Sebaou.

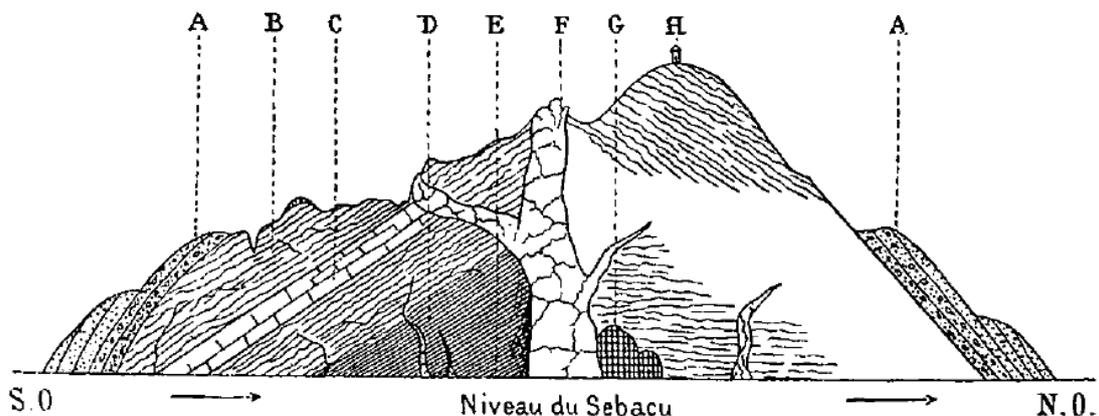


Figure III.5 : Coupe géologique du mont Belloua.

A. Poudingues et grès de l'étage tertiaire miocène, en couches très redressées, qui viennent s'appuyer sur les micaschistes.

B. Schistes cristallins d'une grande puissance. Micaschistes bleuâtres avec nombreux filons et amas de quartz blanc amorphe ; phyllades satinées, feuilletées, grises et jaunâtres, etc.

C. Grands bancs de calcaire cipolin, saccharoïde, marmoréen par places, blanc ou bleuâtre.

D. Gneiss schisteux, nettement stratifié.

E. Gneiss graniloïde, passant en bas à un véritable granit ancien compact et massif.

F. Roche graniloïde éruptive en grands filons ramifiés traversant les gneiss, les cipolins et les micaschistes. La roche est blanche et passe aux pegmatites et aux hyalomictos. De nombreux

cristaux de tourmaline noire sont semés dans la roche ainsi que des grenats. Le mica s'y trouve abondamment en larges lames et en paquets feuilletés ; il est souvent noir.

G. Roche amphibolique, verdâtre, compacte, sans cristaux apparents.

H. Marabout du djebel Belloua, sur les micaschistes.

III.3.3. Les différents types de schiste

III.3.3.1. Schistes du métamorphisme général très faible

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

- Schiste ardoisiers

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

- Schistes bitumineux

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

III.3.3.2. Schistes du métamorphisme général faible (Epizonal)

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

- Schistes sériciteux ou satinés

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

- Schistes talqueux

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

- Schistes chloriteux

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

- Schistes lustrés

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

III.3.3.3. Schistes du métamorphisme général plus fort (Catazonal)

- Micaschistes

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

III.3.3.4. Schistes du métamorphisme de contact

- Schistes tachetés

Schistes dans lesquels le métamorphisme de contact à basse intensité a développé des minéraux de néoformation qui se concernent en agrégats ayant l'aspect de taches. Ces roches sont, en général, de couleur grise à noire. (Pierre, 1953), (Melbouci, 2006)

III.4. Essais d'identification

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



Figure III.6 : Granulats de schiste après concassage et tamisage.

Après avoir reconstitué, ses échantillons (schiste et laitier) en les a adaptés à la courbe suivante :

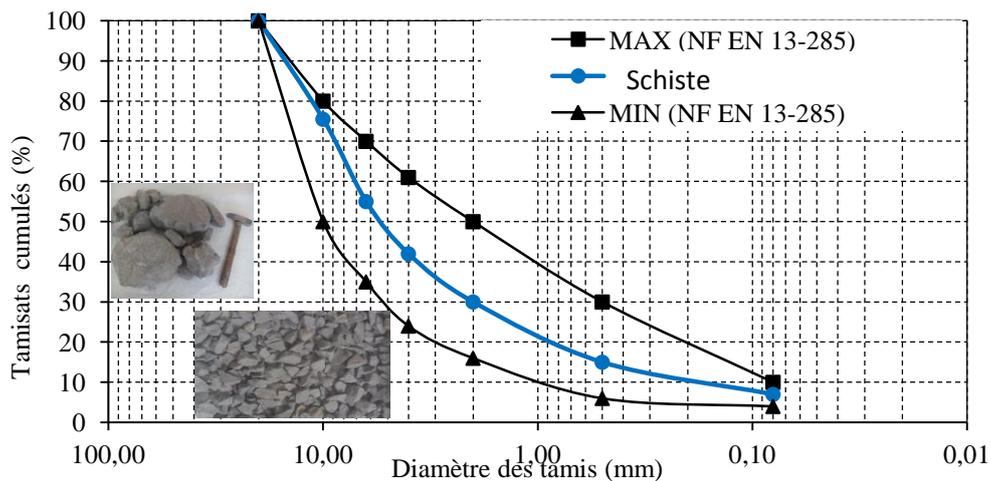


Figure III.7 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-285(2010).

III.4.1. Teneur en eau (w)

La teneur en eau est le quotient de la masse de l'eau interstitielle (mw) par la masse des grains solide ; est déterminée selon la norme NF P94-050 (méthode par étuvage). L'essai de détermination de teneur en eau consiste à peser un échantillon humide puis le passer à l'étuve à 75°C pendant 24 heures le peser une autre fois à sec. Donc la teneur en eau pondérale est calculée comme suit : $w = (M_h - M_s) / M_s$

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

Tableau III.1 : Détermination de la teneur en eau.

Matériau	W (%)
Matériau schiste	2.05

Teneur en eau moyenne $w = 2.05 \%$.

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

III.4.2. Les masses volumiques

II.4.2.1. La masse volumique sèche (ρ_d) par pesée hydrostatique

La masse volumique humide d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-064. 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.8 : 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 = $0,88 \text{ g/cm}^3$;

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

- **Présentation des résultats**

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

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

Paramètre	Échantillons		
	1 ^{ère} essai	2 ^{ème} essai	3 ^{ème} essai
Masse de la roche (M_r)	236	124.8	135.8
Masse de la roche paraffinée à l'air libre (M_{rp})	265.2	135.2	144.3
Masse de la roche paraffinée dans l'eau (M_{rp})	118.5	65.3	70.2
Masse volumique sèche ρ_d	2.07	2.14	2.10
Moyenne	2.10 g/cm ³		

$$\rho_d = 2.10 \text{ g/cm}^3$$

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

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

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

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

II.3.2.2.La masse volumique humide ρ_h (NF P 94-053)

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

Avec: w: Teneur en eau du matériau ;

ρ_d : Masse volumique sèche.

L'application numérique donne : $\rho_h = 2.10 \times (1 + 0.0205)$

$$\rho_h = 2.14 \text{ g/cm}^3$$

III.3.2.3.La masse volumique des particules solide ρ_s (pycnomètre)

La détermination de la masse volumique des particules solides est effectuée selon la norme NF P94-054. 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.9 : Exécution de l'essai

La masse volumique des particules solides est calculée à l'aide de 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 sont représentés dans le tableau III.3.

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

M1	202
M2	227
M3	775.2
M4	760
ρ_s	2.55 g/cm ³

III.3.2.4. Indice des vides, degré de saturation et porosité

a) Indice des vides (e)

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

Il est déterminé par la relation suivante :

$e = V_v/V_s$ (l'indice des vides peut être supérieure à 1).

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés (ρ_s et ρ_d) selon la formule : $e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1$

Vu que les masses volumiques sont déterminées, on déduit l'indice des vides par la deuxième relation. $e = 0.214$

b) Degré de saturation S_r

Le degré de saturation, noté S_r , 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 :

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

$$S_r = 24.42\%$$

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

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

D'après le tableau III.4 le Schiste étudié est donc dans un état légèrement humide.

c) Porosité n

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

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

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

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

$$n = 0.17$$

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

Tableau III.6 : Résumés des résultats précédents.

w (%)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	ρ_h (g/cm ³)	e	Sr (%)	n
2.05	2.55	2.10	2.14	0.214	24.42	0.17

III.4.Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051)

III.4.1.Définition

La consistance d'un sol varie en fonction de la teneur en eau : parfaitement sec, le matériau serait pulvérulent. Au-dessus d'une certaine teneur, le sol est maniable à un certain degré, il a les caractéristique d'une pâte à modeler. Pour une teneur plus importante, il forme un liquide visqueux qui ne conserve pas la forme qu'on lui a donnée.

La détermination suivant un procédé normalisée de ces teneurs caractéristiques appelées limite d'Atterberg, est un élément important qui permettra de prévoir le comportement des sols pendant les travaux de terrassement, en particulier sous l'action des variations des teneurs en eau.

Les limites d'Atterberg sont :

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

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

- Indice de plasticité **Ip** : cet indice définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité $I_p = W_L - W_p$
- Indice de consistance **Ic** : cet indice prend en compte la teneur en eau W du sol pour la fraction inférieure à $400\mu\text{m}$.

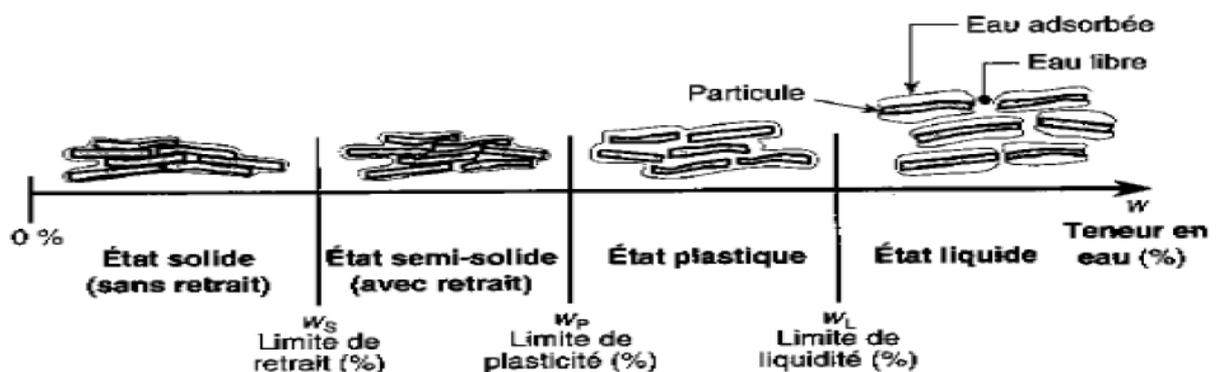


Figure III.10 : Différents états de consistance (Robitaille et Tremblay, 1997).

III.4.2.But de l'essai

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

III.4.3.Appareillage d'usage courant

Spatule, truelle et un marbre pour le malaxage du mortier ;

- Une pissette ;
- Une balance de précision de préférence automatique ;
- Une étuve avec thermostat permettant de la régler à 105 C°;
- Un tamis d'ouverture 400 μ m .



Figure III.11 : appareillage d'usage courant

III.4.4.Détermination de la limite de liquidité WL

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



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

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

Tableau III.7 Détermination de la limite de liquidité.

N° de l'essai	1	2	3
Nombre de coups	16	21	35
Teneur en eau %	21.2	18.71	19.34
WL	20.01	18.31	20.14

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

$$\frac{\sum WL\%}{3} = 19.48$$

$$WL = 19.48$$

III.4.5. Détermination de la limite de plasticité W_p

III.4.5.1. Définition

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

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

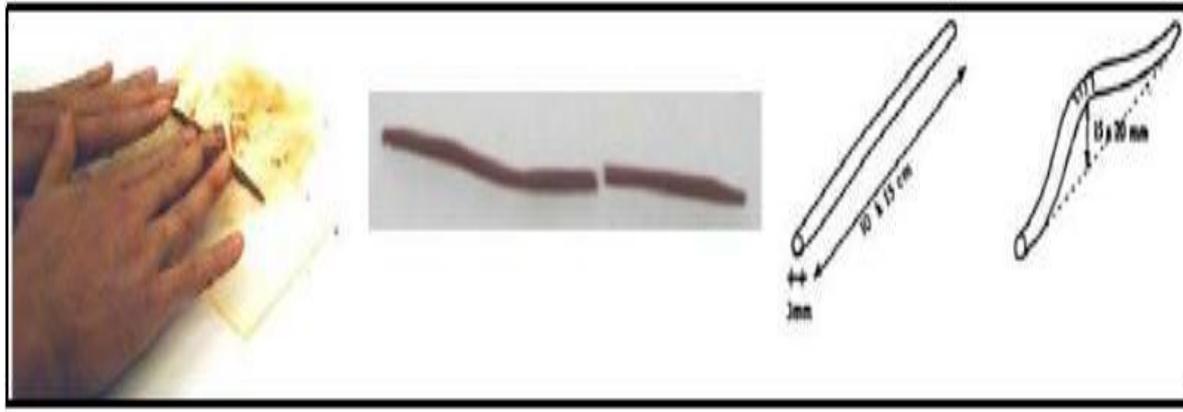


Figure III.13 : Etape de la limite de plasticité.

$$W_p = 16.19 \%$$

III.4.5.2. L'indice de plasticité I_p

C'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité, qui définit l'étendu du domaine plastique d'un sol : $I_p = W_L - W_p$

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

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

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

Tableau III.9 Résultats des limites d'Atterberg.

Caractéristiques physiques	Symboles	Valeurs (%)
Limite de liquidité	W_L	19.48
Limite de plasticité	W_p	16.19
Indice de plasticité	I_p	3.29

Ces résultats permettent de constater qu'il s'agit d'un sol non plastique.

III.6. Analyse minéralogique par diffraction des rayons X

Le résultat du diffractogramme sont présentés sur la figure III.14 et sont consignés dans le tableau III.10.

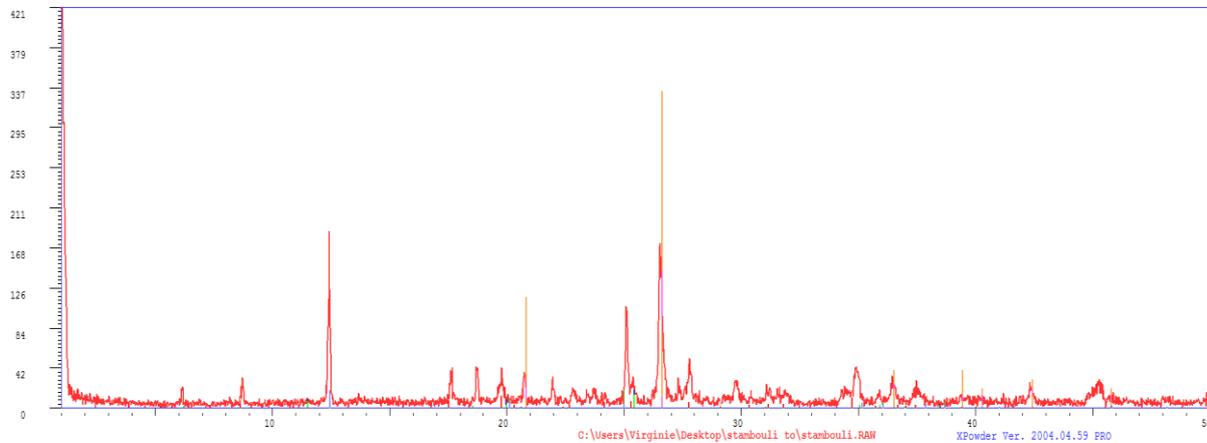


Figure III.14 : Diffractogramme du schiste étudié.

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

Eléments	Chlorite-vermiculite	Muscovite	Kaolinite	Quartz
Quantités %	10.2	28.3	10.2	51.3

L'analyse minéralogique réalisée par diffraction des rayons x (RX) sur l'échantillon de schiste montre le caractère prédominant du quartz et la présence de la muscovite qui est la variété la plus courante de mica blanc.

Par ailleurs, l'essai révèle l'existence de minéraux argileux qui peuvent présenter une certaine sensibilité à l'eau à savoir, la chlorite-vermiculite ainsi que la kaolinite. Cependant, la présence en faibles proportions de ces éléments, ne peut influencer fortement le comportement mécanique du matériau.

Puisque le pourcentage $35 < \text{Quartz} < 55$ et la Muscovite avec un pourcentage de 28.3% plus élevé à la Kaolinite et la Chlorite-vermiculite alors le schiste étudié est un schiste satiné.

III.7. Laitier cristallisé

III.7.1. Présentation de laitier utilisé

Le laitier utilisé dans cette étude est récupéré sous forme de blocs sur le complexe d'El HADJAR, ensuite concassé par des moyens mécaniques selon la granulométrie désirée, de telle sorte à former une courbe granulométrique de classe 0/20 mm, délimitée par un fuseau bien précis relatif aux corps de chaussée prescrit par la norme NF EN 13-285(2010).

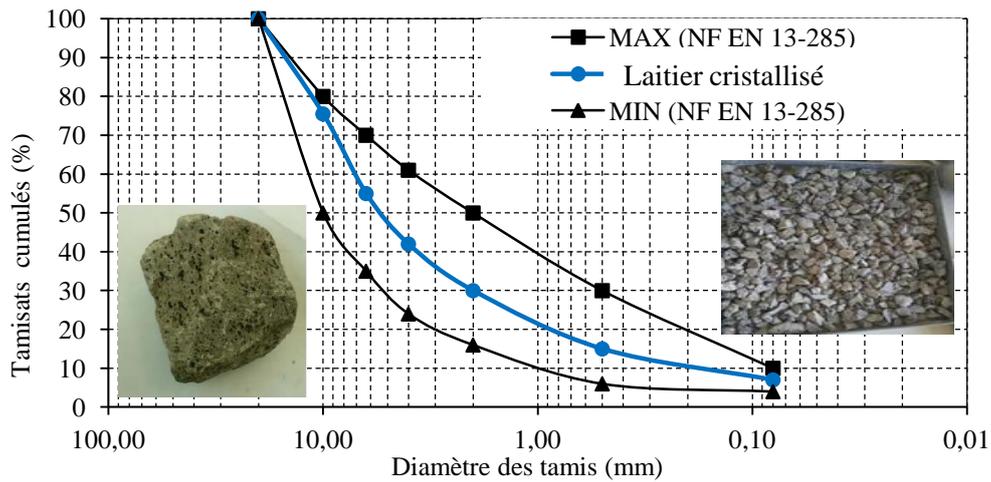


Figure III.15 : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-285(2010).

III.8.2. Quelques propriétés de laitier cristallisé d'EL HADJAR

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

Masse volumique absolue (g/cm^3)	2,8
Masse volumique apparente (g/cm^3)	1,2
Porosité (%)	50
Coefficient de réactivité α	39
Micro Deval Humide MDE (%)	16
Los Angeles LA (%)	26
Coefficient d'aplatissement	18

- Hydraulicité du laitier cristallisé

Le refroidissement lent à l'air du laitier liquide aboutit à une forme cristalline ne présentant théoriquement pas de pouvoir hydraulique. Cependant le refroidissement ne peut être uniforme dans toute la masse de la coulée et il y a des gradients de température plus ou moins importants, ce qui explique la présence en faibles quantités dans le laitier cristallisé de parties vitreuses plus ou moins réactives.

III.9. Préparation des échantillons

Les échantillons soumis aux essais mécaniques, ont été préparés selon les proportions en Schiste et en laitier-suivantes :

- Echantillon 1 : Schiste seuls ;
- Echantillon 2 : Mélange de schiste + 30% de laitier cristallisé ;
- Echantillon 3 : Mélange de schiste + 40% de laitier cristallisé ;
- Echantillon 4 : Mélange de schiste + 50% de laitier cristallisé.

III.10. Conclusion

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

Dans le chapitre suivant, sera entamée la première série d'essais mécaniques à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié et les essais de portance CBR avant et après immersion.

CHAPITRE IV

COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

VI.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.

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

Essais de compactage

IV.2. Définition du compactage

Étant une méthode de stabilisation agissant en surface des sols, le compactage permet la réduction du volume du sol instantanément en resserrant les grains les uns contre les autres, réduisant ainsi les vides remplis d'air, permettant par conséquent un meilleur comportement des sols, notamment les remblais et les couches de chaussées. (Arquie et al 1987).

Après compactage, le sol acquière:

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

IV.2.1. Objectif du compactage

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

- **Pour les chaussées**

Durant la réalisation des travaux pour assurer une bonne traficabilité des engins de transport et de mise en œuvre. La qualité recherchée réside alors essentiellement dans la résistance à l'orniérage pour chaque couche élémentaire et, à moindre titre, dans la recherche d'une faible

déformabilité et d'une tenue satisfaisante des talus. Cet intérêt du compactage doit être connu et bien estimé.

IV.3. Classification des sols en vue du compactage

IV.3.1. Groupe I : Enrochements

Des essais de force portante sur des enrochements non compactés, comparés à des essais sur des enrochements vibrés ont indiqué que la capacité portante est multipliée par dix, dans certains cas par un compactage efficace. Le module d'élasticité d'enrochements peut atteindre 800 – 1600 kg/cm² au premier cycle de chargement et 1600 – 3200 kg/cm² aux cycles suivants de chargement. Les tassements mesurés dans des enrochements de bonne qualité bien compactés se sont révélés très faibles. (Arquie et Morel, 1988).

IV.3.2. Groupe II : Sables et graviers

Il est important de comparer les courbes Proctor des sables et graviers à drainage libre avec celles d'autres types de sols. Les sables et graviers atteignent leur densité maximale, soit complètement secs, soit complètement saturé. Entre ces deux extrêmes, à la teneur en eau naturelle normale, on obtient des densités plus faibles. Les courbes Proctor des sables et des graviers sont, cependant, souvent relativement plates, ce qui signifie qu'un compactage par vibrations efficace à la teneur en eau naturelle donne une densité assez élevée qui est acceptable dans de nombreux cas.

Des essais récents, au laboratoire et en vraie grandeur, ont montré clairement qu'un sable ou un gravier complètement sec pouvait également être vibré jusqu'à une très haute densité. Lorsque le sable est complètement sec ou complètement saturé, la cohésion apparente due à la capillarité de l'eau interstitielle ne gêne plus le réarrangement des particules du sol.

IV.3.3. Groupe III : Limons, sols siliceux

Des rouleaux vibrants lourds ont aussi été utilisés sur des sables siliceux, ainsi que sur des silts purs. De tels sols ont été compactés avec succès jusqu'à des épaisseurs de couches de 75 à 100 cm par des rouleaux vibrants lourds. Il ressort de ce qui vient d'être dit que, sur des couches épaisses de remblais, les rouleaux vibrants tractés représentent ; dans de nombreux cas, une solution bien adaptée et économique.

IV.3.4. Groupe IV : Argiles

Une argile, à sa teneur en eau optimale, réclame un effort de compactage important. Les machines qui sont utilisées doivent exercer des forces de compression et de cisaillement relativement importantes sur le matériau. Avec tous les types de compacteurs, le compactage doit être réalisé en couches d'une épaisseur plus faible que dans le cas des sols non cohérents. Deux solutions principales sont envisageables pour le compactage par vibrations de tels matériaux cohérents. Dans certains cas, des rouleaux vibrants lourds à bille lisse ont donné de bons résultats. L'autre possibilité est d'utiliser des rouleaux à pieds de moutons ou à pieds dameurs. (Arquie et Morel, 1988).

IV.4. 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. (A. DJEDID et al, 1998).

IV.4.1. Energie 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).

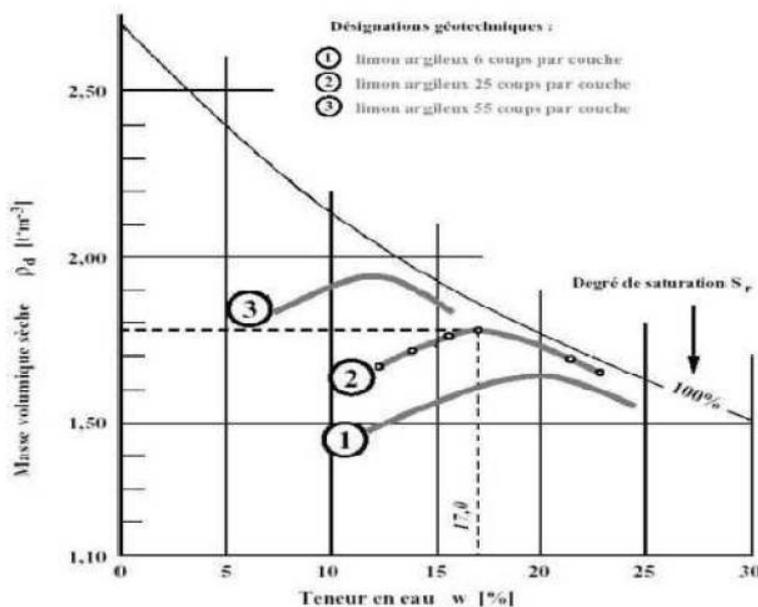


Figure IV.1 : Influence de l'énergie de compactage. (Lereau, 2006)

IV.4.2. Teneur en eau

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 w 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 barrages en remblais.

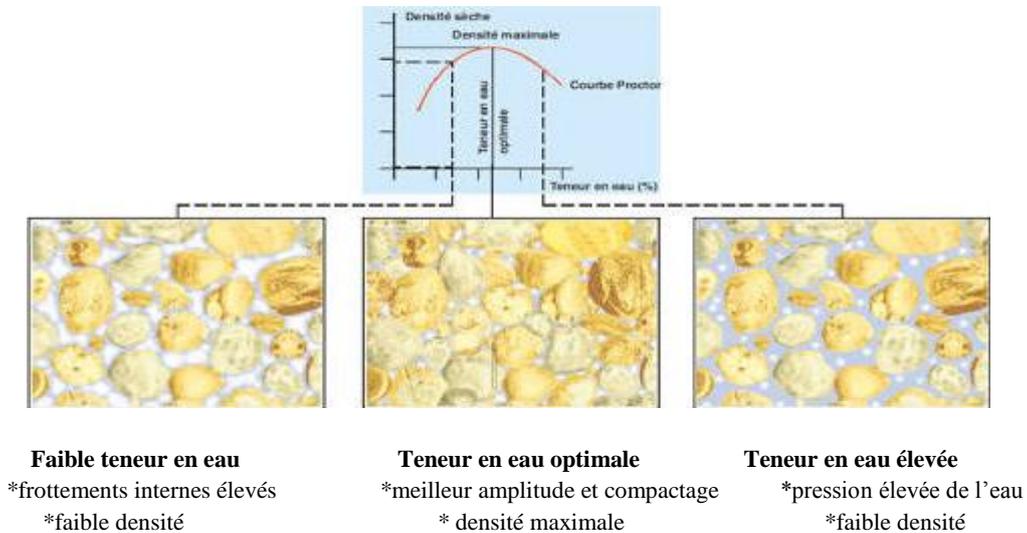


Figure IV.2 : Influence de la teneur en eau sur le compactage. (Varlet, 1966)

IV.4.3.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.

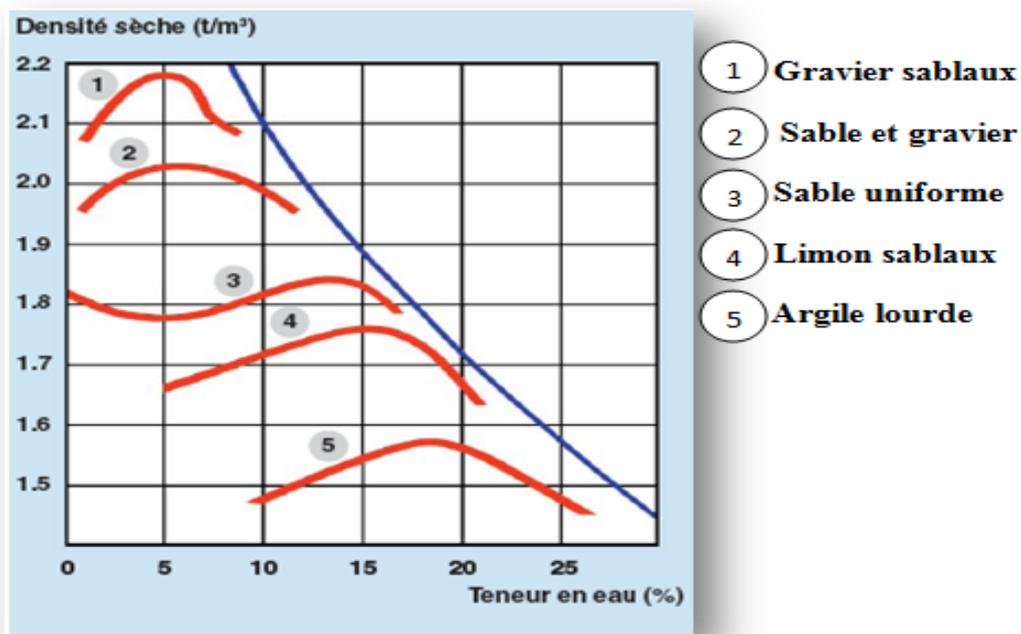


Figure IV.3 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.

IV.5. Les essais de compactage au laboratoire

Le principe des essais de compactage a en fait déjà été évoqué plus haut dans ce chapitre; un échantillon de sol, de teneur en eau connue, est compacté dans un moule, aux dimensions normalisées, par l'action de la chute d'une dame. Le poids et la hauteur de chute de cette dernière sont également normalisés. La teneur en eau du sol testé est maîtrisée en étuvant l'échantillon, puis par adjonctions de quantités précises d'eau. Une série d'essais est réalisée pour différentes teneurs en eau, le résultat de chacun produisant un couple de valeurs (w, γ_d), donc un point de la courbe de compactage (courbe A.A.S.C.H.O : American Association of State Highway Officials). Les essais peuvent être réalisés dans deux types de moules, et selon deux modalités, ce qui fait quatre types d'essais. D'autres types, moins couramment utilisés existent également. Ces essais ont pour objet de tracer les courbes de compactage. (Leflaive et al, 1974)

IV.5.1. 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 à la capacité portante maximale.

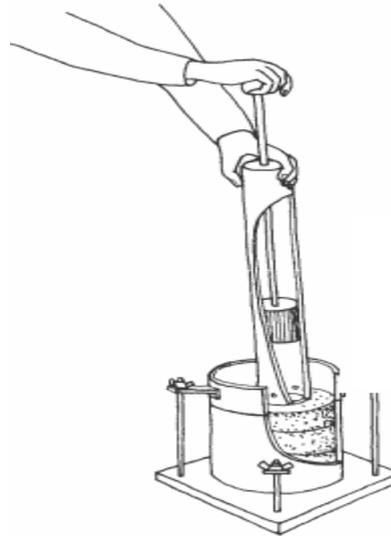


Figure IV.4 essai de compactage.

IV.5.2. L'essai Proctor Normal (PN)

Le sol est compacté au moyen d'une dame de 2,490 kg, tombant d'une hauteur de 30,5 cm (1 pied). L'essai est réalisé en trois couches de plus ou moins 4 cm d'épaisseur qui reçoivent chacune 25 coups pour le moule Proctor et 55 coups pour le moule CBR.

IV.5.3. L'essai Proctor Modifié (PM)

Le sol est compacté au moyen d'une dame de 4,540 kg, tombant d'une hauteur de 45,7 cm (1,5 pied). L'essai est réalisé en cinq couches de plus ou moins 2,5 cm d'épaisseur qui reçoivent chacune 25 coups pour le moule Proctor et 55 coups pour le moule CBR.

- L'essai PN communique au sol une énergie de compactage relativement modérée, cet essai s'applique donc à l'étude des remblais.
- L'essai PM, sollicitant le sol d'avantage, il est adapté aux compactages important comme ceux que subissent les sols.

Tableau IV.1 : Conditions des essais Proctor normal et Modifié.

Essai Proctor	Masse de la dame (kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre de coups par couche	Nombre de couches	Energie de compactage (kJ/dm^3)
Normal	2.490	30.50	25(moule Proctor)	3	0.59
			55 (moule CBR)	3	0.53
Modifier	4.540	45.70	25(moule Proctor)	5	2.71
			55 (moule CBR)	5	2.41

IV.6. L'essai Proctor modifié (PM)

IV.6.1. But de l'essai (NF P 94-093)

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

IV.6.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ($\gamma_d ; w$) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.

IV.6.3. Matériels utilisés

Pour cet essai nous aurons besoin

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

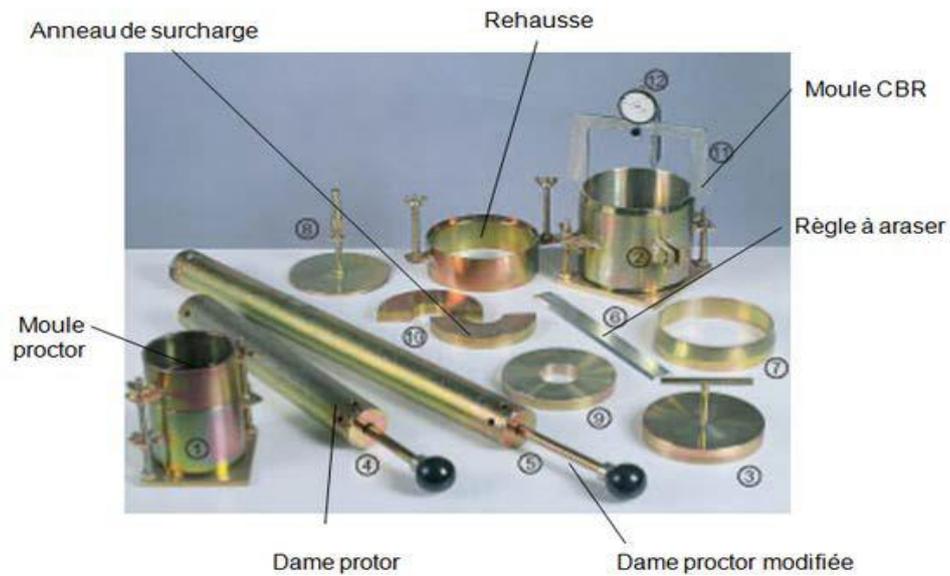


Figure IV.5 : Appareillage Proctor.

IV.6.4. Essais réalisés

Une série d'essai Proctor modifié a été réalisée dans la présente étude sur des échantillons de Schiste avec différentes proportions de laitier du haut fourneau, à savoir :

- Schiste seul.
- Mélange de schiste + 30% de laitier ;
- Mélange de schiste + 40% de laitier ;
- Mélange de schiste + 50% de laitier.



Figure IV.6 : Matériau schiste préparé pour essai Proctor.

IV.6.5. Expression des résultats

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

- **Schiste + 0 % de laitier**

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

Essais	Teneur en eau w (%)	Densité sèche (γ_d)
Echantillon N° 01	1.54	2.13
Echantillon N° 02	3.62	2.31
Echantillon N° 03	5.50	2.43
Echantillon N° 04	7.32	2.24

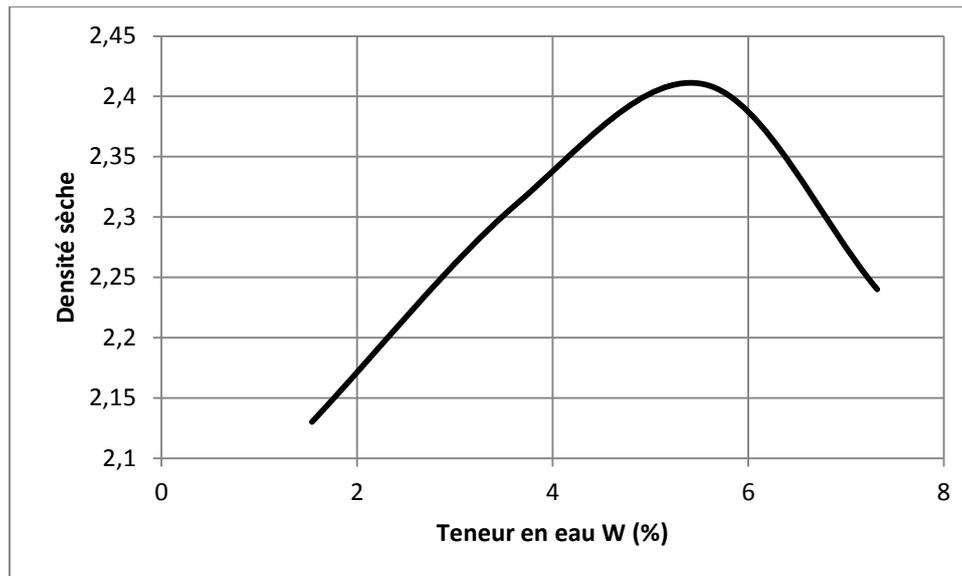


Figure IV.7 : Courbe Proctor (schiste + 0% de laitier).

- **Schiste + 30% de laitier**

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 30% de laitier.

Essais	Teneur en eau (%)	Densité sèche (γ_d)
Echantillon N° 01	3.99	2.11
Echantillon N° 02	6.14	2.17
Echantillon N° 03	7.75	2.22
Echantillon N° 04	10.2	2.20

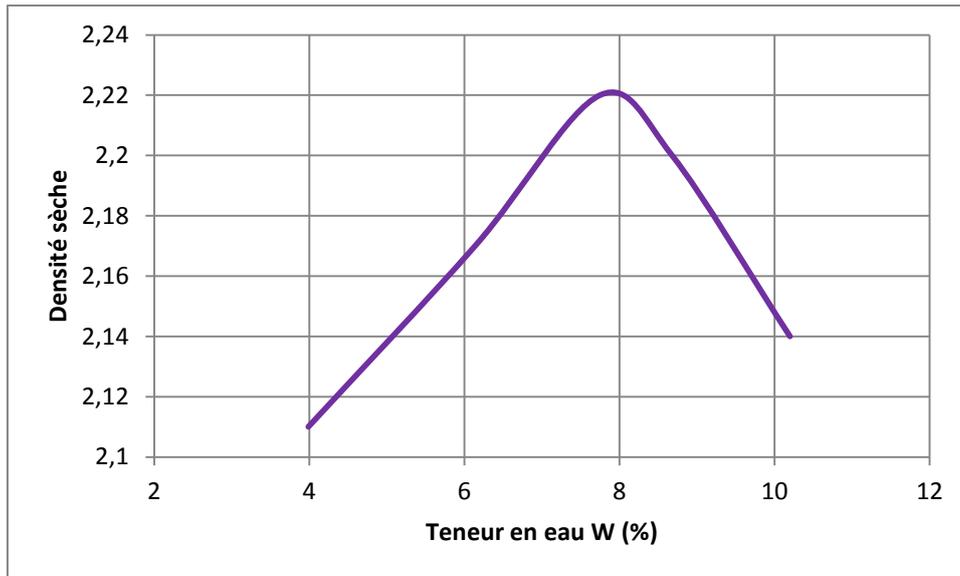


Figure IV.8 : Courbe Proctor de schiste + 30% de laitier.

- **Schiste + 40% de laitier**

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 40% de laitier.

Essais	Teneur en eau (%)	Densité sèche (γd)
Echantillon N° 01	6	2.16
Echantillon N° 02	8.25	2.17
Echantillon N° 03	9.4	2.18
Echantillon N° 04	11.6	2.15

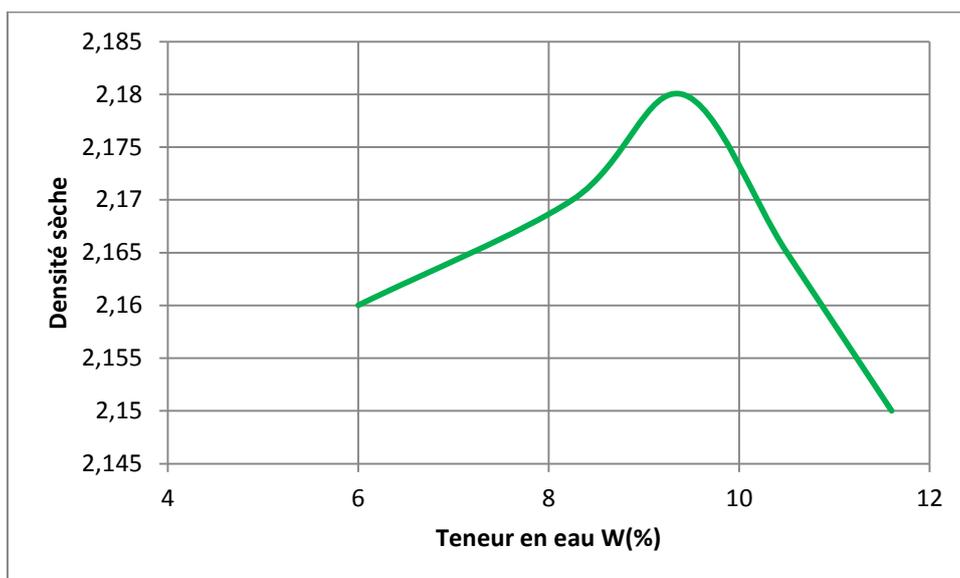


Figure IV.9 : Courbe Proctor de schiste + 40% de laitier.

- **Schiste + 50% de laitier**

Tableau IV.5 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour le schiste + 50% de laitier.

Essais	Teneur en eau (%)	Densité sèche (γ_d)
Echantillon N° 01	5.85	2.08
Echantillon N° 02	7.65	2.14
Echantillon N° 03	9.63	2.167
Echantillon N° 04	11.2	2.12

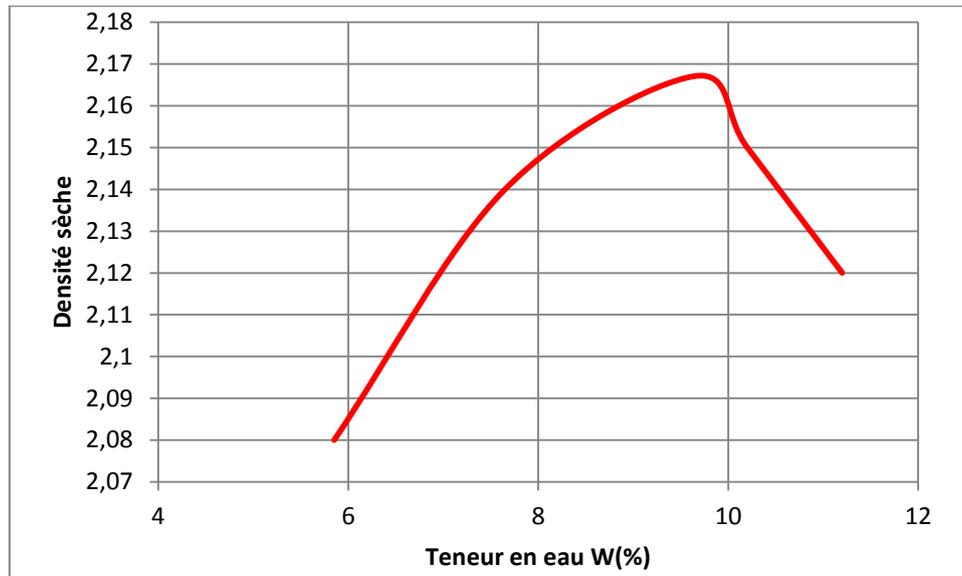


Figure IV.10 : Courbe Proctor de schiste + 50% de laitier.

- **Courbe comparative de tous les échantillons**

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

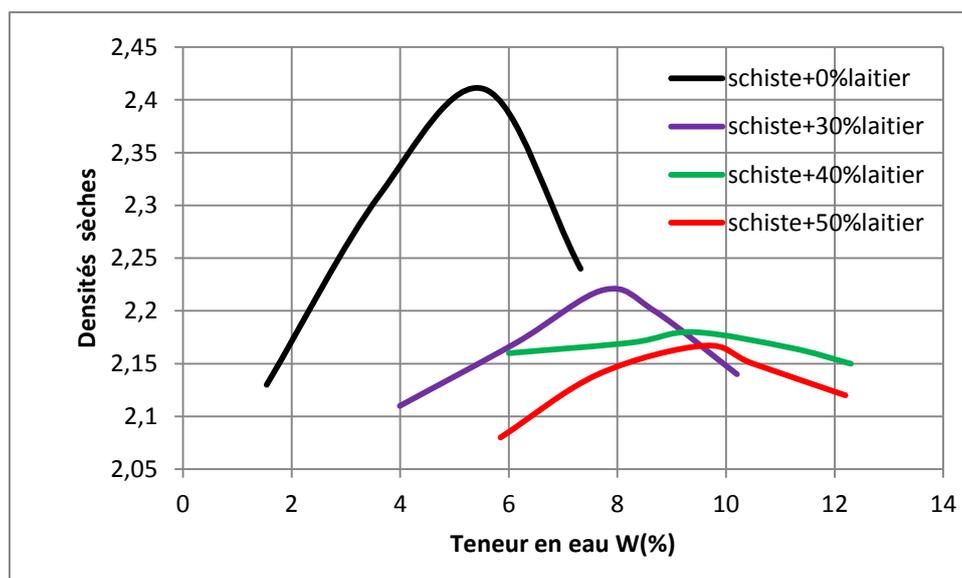


Figure IV.11 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

En se référant à la figure IV.11, nous constatons que les courbes Proctor obtenues montrent une allure en forme de cloche moyennement bombée, elles présentent généralement un pic plus ou moins apparent présentant la teneur en eau optimale (w_{opt}) appelée "optimum Proctor".

Ce point représente la teneur en eau donnant la densité sèche maximale du matériau utilisé. Cependant, il est à indiquer que les courbes Proctor des échantillons contenant des déchets de laitier cristallisé (schiste + 40% et 50 % de laitier) sont moins bombées comparées à la courbe Proctor du schiste seul. Ceci, permet de conclure que l'ajout du laitier cristallisé rend les échantillons moins sensibles à l'eau.

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

Tableau IV.6: Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.

Echantillons	w_{opt} (%)	Densités sèches maximales
Schiste + 0% laitier	5.50	2.43
Schiste + 30% laitier	8.18	2.22
Schiste + 40% laitier	9.41	2.18
Schiste + 50% laitier	9.63	2.167

- **Densités sèches maximales pour les mélanges de schiste + laitier cristallisé**

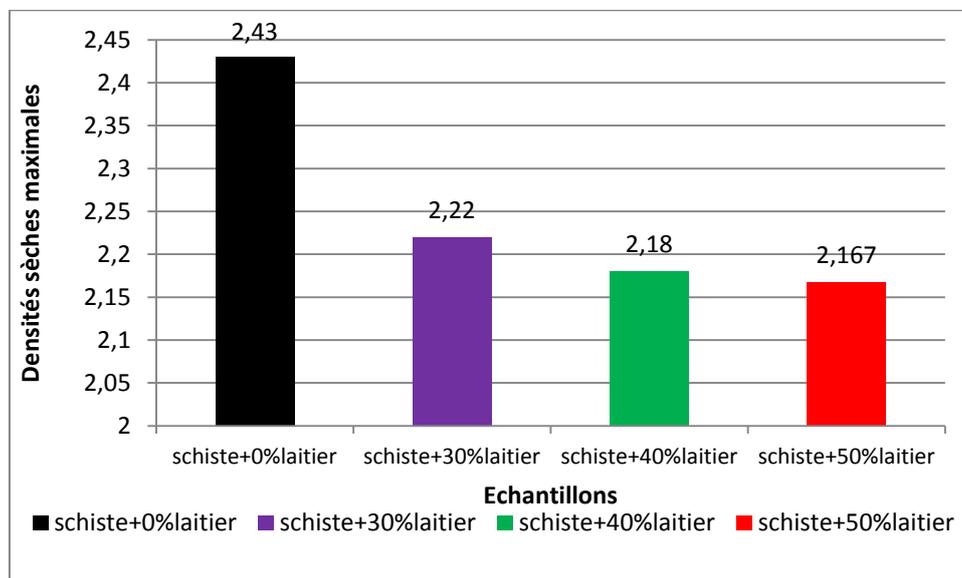


Figure IV.12 : Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de laitier.

Les résultats présentés sur la figure IV.12 relatifs au compactage des différents échantillons (mélanges), permettent de constater que les densités sèches diminuent au fur et à mesure que la quantité de laitier augmente dans l'échantillon. Ceci peut être dû au fait que la structure des granulats de schiste de forme en feuillet est perturbée par les granulats du laitier de formes

volumineuses, ce qui crée plus de vides entre les grains schiste-laitier, en plus, les grains du laitier sont très poreux ce qui est visible à l'œil nu lors des essais d'identification.

Toutefois, ces densités sont supérieures à 2,00, ce qui vérifie amplement les valeurs de référence exigées par les normes en vigueur. Ces résultats permettent ainsi, de qualifier les mélanges étudiés du point de vue compactage comme matériaux acceptables et intéressants pour une utilisation dans les corps de chaussées.

- **Teneur en eau optimales pour les mélanges de schiste + laitier cristallisé**

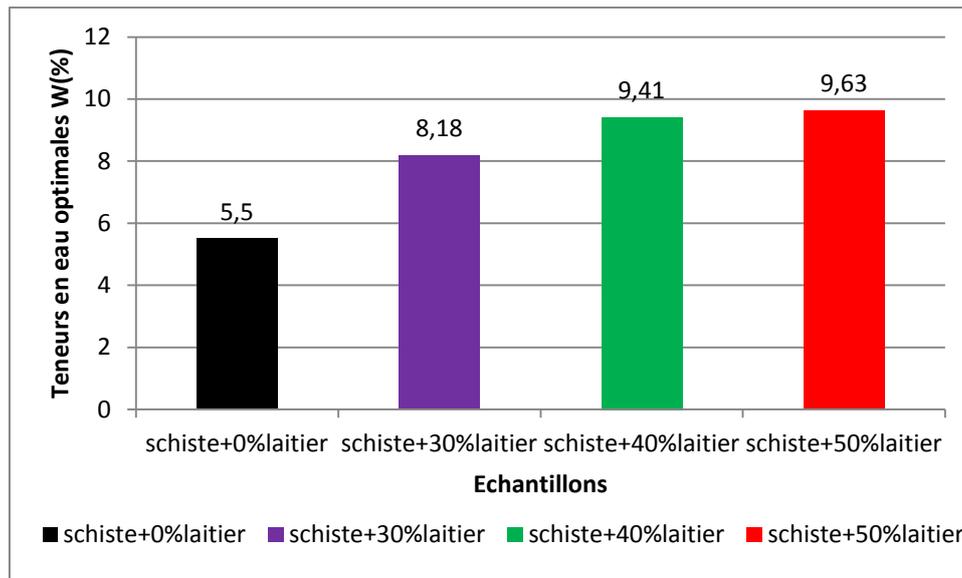


Figure IV.13 : Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de laitier cristallisé.

D'après la figure IV.13, on remarque que les teneurs en eau optimales augmentent au fur à mesure que le pourcentage de laitier augmente. En effet, malgré que le laitier cristallisé ne soit pas sensible à l'eau, toutefois, ses grains sont très poreux et présentent beaucoup de vides ouverts qui se remplissent d'eau au cours de l'humidification du matériau (des mélanges), en plus des vides plus importants qui se créent entre les grains de schiste de formes feuilletées et les grains du laitier de formes volumineuses. Ce qui explique l'augmentation de la teneur en eau optimale avec l'augmentation de la proportion du laitier dans l'échantillon.

IV.7. Essais de portance CBR (California Bearing Ratio) NF P 94-078

IV.7.1. Définition

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

IV.7.2. But de l'essai

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

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

IV.7.3. Principe de l'essai

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

- **Les essais CBR permettent de déterminer 3 types indices CBR en fonction du but fixé :**

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

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

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

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

$$I_{(2.5)} = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN)}}{13.5} \times 100$$

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

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

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

Avec :

Δh : variation de hauteur mesurée (mm).

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

IV.7.4. Matériel utilisé

-Matériels de confection des éprouvettes

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

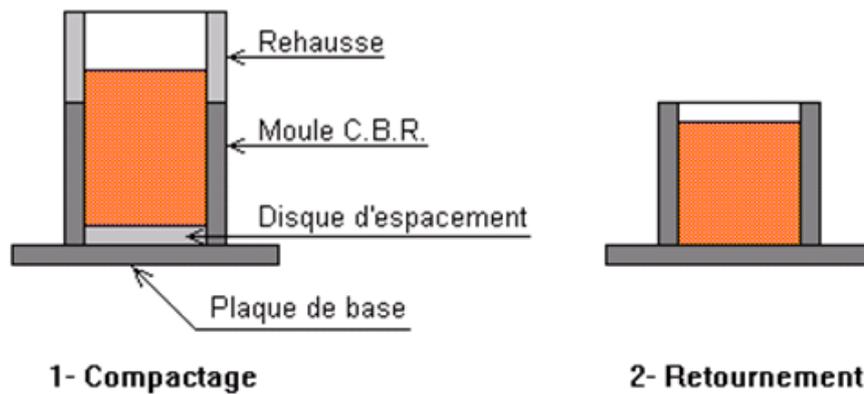


Figure IV.14 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

- Matériel de poinçonnement

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

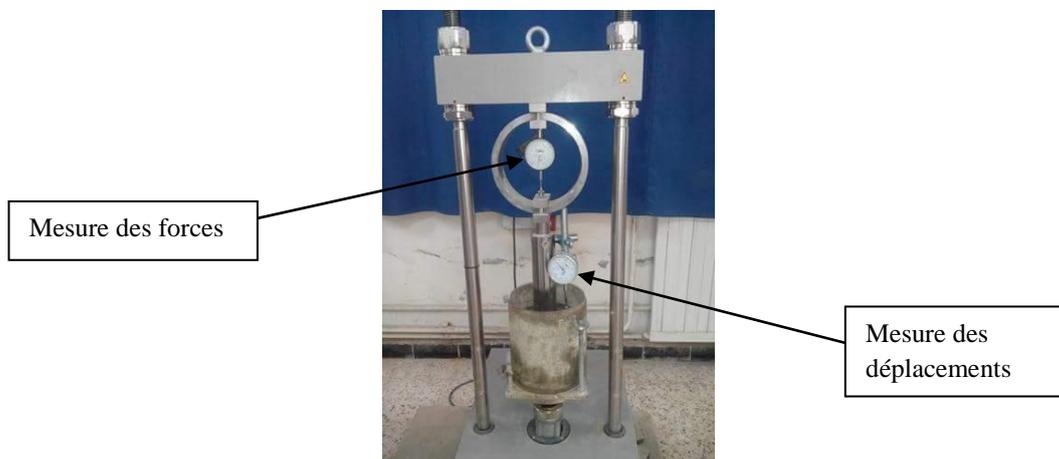


Figure IV.15 : Presse CBR.

IV.7.5. Mode opératoire

IV.7.5.1. Préparation des échantillons

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

IV.7.5.2. Détermination de l'IPI

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

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

IV.7.5.3. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif)

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



Figure IV.16 : Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement.

IV.7.6. Expression des résultats

Une série d'essai CBR a été réalisée dans la présente étude sur des échantillons de schiste et de laitier, afin de déterminer les indices portant immédiats (IPI) et les indices CBR après immersion.

Plusieurs échantillons ont été préparés, à savoir :

- Schiste seul.
- Mélange de schiste + 30% de laitier.
- Mélange de schiste + 40% de laitier.
- Mélange de schiste + 50% de laitier

IV.7.6.1. Interprétation des résultats (CBR)

Tableau IV.7 : Résultats des essais CBR immédiat.

Echantillon	Gonflement relatif G	Indice Portant Immédiat (IPI)		
		I _(2.5)	I ₍₅₎	IPI
Schiste +0% de laitier	= 0	3.05	7.22	7.22
Schiste + 30% de laitier	= 0	7.98	33.77	33.77
Schiste + 40% de laitier	= 0	21.23	38.70	38.70
Schiste + 50% de laitier	= 0	64.97	51.50	64.97

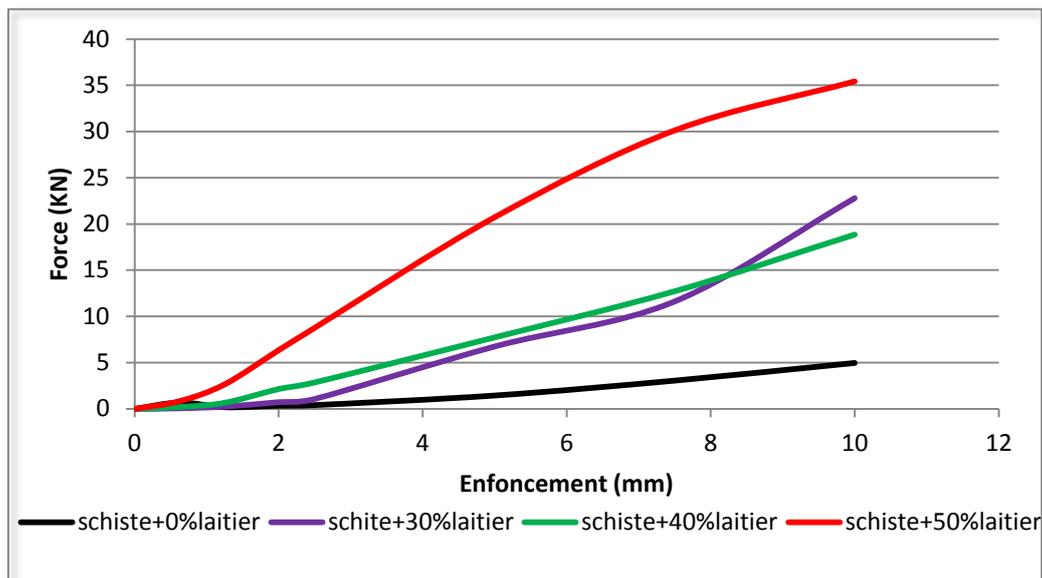


Figure IV.17 : Courbes enfoncements-forces (cas des IPI).

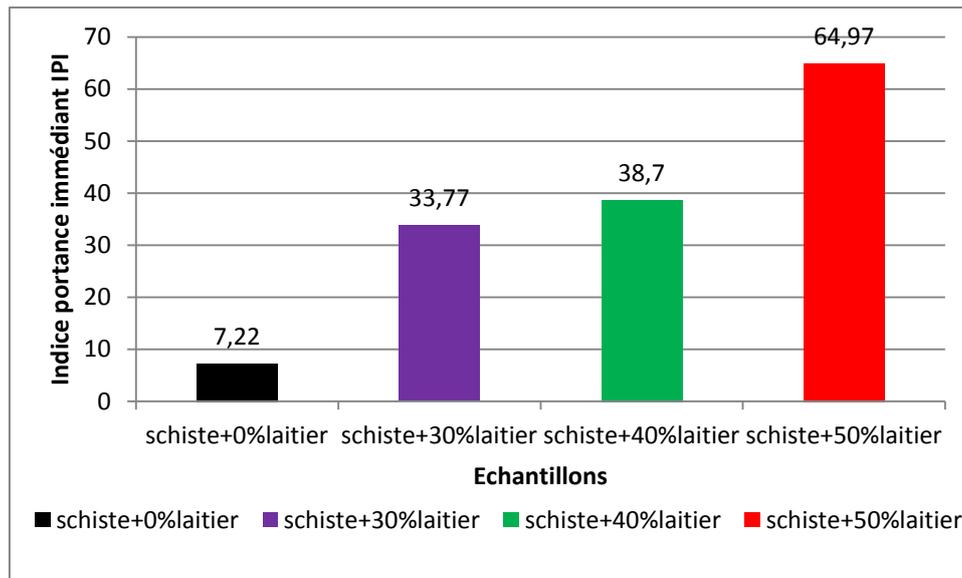


Figure IV.18 : Evolution des indices CBR en fonction des pourcentages de laitier.

Les résultats d'essais de portance CBR réalisés avant immersion présentés sur la figure IV.18, permettent de constater que la portance des mélanges (schiste + laitier) augmente au fur à mesure que le pourcentage de laitier augmente. Elle passe de 7.22 pour le schiste seul à 64.97 pour le mélange de schiste avec 50% de laitier. Ceci est certainement dû au fait que les grains de laitier sont plus résistants à ceux du schiste, ainsi le mélange comportant plus de laitier est moins déformable et présente de meilleures portances et de meilleures résistances au poinçonnement.

IV.7.6.2. Interprétation des résultats (CBR_{imm})

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

Tableau IV.8 : Résultats des essais CBR immergé.

Echantillon	Gonflement relatif G	Indice Portant Immédiat (IPI)		
		I _(2.5)	I ₍₅₎	CBR _{imm}
Schiste + 00% de laitier	= 0	3.90	9.05	9.05
Schiste + 30% de laitier	= 0	21.23	40.02	40.02
Schiste + 40% de laitier	= 0	35.67	49.89	49.89
Schiste + 50% de laitier	= 0	39.79	62.11	62.11

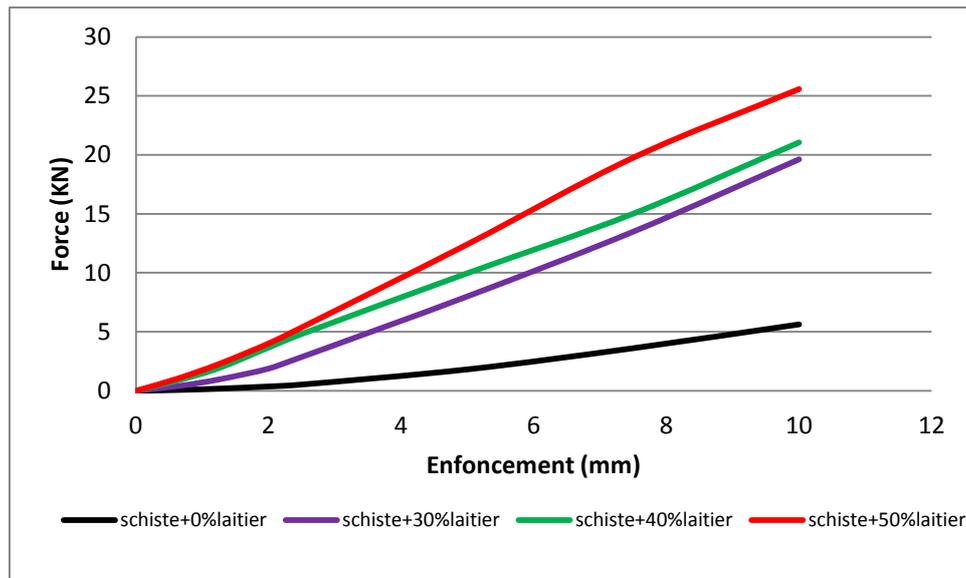


Figure IV.19 : Courbes enfoncements-forces (cas des CBR imm).

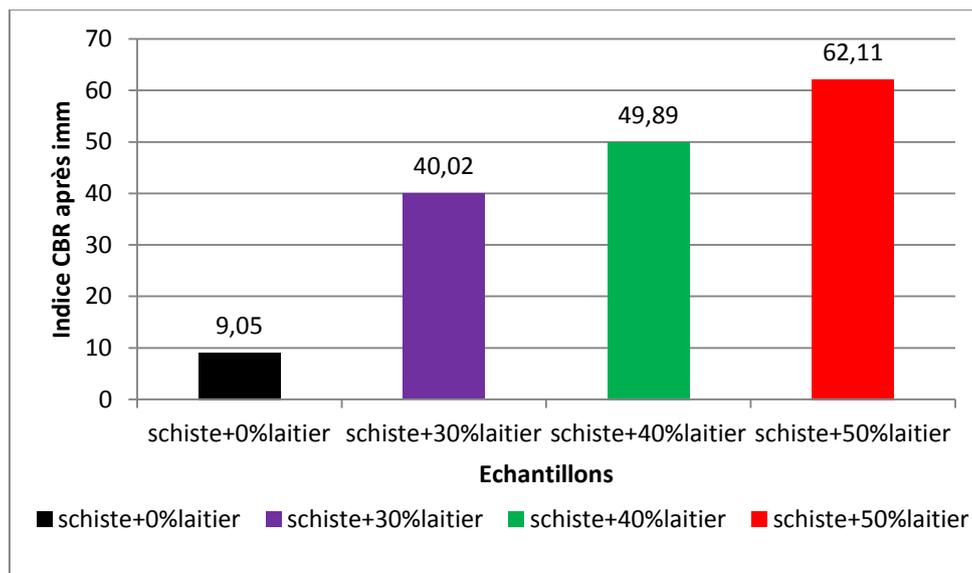


Figure IV.20 : Evolution des CBR imm en fonction des pourcentages de laitier.

Les résultats d'essais de portance CBR réalisés après immersion présentés sur la figure IV.20, montre que la portance des mélanges après immersion augmente progressivement avec l'ajout du laitier cristallisé pour atteindre un maximum de 62.11 dans le cas du mélange à 50 %. Le laitier en grande proportion peut présenter une meilleure portance que le matériau naturel (schiste seul) à l'état humide, notamment que le laitier est pratiquement insensible à l'eau. Ce qui rend les mélanges plus résistants à l'état humide dès le premier ajout de laitier.

IV.7.6.3. Interprétation des résultats (CBR et CBRimm)

Figure IV.9 : Résumé des résultats d'essai CBR (CBR et CBR imm).

Echantillon	CBR	CBRimm
Schiste +0% de laitier	7.22	9.05
Schiste + 30% de laitier	33.77	40.02
Schiste + 40% de laitier	38.70	49.89
Schiste + 50% de laitier	64.97	62.11

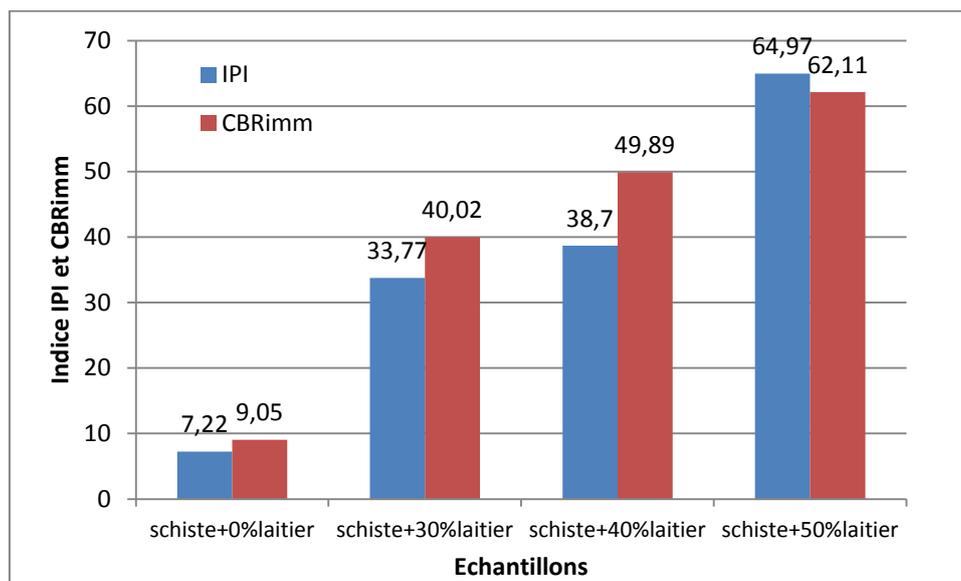


Figure IV.21 : Courbes comparatives des IPI et CBRimm des différents pourcentages de laitier.

A titre de comparaison, les résultats ci-dessus permettent de constater que les portances des échantillons étudiés après immersion sont légèrement supérieures à celles développées avant immersion, à l'exception du mélange à 50% de laitier.

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

IV.8.Conclusion

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

CHAPITRE V

ESSAIS MICRO DEVAL, LOS ANGELES, DEGRADABILITE ET FRAGMENTABILITE

V.1.Introduction

Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression. Par contre, il existe des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure, de fragmentabilité, de dégradabilité, ...etc pour les granulats utilisés dans les couches de chaussées.

V.2.Essai micro Deval

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

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



Figure V.1 : Machine Micro Deval.

V.2.2 principe de l'essai

Effectuer l'essai sur un granulat, ayant une granularité conforme à l'une des quatre classes granulaires types 4-6.3 ; 6.3-10 ; 10-14 ; 25-50. Les 25-50 mm doivent contenir 60% de 25-40 mm. Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à poids constant (5 heures au minimum). Il n'est pas possible d'étendre ce processus d'usure aux sables, les classes granulaires inférieures à 4 mm n'évoluent plus par usure, dans cet essai, mais par fragmentation. Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. La prise d'essai sera de 500 ± 2 g pour les 4-14 mm et de $10\text{kg} \pm 20$ g pour les 25-50 mm. Ajouter 2.5 litres d'eau et la masse des billes indiquées (ci dessous) :

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

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

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

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

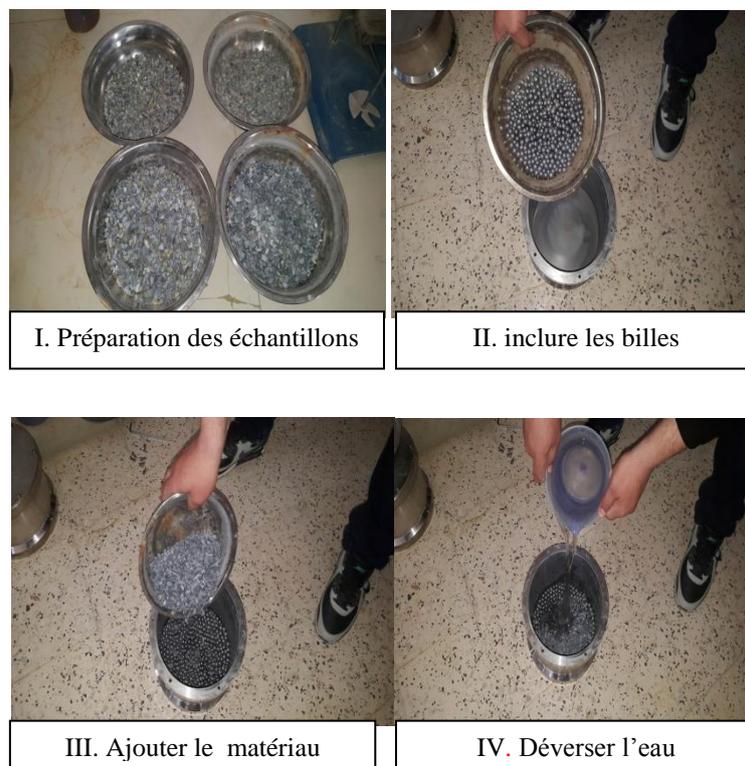


Figure V.2 : Mode opératoire d'essai micro Deval.

V.2.3 Matériaux utilisées

On a réalisé des essais micro Deval sur la classe granulaire 4-6.3 mm pour quatre types de mélange, à savoir :

- Schiste seul
- Schiste + 30% du laitier
- Schiste + 40% laitier
- Schiste + 50% laitier

V.2.4 résultats de l'essai

- Schiste seul

$$\text{MDE} = \frac{500 - 185}{500} \times 100$$

Tableau V.2 : Calcul du coefficient Micro Deval.

M(g)	M(g)	MDE(%)
500	185	63

- Schiste + 30% de laitier

$$\text{MDE} = \frac{500 - 251}{500} \times 100$$

Tableau V.3 : Calcul du coefficient Micro Deval.

M(g)	M(g)	MDE(%)
500	251	49.8

- Schiste + 40% de laitier

$$\text{MDE} = \frac{500 - 263}{500} \times 100$$

Tableau V.4 : Calcul du coefficient Micro Deval.

M(g)	M(g)	MDE(%)
500	263	47.4

- Schiste + 50% de laitier

$$\text{MDE} = \frac{500 - 249}{500} \times 100$$

Tableau V.5 : Calcul du coefficient Micro Deval.

M(g)	M(g)	MDE(%)
500	290	42

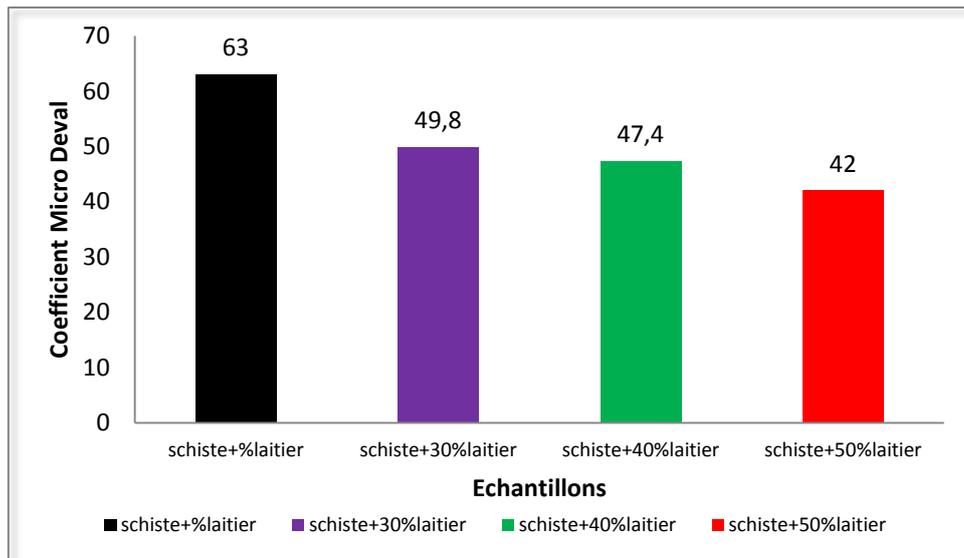


Figure V.3 : Courbe comparative des essais micro Deval.

Les résultats obtenus, présentés sur les tableaux (V.2 à V.5) et récapitulés sur la figure V.3, permettent de constater que le coefficient M_{DE} diminue au fur est à mesure que le pourcentage de laitier augmente. En effet, il passe de 63 pour les échantillons du schiste seul (0 % de laitier) à 42 pour les échantillons avec 50 % de laitier.

Ainsi, l'ajout du laitier améliore considérablement la résistance à l'usure des mélanges en présence d'eau. Leur utilisation en couche de forme et en couches de fondations est fortement envisageable.

V.3 Essai Los Angeles

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

L'essai permet de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement. Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine et sur les boulets.



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

V.3.2. Principe de l'essai

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

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

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

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

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

Avec :

M: masse de l'échantillon avant essai.

m: masse du refus du tamis 1.6mm.

La figure V.5 illustre la mise en place des granulats et des boulets pour l'essai Los Angeles.



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

V.3.3. Matériaux utilisées

Nous avons réalisé des essais Los Angeles sur la classe 10-16 mm pour deux types d'échantillons à savoir :

- Schiste seul
- Schiste + 30% laitier
- Schiste + 40% laitier
- Schiste +50% laitier

V.3.4. Résultats des essais

- Schiste seul

$$LA = \frac{5000 - 3775}{5000} \times 10$$

Tableau V.7 : Calcul du coefficient Los Angeles.

M(g)	M(g)	LA(%)
5000	3775	24.5

- Schiste + 30 % laitier

$$LA = \frac{5000 - 3415}{5000} \times 100$$

Tableau V.8 : Calcul du coefficient Los Angeles.

M(g)	M(g)	LA(%)
5000	3415	31.7

- Schiste + 40 % laitier

$$LA = \frac{5000 - 3340}{5000} \times 100$$

Tableau V.9 : Calcul du coefficient Los Angeles.

M(g)	M(g)	LA(%)
5000	3340	33.2

- Schiste + 50% de laitier

$$LA = \frac{5000 - 3290}{5000} \times 100$$

Tableau V.10 : Calcul du coefficient Los Angeles.

M(g)	M(g)	LA(%)
5000	3290	34.2

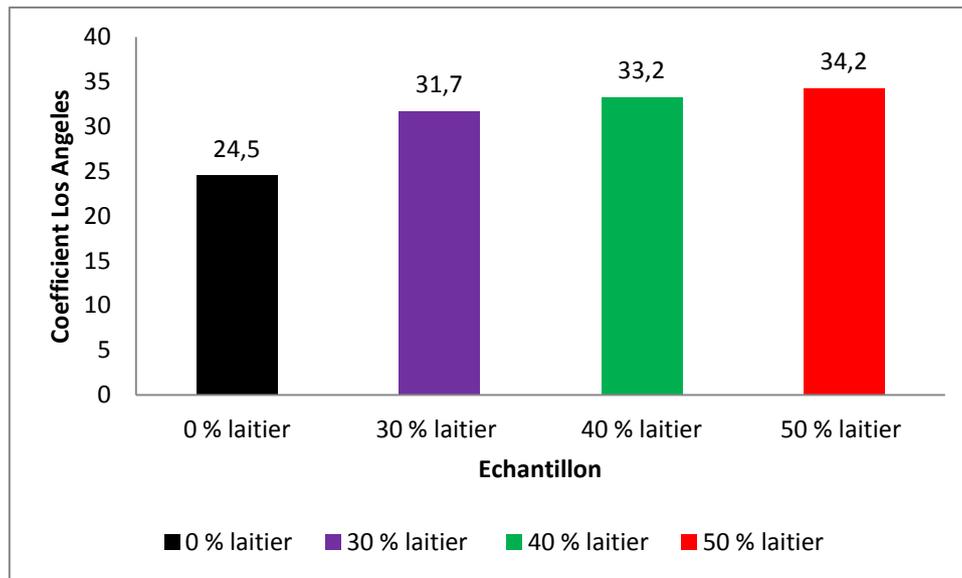


Figure V.6 : Courbe comparative des essais Los Angeles (schiste avec et sans laitier).

La figure V.6 montre que le coefficient Los Angeles augmente au fur et à mesure que la teneur en laitier augmente, ce qui permet de déduire que l'ajout du laitier rend les mélanges moins résistants aux chocs à l'appareil Los Angeles. Ceci peut être expliqué par le fait que les grains du laitier cristallisé, malgré leur dureté considérable à l'état granulaire dense, mais ils résistent mal aux chocs et à l'attrition vue leur importante microporosité.

Tableau V.11 : Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

	LA	MDE	LA+MDE	Catégories
Schiste seul	24.5	63	87.5	F
Schiste + 30% laitier	31.7	49.4	81.5	F
Schiste + 40% laitier	33.2	47.4	80.6	F
Schiste + 50% laitier	34.2	42	76.2	E

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

Catégories	LA+MDE	LA	MDE
A	≤ 25	≤ 20	≤ 15
B	≤ 35	≤ 25	≤ 20
C	≤ 45	≤ 30	≤ 25
D	≤ 55	≤ 35	≤ 30
E	≤ 80	≤ 45	≤ 45
F	> 80	> 45	> 45

En se référant aux résultats du tableau V.11 et aux restrictions du tableau V.11, nous pouvons dire que :

Les échantillons de schiste seuls, ainsi que les échantillons en mélanges ne dépassant pas 40% de laitier sont de catégories F.

Par contre, les échantillons de schiste +50% de laitier sont reclassés dans la catégorie E. Ils présentent de ce fait un meilleur comportement que ceux de catégorie F. Ce type de matériau est employé dans les couches de chaussées, avec ou sans traitement, à définir selon le trafic.

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

V.4.1.Principe de l'essai

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

V.4.2.Exécution de l'essai

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

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

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.

V.4.3.Matériaux utilisés

- Schiste seul ;
- Schiste +30% laitier ;

- Schiste + 40% laitier ;
- Schiste +50% laitier.

V.4.4 Résultats obtenus

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

- Schiste seul

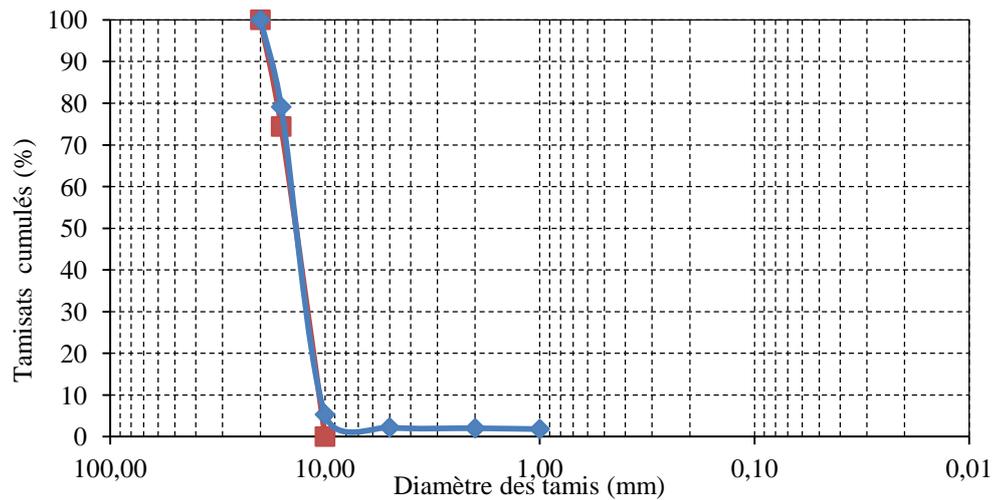


Figure V.7 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité (schiste seul).

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

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11}{11} = 1 \quad DG = 1$$

Tableau V.13 : Classification des matériaux rocheux.

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

En comparant les résultats obtenus aux résultats de référence présentés dans le tableau V.13 nous constatons que le schiste étudié fait partie des matériaux rocheux peu dégradables ($DG = 1 < 5$).

- Schiste + % 30 laitier

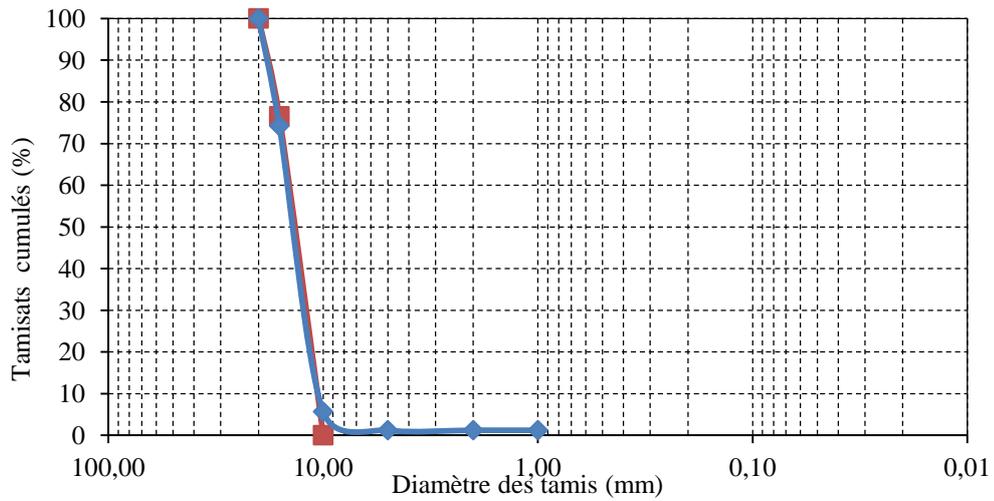


Figure V.8 : Courbes granulométriques avant et après imbibition du schiste +30%laitier.

$$DG = \frac{D10 \text{ du matériau avant essai}}{D10 \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{10.5} = 1 \qquad DG = 1$$

- Schiste + 40 % laitier

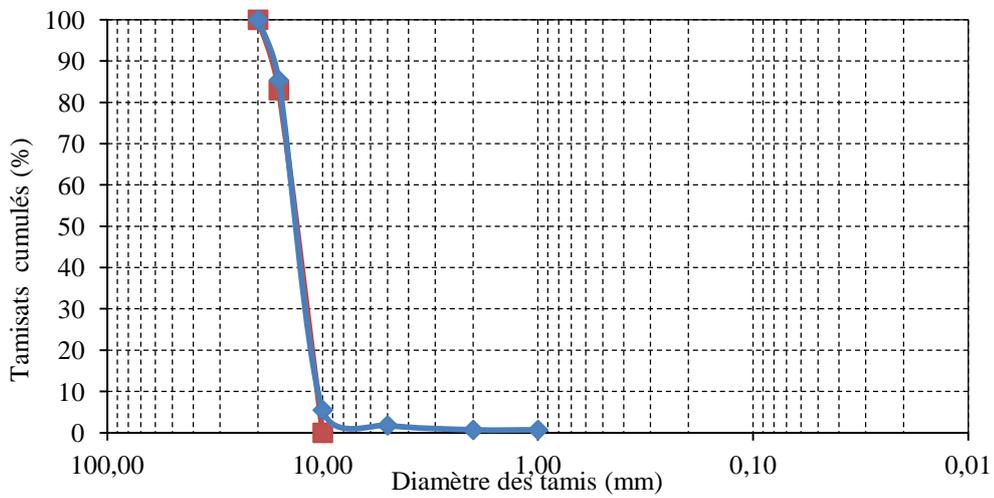


Figure V.9 : Courbes granulométriques avant et après imbibition du schiste +40%laitier.

$$DG = \frac{D10 \text{ du matériau avant essai}}{D10 \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{10.5} = 1 \qquad DG = 1$$

- Schiste + 50% laitier

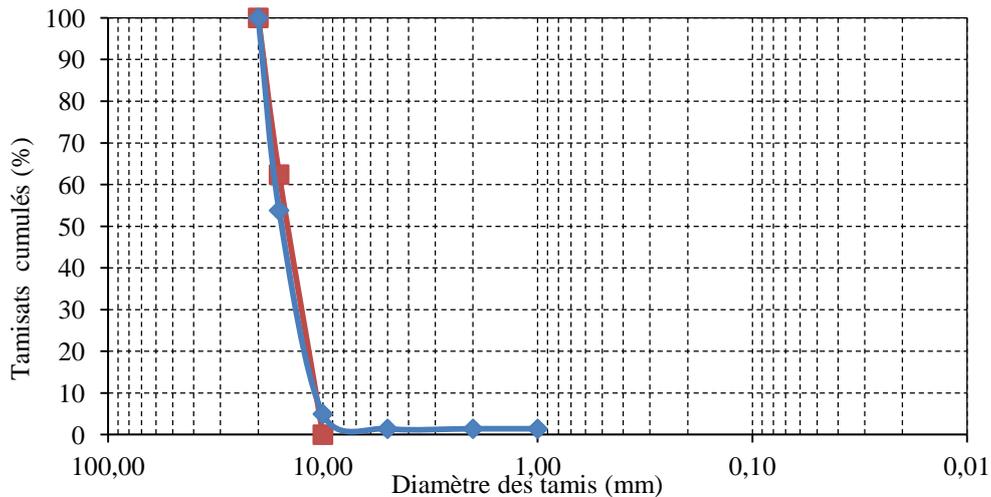


Figure V.10 : Courbes granulométriques avant et après imbibition du schiste +50%laitier.

$$DG = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11}{11} = 1 \quad DG = 1$$

L'ajout du laitier n'a pratiquement aucune influence sur la dégradabilité des échantillons. En effet, tous les échantillons (schiste et mélanges) ont présenté des courbes granulométriques presque identiques avant et après essai (voir figures : V.8 à V.10) et un coefficient de dégradabilité égal à 1. Ainsi, les matériaux étudiés sont considérés rocheux peu dégradables.

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

V.5.1.Principe de l'essai

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

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

V.5.2.Exécution de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité 10/20mm donnée soumis à un pilonnage conventionnel selon la norme NF P 94-066

Cette réduction s'exprime par le rapport :

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

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

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

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

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

V.5.3. Matériaux utilisés

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

- Schiste seul ;
- Schiste + 30% de laitier ;
- Schiste + 40% de laitier ;
- Schiste + 50% de laitier.

V.5.4. Résultats des essais

- Schiste seul

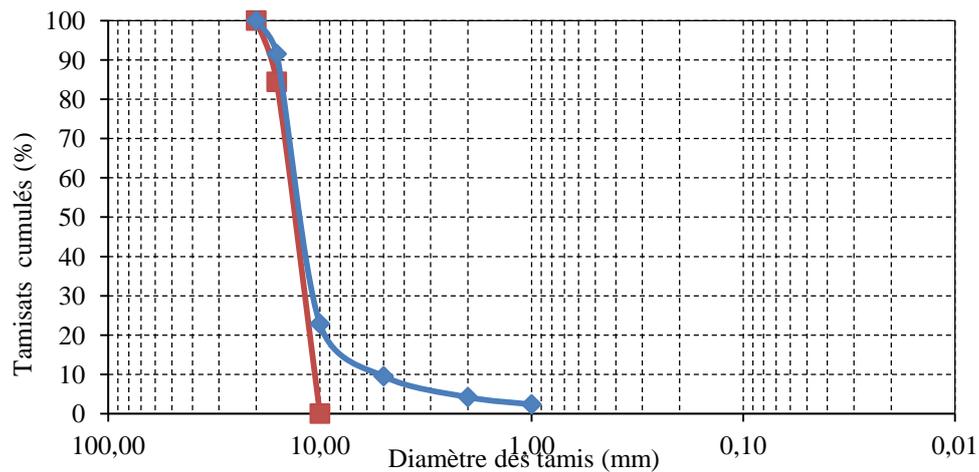


Figure V.11 : Courbes granulométriques avant et après essais (schiste +0% laitier).

L'application numérique a donné :

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

Tableau V.14: Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR.

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

En se référant au tableau V.13 nous déduisons que le schiste est un matériau peu fragmentable (FR = 2.1 < 7)

- Schiste + 30% de laitier

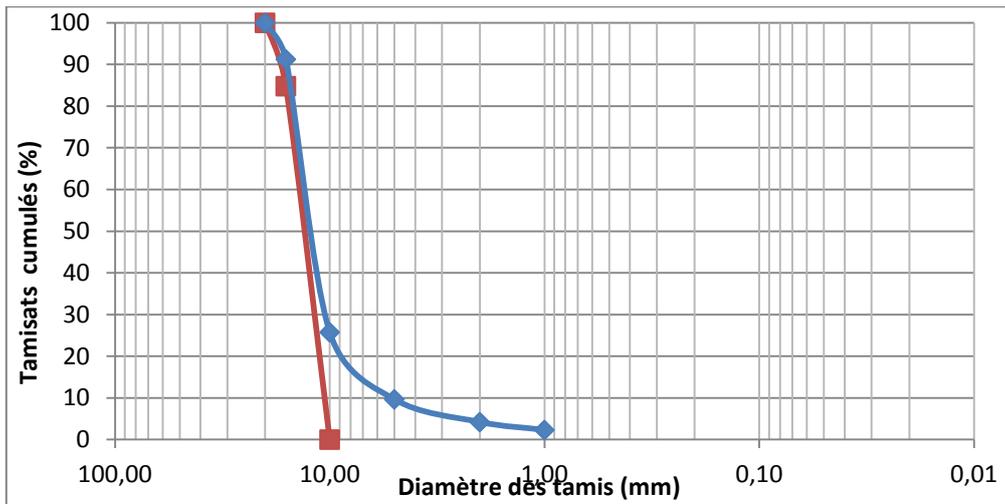


Figure V.12 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage du schiste + 30% laitier.

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{5} = 2.1 \qquad FR = 2.1$$

- Schiste + 40% de laitier

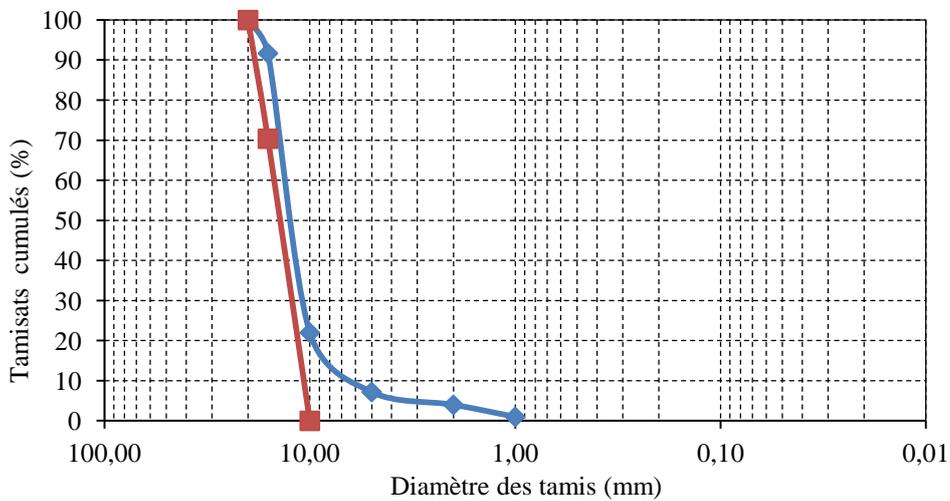


Figure V.13 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage du schiste + 40% laitier.

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10.5}{2.3} = 1.57 \qquad FR = 1.57$$

- Schiste + 50% de laitier

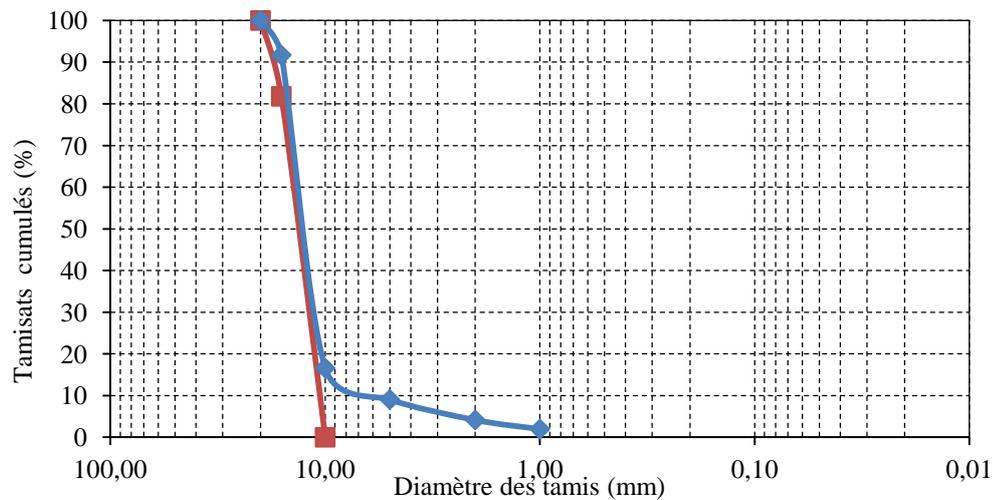


Figure V.14 : Courbes granulométriques avant et après pilonnage du schiste + 50% laitier.

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{10,5}{8} = 1,31$$

$$FR = 1,31$$

D'une manière générale, les résultats obtenus à l'issue des essais de fragmentabilité montrent que les matériaux présentés (schiste seul et schiste + laitier) peuvent être classés dans la catégorie des roches peu fragmentables avec des coefficients de fragmentabilité $FR < 7$.

Cependant, le schiste seul et les mélanges à 30 % de laitier présentent un même comportement (figures V.11 et V.12) avec des coefficients de fragmentabilité égaux ($FR = 2,1$). Au-delà de 30% de laitier, les mélanges développent de meilleures résistances à la fragmentabilité avec des coefficients FR qui se rapproche de plus en plus de 1.

V.6. Conclusion

Une série d'essai en laboratoire a été réalisée dans ce chapitre (Los Angeles, Micro Deval, fragmentabilité, et dégradabilité) afin d'étudier la résistance des matériaux présentés sous sollicitations routières. Les résultats obtenus permettent ainsi, d'avoir une meilleure idée sur l'évolution des matériaux étudiés ce qui permettra sans doute d'éviter certains désordres à court ou à long terme pouvant affecter les projets à réaliser.

Cependant pour mieux cerner le comportement des mélanges étudiés, ils sont soumis à d'autres types d'essais et de sollicitation, à savoir les essais de cisaillement direct à la boîte qui feront l'objet du dernier chapitre suivant.

CHAPITRE VI

ESSAIS DE CISAILLEMENT DIRECT A LA BOITE DE CASAGRANDE

VI.1. Introduction

Dans tous les problèmes de stabilité des sols (étude de fondations, 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.

La résistance d'un sol peut être définie par de nombreux critères : résistance à la compression simple, essai CBR, essai pénétrométrique, essai pressiométrique, essai triaxial. Le présent mode opératoire s'applique exclusivement à l'essai de cisaillement rectiligne, dit à la boîte.

VI.2. Notion de 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 du sol. Ces déformations peuvent être importantes le long de certaines surfaces que l'on appelle « surfaces de glissement » ou « surfaces de la rupture ». La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de la rupture, au moment de la rupture. Cependant, cette notion de résistance au cisaillement n'est pas toujours facile à définir, que ce soit dans un essai de laboratoire, ou dans le sol sur lequel est construit l'ouvrage.

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).

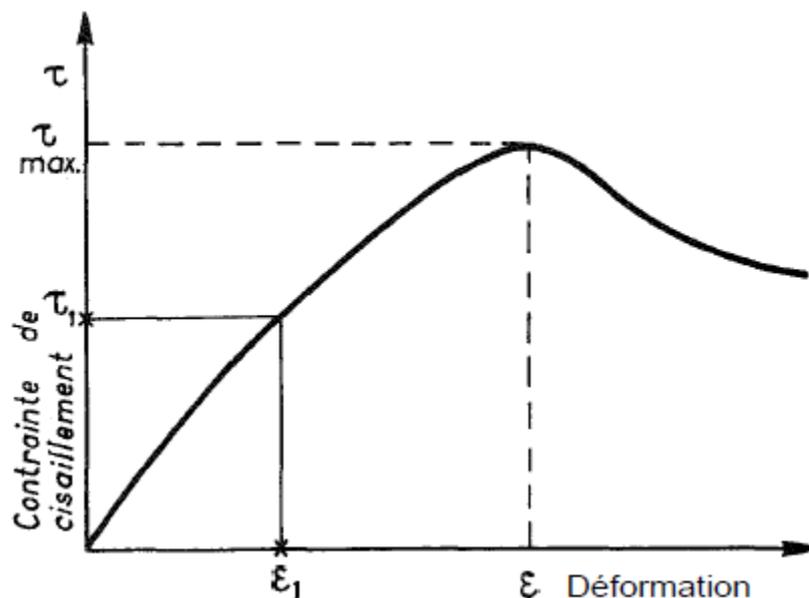


Figure VI.1 : Courbe de contraintes-déformations.

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. But de l'essai

Les valeurs de la résistance au cisaillement qui s'appliquent sur le plan de rupture, ainsi définies sont portées sur un graphe en fonction de la contrainte normale illustré dans la figure VI.2. La courbe obtenue est approximativement une droite appelée « droite intrinsèque » (LCPC, 1987).

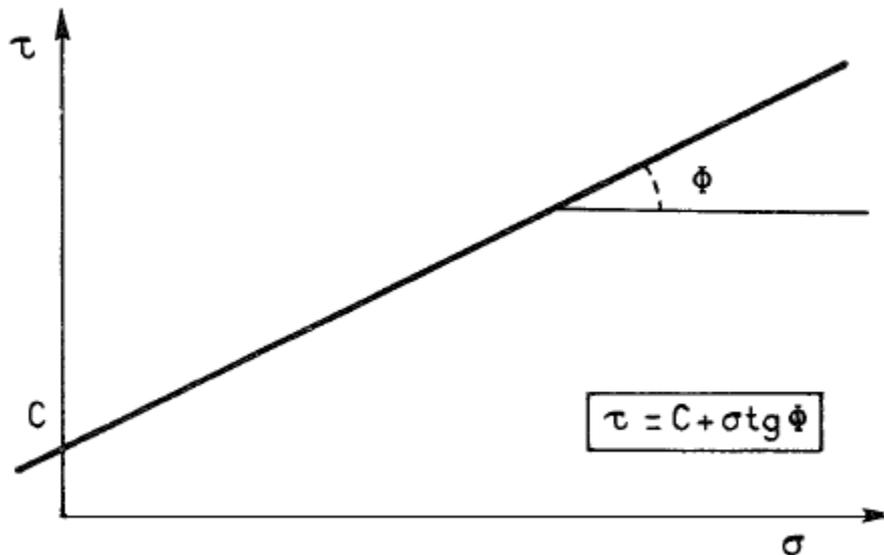


Figure VI.2 : Droite intrinsèque (LCPC, 1987).

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

L'équation de cette droite est donc :

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

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

Trois grandes catégories de sols sont couramment rencontrées :

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

- **Cas des Sols pulvérulents**

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

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.

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

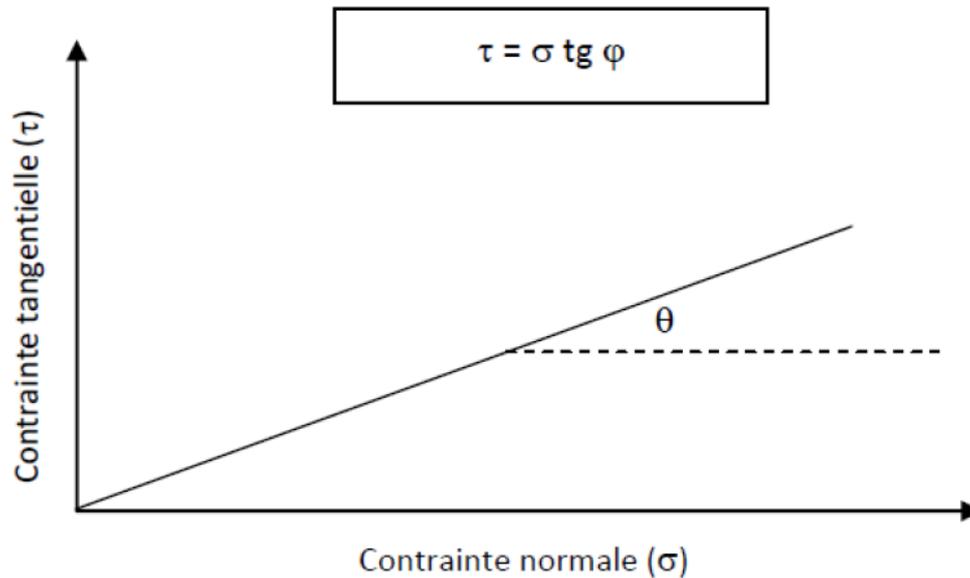


Figure VI.3 : Droite intrinsèque pour le cas des sols pulvérulents.

- **Cas des sols purement cohérents**

Dans le cas des sols purement cohérents illustré 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 :

$$\tau = c.$$

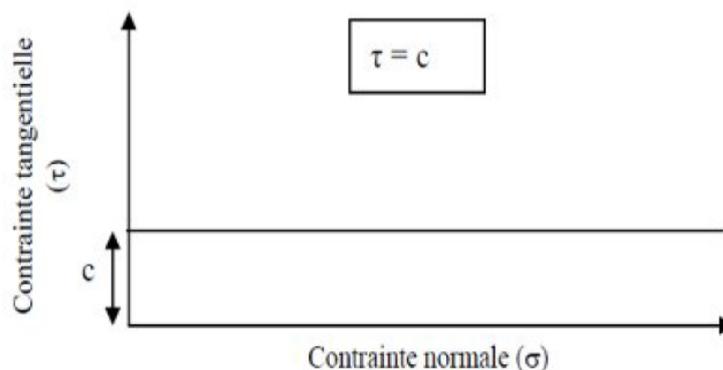


Figure VI.4 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent.

- **Cas des sols cohérents et frottant**

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

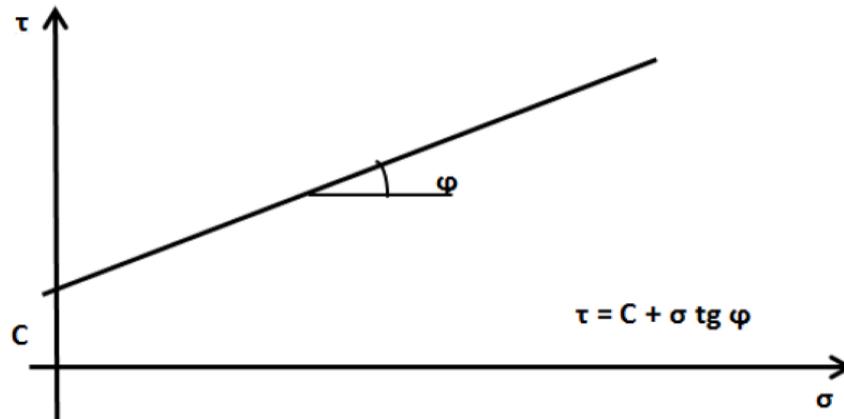


Figure VI.5 : courbe intrinsèque d'un sol cohérent et frottant.

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

Trois types d'essais sont couramment réalisés :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

VI.7. 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.8. Principe de l'essai de cisaillement à la boîte

Le principe consiste à placer l'échantillon de sol à étudier entre deux demi boites 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

le 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).

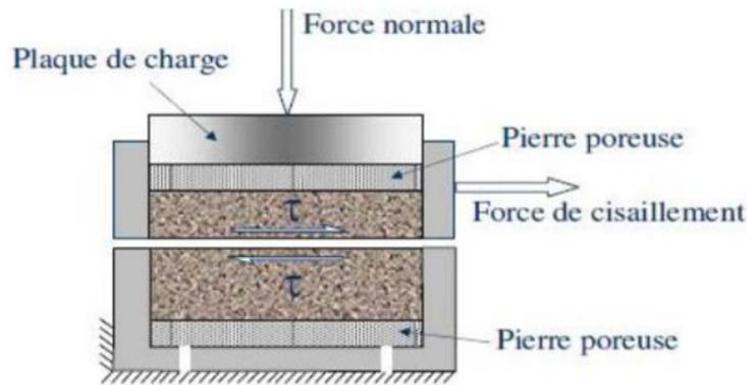


Figure VI.6 : Principe de la boîte de cisaillement.

VI.9. Mode opératoire

1. Solidariser les deux demi-bottes et mettre l'échantillon dans la boîte.
2. Placer la boîte sur le chariot et positionner les comparateurs ou capteurs pour prendre des lectures (déplacement horizontal, déplacement vertical et force tangentielle);
3. Appliquer sur la face supérieure un effort vertical N représentant les contraintes normales $\sigma = 100, 200, 300$ 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.7 : Appareillage de l'essai de cisaillement à la boîte.

VI.10.Expression des résultats

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

- Contraintes tangentielles en fonction des déplacements horizontaux ou des déformations horizontales (contraintes-déplacements ou courbe contraintes-déformations) : $\tau = f(\Delta L)$ ou $\tau = f(\Delta L/L)$;
- Déplacements (ou déformations) verticaux en fonction des déplacements (déformation) horizontaux : $\Delta V = f(\Delta L)$;
- 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 coté de la boîte de cisaillement (L=60mm) ;

ΔL : Déplacement horizontal [mm] ;

ΔV : Déplacement vertical [mm].



Figure VI.8 : Échantillon après cisaillement.

VI.11. Essais réalisés

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

- Schiste + 00 % de laitier
- Schiste + 30 % de laitier
- Schiste + 40 % de laitier
- Schiste + 50 % de laitier

VI.12. Présentation des résultats

- Schiste seul

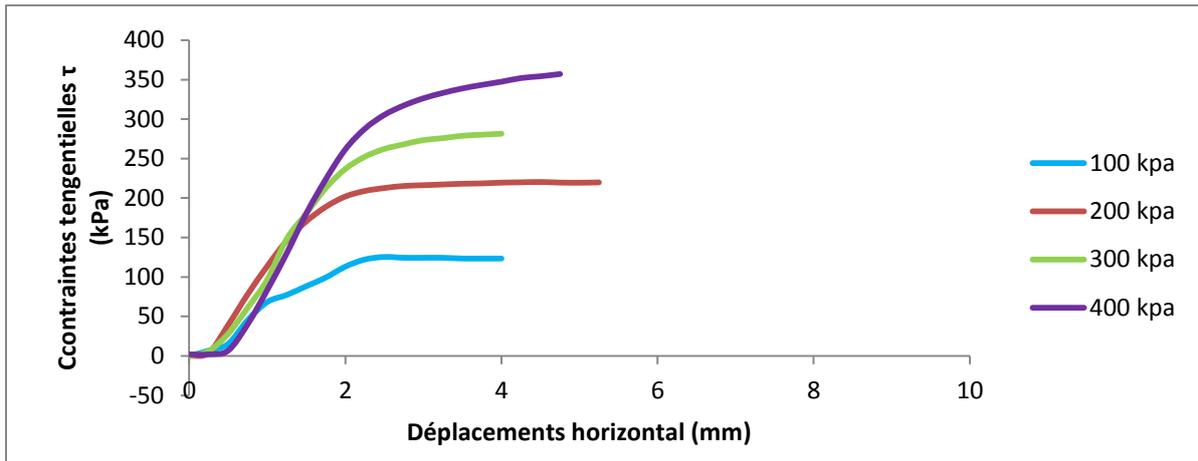


Figure VI.9 : Courbes de variation du volume.

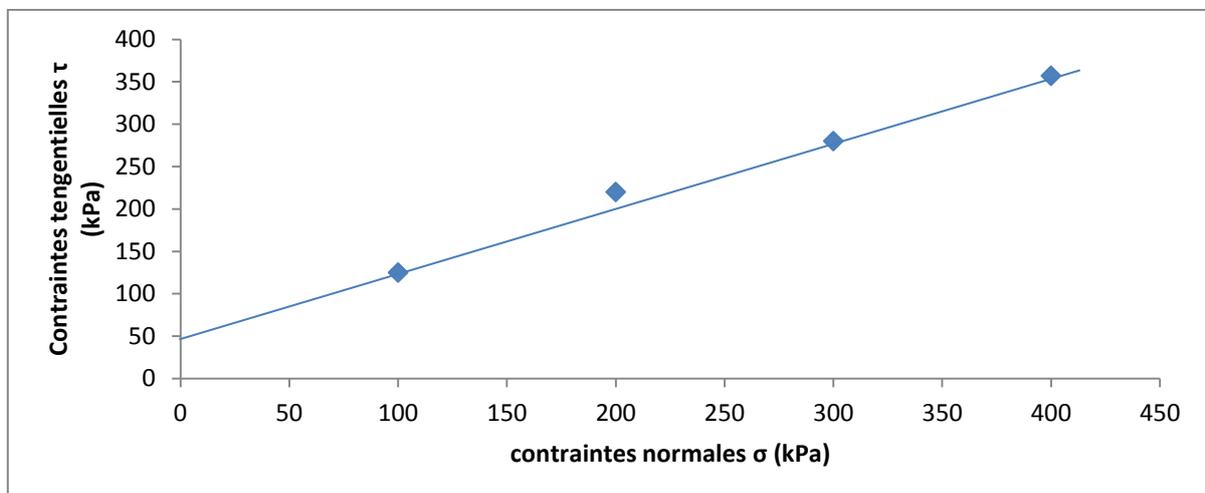


Figure VI.10 : Droite intrinsèque (schiste seul).

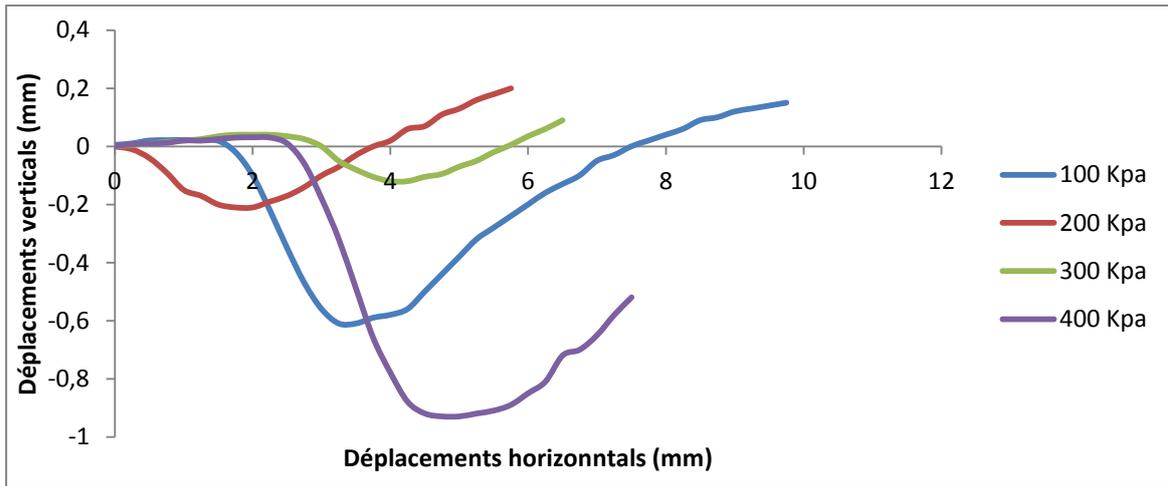


Figure VI.11 : Courbes contraintes-déformations.

• Schiste + 30% de laitier

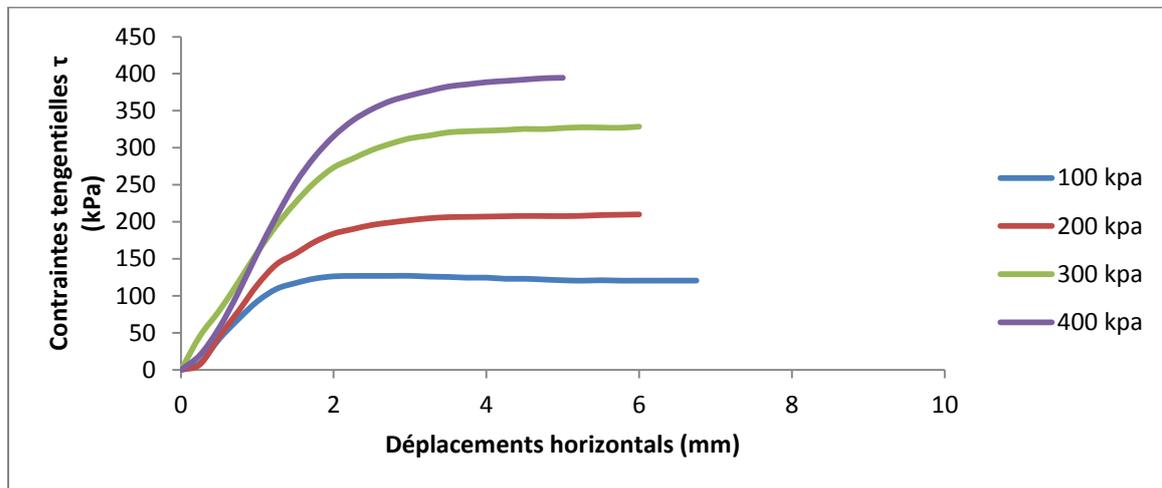


Figure VI.12 : Courbes contraintes-déformations.

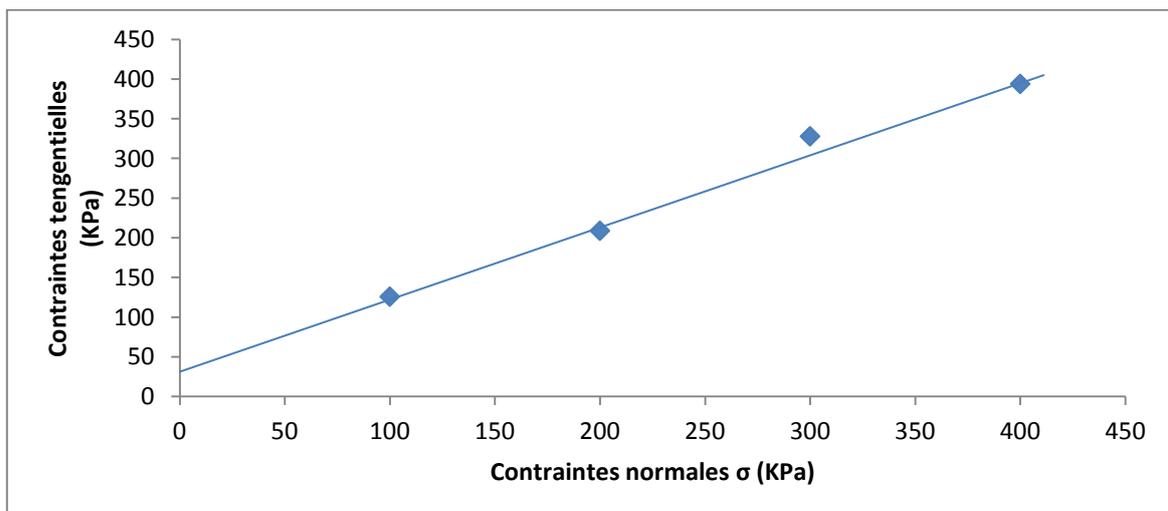


Figure VI.13 : Droite intrinsèque (schiste + 30% laitier).

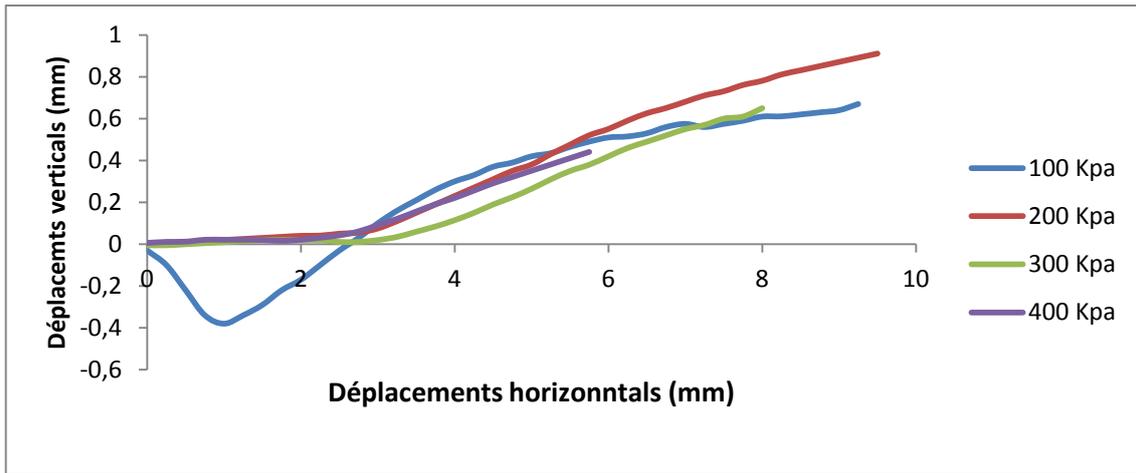


Figure VI.14 : Courbes de variation du volume.

• Schiste + 40% de laitier

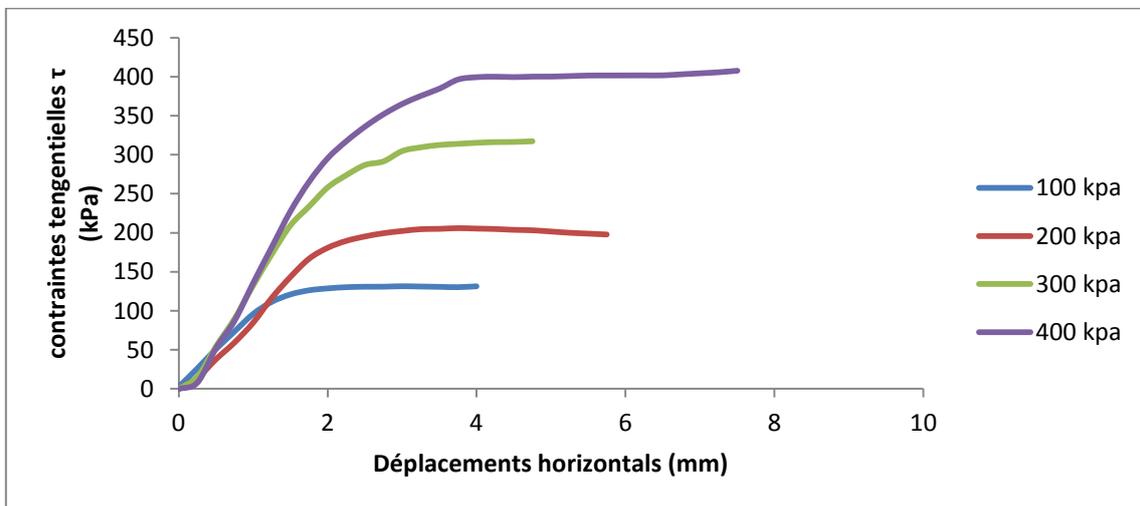


Figure VI.15 : Courbes contraintes-déformations.

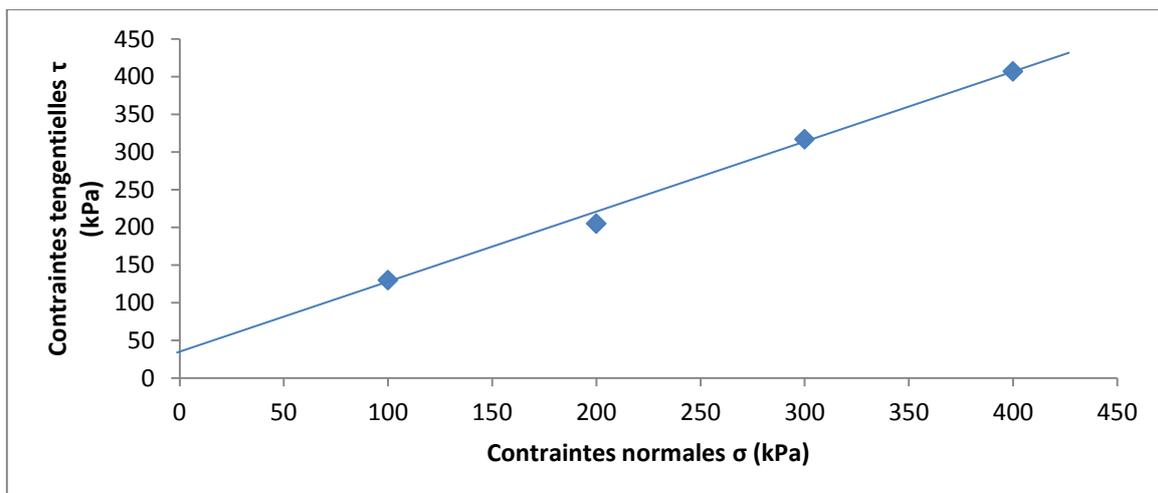


Figure VI.16 : Droite intrinsèque (schiste + 40% laitier).

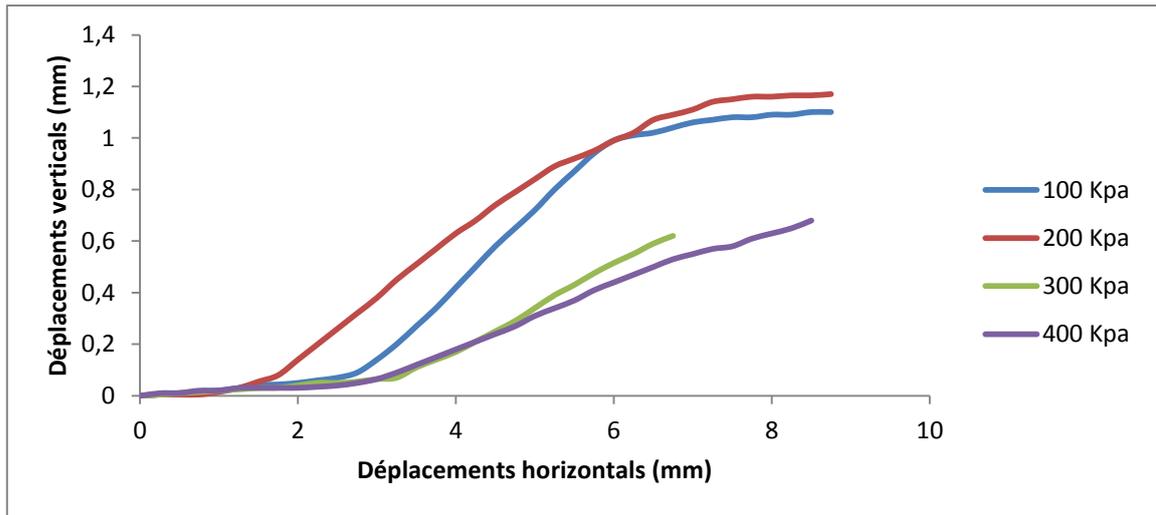


Figure VI.17 : Courbes de variation du volume.

• **Schiste + 50% de laitier**

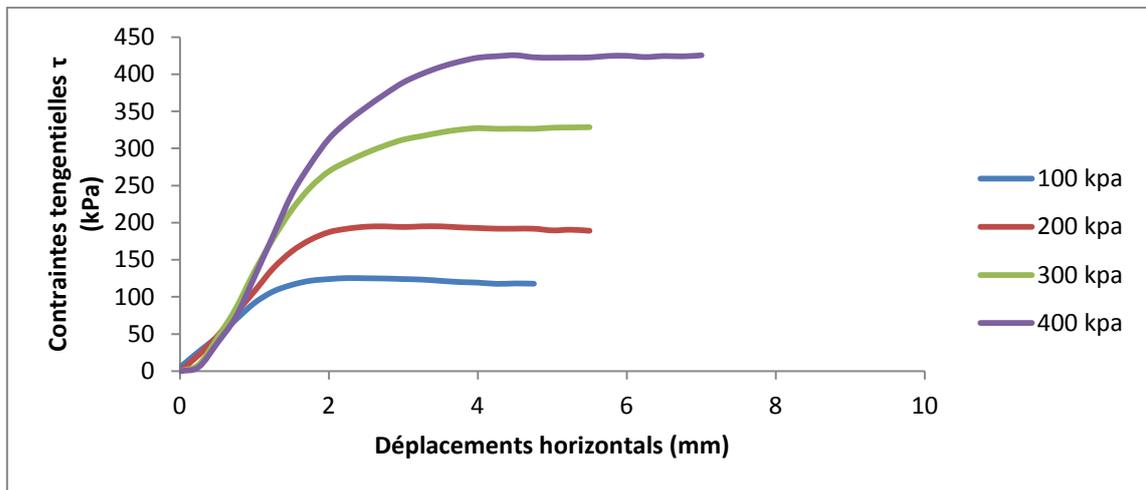


Figure VI.18 : Courbes contraintes-déformations.

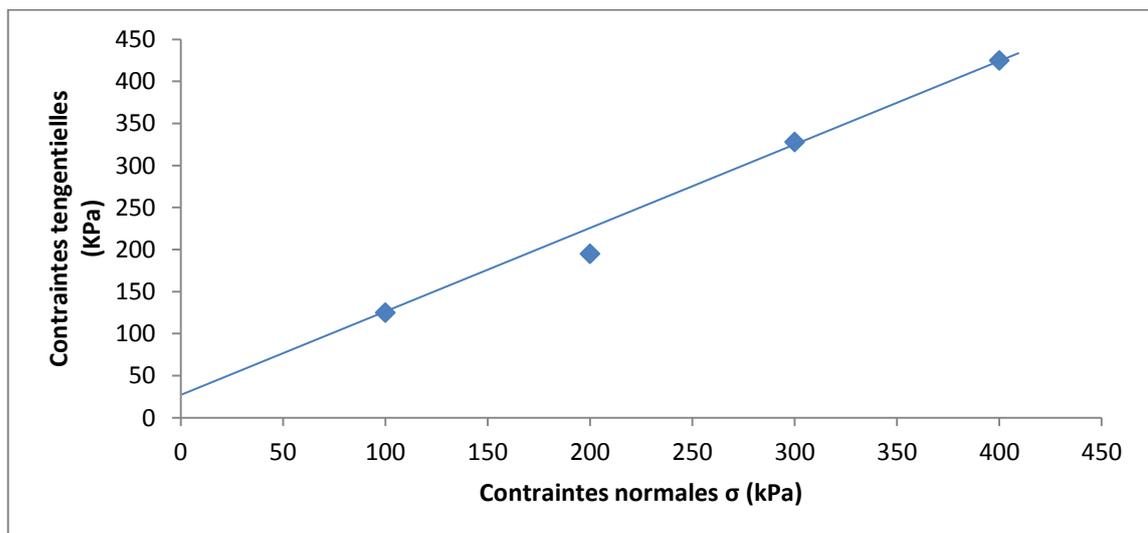


Figure VI.19 : Droite intrinsèque (schiste + 50% laitier).

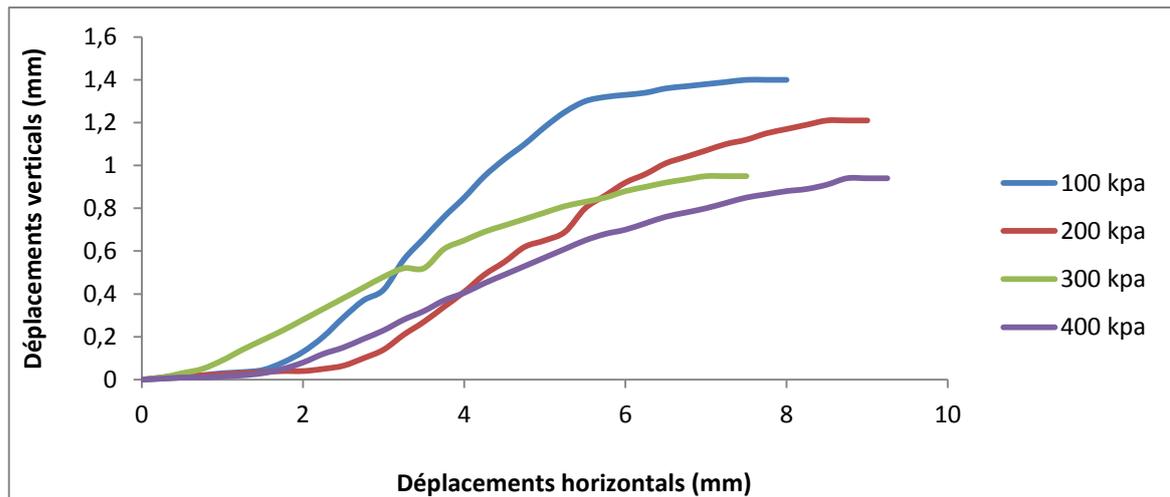


Figure VI.20 : Courbes de variation du volume.

Les courbes présentées sur les figures VI.9, VI.12, VI.15 et VI.18 montrent que la résistance au cisaillement des différents mélanges augmente de plus en plus avec l'accroissement de la contrainte normale appliquée. En effet, l'augmentation des contraintes normales, provoque un resserrement des grains augmentant ainsi le frottement entre ces derniers. Ceci fait accroître leur résistance au cisaillement.

Par contre, le resserrement des grains diminue le volume de l'échantillon, ce qui engendre un comportement de plus en plus contractant au cours du cisaillement en fonction de l'augmentation des contraintes normales (Les figures VI.11, VI.14, VI.17 et VI.20).

Tableau VI.1 : Cohésion des différents mélanges.

Mélange	Cohésion (kPa)
Schiste + 00% laitier	45
Schiste + 30% laitier	40
Schiste + 40% laitier	30
Schiste + 50% laitier	25

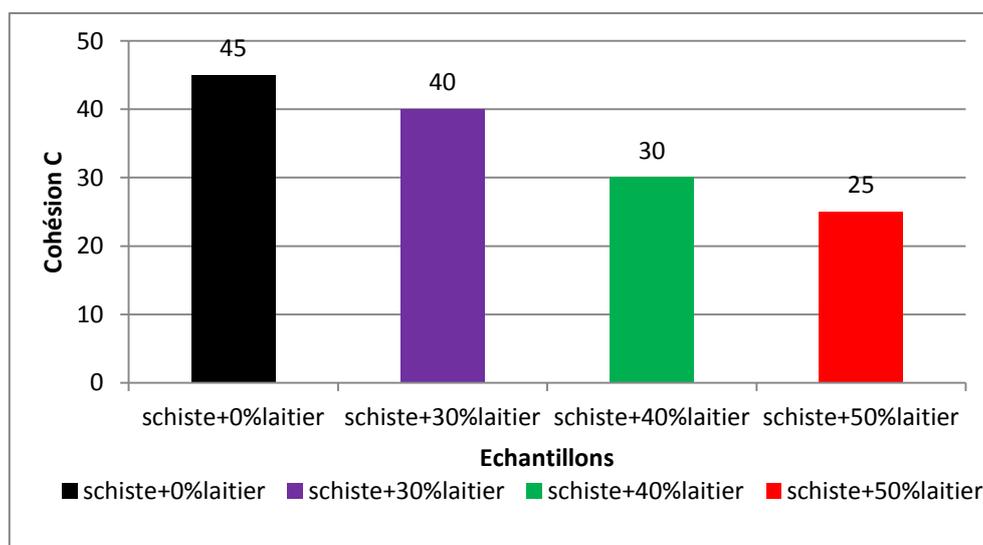


Figure VI.21 : Evolution de la cohésion en fonction de la teneur en laitier.

Par contre, les cohésions des mélanges diminuent progressivement (figure VI.21) avec l'ajout de laitier cristallisé. Cette variation de cohésion peut être liée à la nature des granulats naturels constituant le mélange du fait que les grains du laitier utilisé créent des discontinuités entre les grains de schiste.

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

Mélange	Angle de frottement φ (°)
Schiste + 00% laitier	37.23
Schiste + 30% laitier	40.03
Schiste + 40% laitier	41.98
Schiste + 50% laitier	43.53

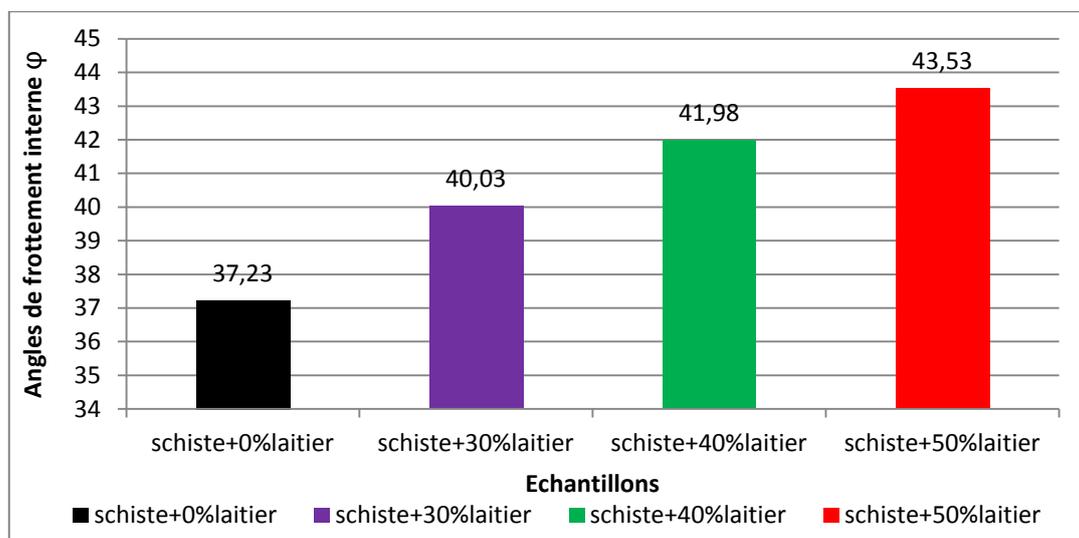


Figure VI.22 : Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de la teneur en laitier.

Les caractéristiques mécaniques de cisaillement obtenues (figures VI.22), montrent que l'angle de frottement interne s'améliore au fur à mesure que l'ajout de laitier cristallisé augmente jusqu'à atteindre la valeur 43.53 (mélange 50% de laitier). En effet, le laitier cristallisé présente des formes très rugueuses. Ceci peut générer des frottements très importants contribuant à la résistance au cisaillement des mélanges.

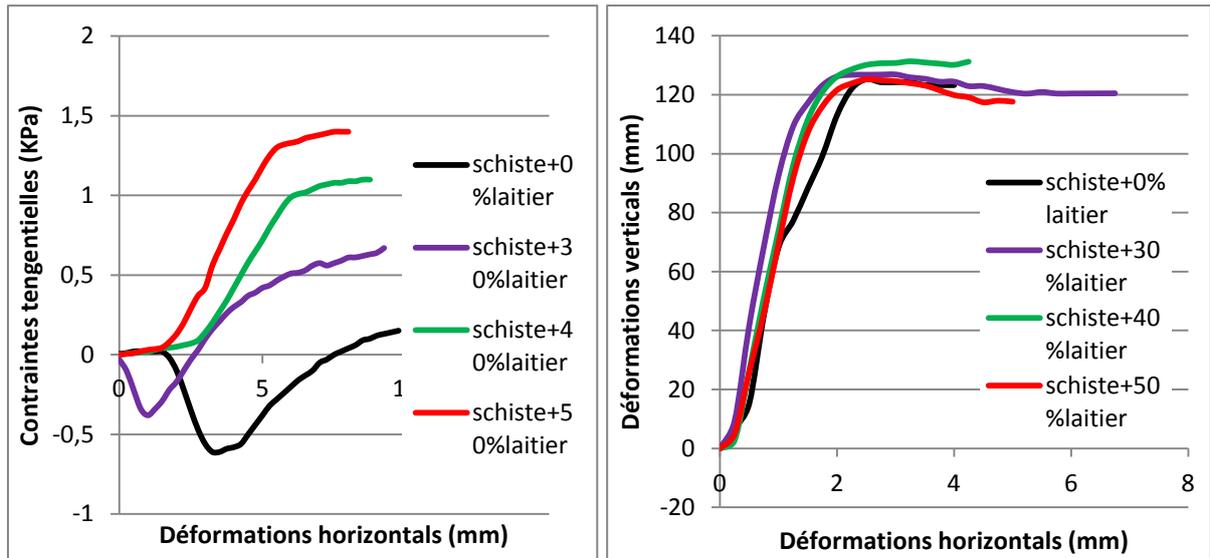


Figure VI.23 : Courbes comparatives à $\sigma = (100 \text{ KPa})$.

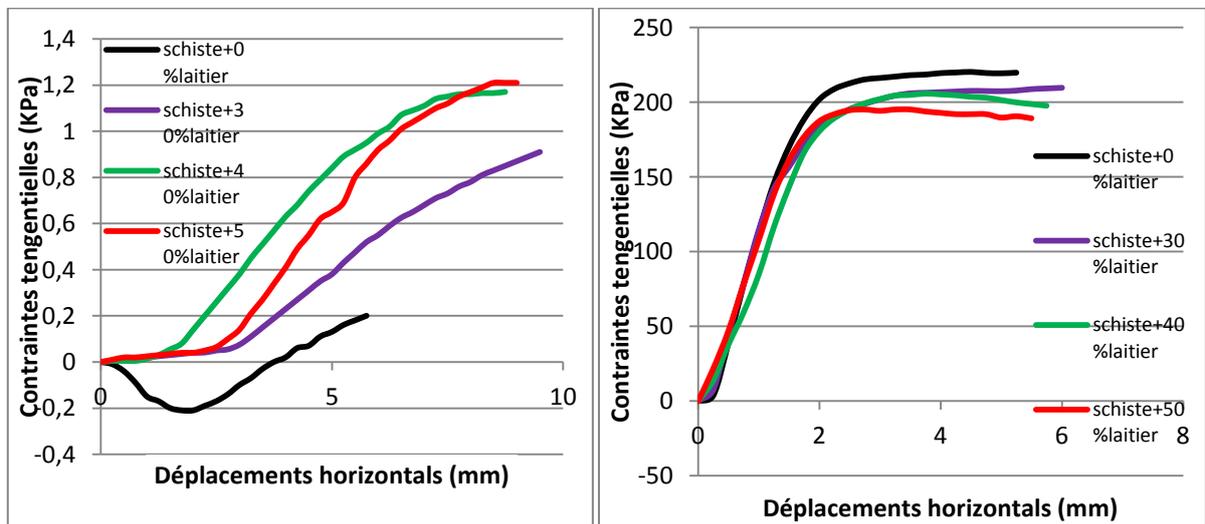


Figure VI.24 : Courbes comparatives à $\sigma = (200 \text{ kPa})$

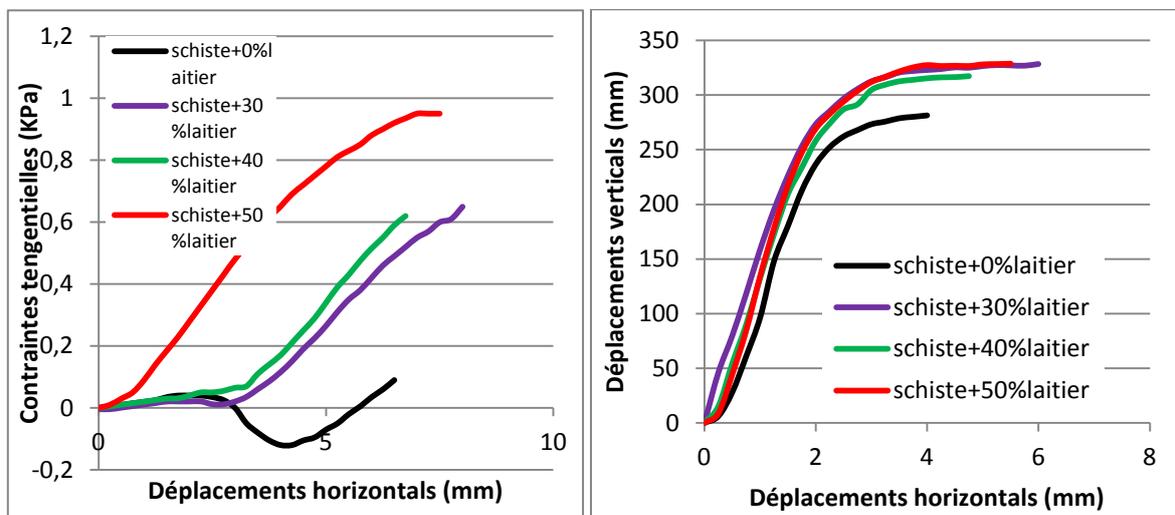


Figure VI.25 : Courbes comparatives à $\sigma = (300 \text{ kPa})$.

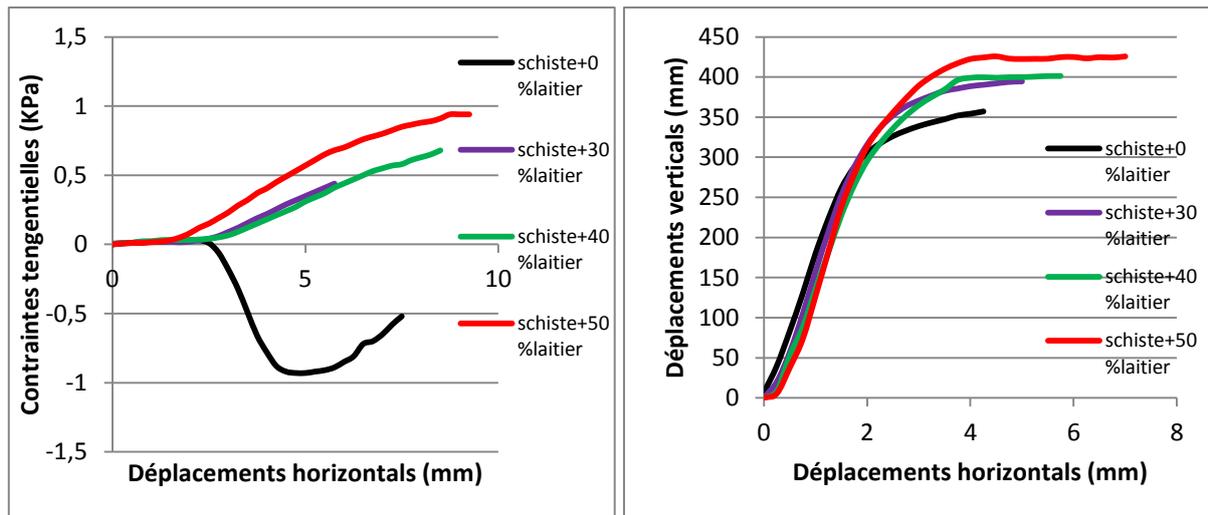


Figure VI.26 : Courbes comparatives à $\sigma = (400 \text{ kPa})$.

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

VI.13. Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement au cisaillement des mélanges (schiste + Laitier), à savoir leurs résistances au cisaillement, leurs variations de volume et l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques en fonction de leur teneur en laitier. 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 du schiste seul.

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 existant 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 nouveaux matériaux locaux, naturels (schiste) et recyclés (laitier cristallisé) particulièrement, dans les corps de chaussées (couches de fondations et couches de base).

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

- Disponibilité ;
- Facilité d'extraction ou de collecte dans le cas de laitier cristallisé;
- Facilité de préparation.

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

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

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

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

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

Les mélanges étudiés (schiste + laitier cristallisé) présentent ainsi des comportements et des propriétés mécaniques très intéressantes, notamment pour de fortes teneurs en laitier (50 %).

Ces résultats permettent de les proposer initialement pour une utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic, notamment en couches de forme et en couches de fondations.

Toutefois, d'autres essais sont indispensables pour mieux cerner la réponse de ces matériaux sous d'autres types de sollicitations et confirmer davantage leur utilisation dans le domaine routier, à savoir les essais cycliques, les essais à long terme sous l'effet d'agents climatiques.

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.

Toutefois, la valorisation des déchets sidérurgiques en génie civil est une action prometteuse, et ça, vue les avantages qu'elle présente et qu'elle pourra présenter dans l'avenir, pour cela la participation des centres de recherche et les centres de formation au développement et à la recherche de nouvelles possibilités de valorisation des laitiers est vivement recommandée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME**, (2014).agence de l'environnement et de la maitrise de l'énergie. Les déchets.
- A. Damien**, Guide de traitement des déchets 6eme édition.
- Annal et Franco. O**, (1999) manuel Mais in imchoot pratique de formation pour cadre des techniques de bureau d'études, Genève, tome 1.
- Arabi N, Molez L**, (2011).les matériaux silico-calcaires ; substitution de chaux éteinte par le laitier granulé du haut fourneau.
- Arquie G et Morel G**, (1988). Le compactage, édition Eyrolles.
- Arquie G**, (1972). Le compactage, route et pistes d'envol, 2^{ème} édition, Eyrolles.
- Baudelet. F**, juin 2012. Stagiaire ADEME Picardie.
- Belouettar. R**, (2003). Journal de recherche chimique, n°7.
- BERG.LR, RAVEN.P.H, HASSENZ AHL.D.M**, (2009). Environnement. Edition : De Boeck.
- BERTOLINI.G**, (1990). Le marché des ordures. Edition : L'harmattan, Paris.
- Brunel .h**, (2005) cour de route université d'Orléans I.U.T de bourges département génie civil. Bruxelles. 605-619.
- CDER**, 4 octobre(2014). Centre de traitement et des énergies renouvelables. 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 : cas des laitiers des hauts fourneaux » Séminaire International « Innovation et Valorisation dans le Génie Civil ». Les 5 – 7 février 2009 à Hammamet, Tunisie. Communication pages79 -89.
- 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.
- CTPL**, (2004). Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques Laitier de Haut-Fourneau Vitriifié granulé ou bouleté.
- CTPL**, 2004. Centre technique et de promotion des laitiers sidérurgiques Laitier de Haut-Fourneau cristallisé)
- Lesbats. D et Pejouan. H**, 6 novembre 2012, les dégradations des chaussées, journée séminaire art-cotita sud ouest.
- Degoutte**, cemagref édition, (2002). Petit barrage : recommandation pour la conception, la réalisation et suivi.

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

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

Faure. M, Edition juin (1998) .TOME 2 structure de chaussée cours de routes.

François. M, 2016. Projet de la commission Patrimoine géologique de Réserves Naturelles de France.

Guettouche. A, compactage des sols

Lacoste. P, (1953), Guide pratique d'identification des roches : notions élémentaires de pétrologie.

Lamtigui. A et Bendani. Y, (2014). Etude bibliographique valorisation des laitiers d'aciéries en génie civil. Ecole des mines de Douai.

Léreau. J, (2006). Cours en génie civil chapitre 3 compactage des sols": institut national des sciences appliquées de Toulouse.

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

LCPC, (1994). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Guide Technique, Conception et dimensionnement des structures de chaussées.

LCPC, (1998). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Catalogues des dégradations de surface des chaussées.

MALEK. A, « Caractéristiques physico - chimiques du laitier de haut fourneau ». Séminaire sur la valorisation des laitiers et des coproduits sidérurgiques - Annaba (Algérie), p17 – 25.

MELBOUCI .B, (2006). Etude du phénomène d'écrasement des grains de schiste au compactage. RFG, N° 117, 4° trimestre. Revue Française de Géotechnique (France) ISSN : 0181 – 0529.

Behim. M, (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.

Norme AFNOR C.B.R (NF P 94 – 078).

Norme AFNOR dégradabilité des sols (NF P 94-056).

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

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

Norme AFNOR fragmentabilité des sols (NF P 94-066).

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

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

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

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

NF EN 13-285 (2010). Graves non traités –spécifications.

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.

Peron. A. (1883). Essai d'une description géologique de l'Algérie, G. MASSON, ÉDITEUR.

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

Saadani. S. (2002). Comportement des bétons à base de granulats recyclés. Mémoire de magister en génie civil. Université Mentouri Constantine.

SETRA, édition(1996). Service technique des routes et autoroutes. Guide pratique, l'entretien courant des chaussées.

Techouani Nana. J.M (1999). (Cours de mécanique des sols. Tome 1, Propriété des sols).Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Groupe EIERETSHER.

Torregrossa. E, Timmermans. M et Pico. J. janvier (2006). Centre de développement des énergies renouvelables. La valorisation des déchets.

Varlet. H. Eyrolles (1966). "Barrages, Réservoirs : barrages en terre et en enrochements. Paris p.36 -58. Tome III.