

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

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



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
En vue de l'obtention du diplôme de master académique

**Filière : Génie Civil**  
**Spécialité : Géotechnique**

*Thème*

**Etude du comportement mécanique d'un mélange  
de débris de béton et de débris de verre pour une  
valorisation en construction routière**

Présenté par : **OUALI Hocine**

Devant le jury composé de :

Mme MEZIANI Faroudja : maitre de conférences classe A à l'UMMTO.....Présidente.

Mme MOBAREK Houria : Maitre-assistante classe A à l'UMMTO.....Examinatrice.

Mr BOUDLAL Omar : Maitre de conférences A à l'UMMTO .....Promoteur.

**Promotion : 2023/ 2024**

## **Remerciements**

*Tout d'abord j'exprime mes remerciements à DIEU le clément qui m'a donné la force et le courage d'aller au bout de mon objectif.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à mon directeur de mémoire Mr BOUDLAL Omar pour ses conseils, ses orientations et surtout son temps ainsi que la confiance qu'il m'a témoigné ; merci pour tous vos efforts.*

*Mes sincères remerciements sont adressés à Mme MEZIANI Faroudja, maitre de conférences classe A à l'UMMTO pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider ce jury.*

*Mes remerciements sont adressés également à Mme MOBAREK Houria maitre assistante classe A à l'UMMTO pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

*C'est ainsi que mes remerciements vont aux responsables des laboratoires de mécanique des sols et de recherche de l'UMMTO :*

*Mme BOUAZZOUNI Fatima, Mr KHELIFA Sid Ali et Mr LACHEBI Kamel pour leurs soutiens, leur disponibilité et surtout leur confiance et qui n'ont à aucun moment lésiné leurs efforts pour m'aider et mettre à ma disposition tout le matériel disponible pour réaliser la partie expérimentale de ce mémoire.*

*Je remercie également tous les enseignants qui m'ont accompagné durant mon cycle universitaire et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce présent travail.*

## ***Dédicaces***

*Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,*

### ***A ma chère mère***

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

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

*Puisse dieu, le très haut, vous accorde santé, bonheur et longue vie.*

### ***A la mémoire de mon père***

*Ce travail est dédié à mon père, décédé trop tôt, qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études, et qui m'a légué une bonne éducation, et valeurs lumières de vie.*

*J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance.*

*Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir dans sa sainte miséricorde.*

*A mes chères sœurs et chers frères pour leurs encouragements permanents, et leurs soutiens.*

### ***A la mémoire de mes grands-parents.***

*A tous mes camarades de ma promo M2 géotechnique et tous mes amis de longue date.*

*A tous les militants de la liberté et de la démocratie.*

***HOCINE***

## LISTE DES PRINCIPALES NOTATIONS ET INDICES

W : Teneur en eau naturelle ;  
Ms : Masse des particules solide ;  
Mh : Masse de l'échantillon à l'état humide ;  
 $\gamma$  : Poids volumique total ;  
 $\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau ;  
 $\gamma_s$  : Poids volumique des grains solides ;  
 $\gamma_h$  : Poids volumique humide ;  
 $\gamma_d$  : Poids volumique sec ;  
e : Indice des vides ;  
Sr : Degré saturation ;  
n : Porosité ;  
 $\rho$  : Masse volumique totale ;  
 $\rho_w$  : Masse volumique de l'eau ;  
 $\rho_s$  : Masse volumique des grains solides ;  
 $\rho_h$  : Masse volumique humide ;  
 $\rho_d$  : Masse volumique sèche ;  
Vw : Volume de l'eau ;  
Vs : Volume des particules solides ;  
Va : Volume de l'air ;  
Vv : Volume des vides ;  
Vt : Volume total ;  
Wopt : Teneur en eau optimale de l'essai Proctor ;  
 $(\gamma_d/\gamma_w)_{\max}$  : la densité sèche maximale ;  
CBR : L'indice CBR immédiat.  
CBRimm : L'indice CBR après immersion ;  
G : Gonflement linéaire relatif ;  
MDE : Le coefficient micro Deval ;  
LA : Le coefficient Los Angeles ;  
D10 : Diamètre correspondant à 10% des tamisats cumulés ;  
DG : Le coefficient de dégradabilité ;  
Fr : Le coefficient de fragmentabilité.

# Liste des figures

## Chapitre I

Figure I. 1 : Coupe type d'une structure de chaussée.....	4
Figure I. 2 : Schéma récapitulatif des différents types de chaussées.....	6
Figure I. 3: Chaussées souples assise non traitée .....	7
Figure I. 4: Chaussées bitumineuses épaisses d'assis en grave (GB).....	7
Figure I. 5: Chaussées à structure mixte.....	8
Figure I. 6: Chaussées rigides assise en béton.....	8
Figure I. 7: Chaussées semi-rigide épaisses assise en graves hydrauliques(GH).....	8
Figure I. 8: Chaussées à structure inverse .....	8
Figure I. 9: Rôle et fonctionnement de couches d'une chaussée .....	9
Figure I. 10 : Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante.....	10
Figure I. 11: L'orniérage grand rayon .....	11
Figure I. 12: L'orniérage à faible rayon .....	12
Figure I. 13 : Affaissement de rive.....	12
Figure I. 14: L'affaissement hors rive.....	13
Figure I. 15: soulèvement différentiel .....	13
Figure I. 16: Fissures transversales. ....	14
Figure I. 17: Fissuration longitudinale .....	14
Figure I. 18: Faïençage.....	15
Figure I. 19: Nid de poule .....	16
Figure I. 20 : pelade.....	16
Figure I. 21 : Plumage généralisé.....	17
Figure I. 22 : Ressuage .....	17
Figure I. 23 : Grave non traité .....	19
Figure I. 24 :matériaux concassés .....	19
Figure I. 25 : Consommation de granulats de quelques ouvrages .....	19
Figure I. 26 : : production mondiale de granulats .....	20
Figure I. 27 : évolution de la production nationale de granulats .....	20

## Chapitre II

Figure II. 1: Opération de démolition de la ville de Ain El Hammam .....	26
Figure II. 2: Démolition de constructions illicites à Bejaïa.....	26
Figure II. 3: Tremblement de terre 6 février 2023.....	26

Figure II. 4: restes des coffrages en bois .....	27
Figure II. 5: restes des matériaux de construction et gravats.....	27
Figure II. 6: préparation à la cisaille et déferraillage magnétiques .....	32
Figure II. 7: collecte de bouteilles dans la nature.....	34
Figure II. 8: débris de verre industriel .....	34
Figure II. 9: Les filières de recyclage des déchets en action .....	38
Figure II. 10: Concassage mobile, valorisation déchets inertes. ....	39

### **Chapitre III**

Figure III. 1: décharge des débris de béton .....	41
Figure III. 2: déchets du laboratoire de béton de la faculté.....	41
Figure III. 3: Concassage du béton.....	42
Figure III. 4: tamisage du béton NFEN13-285(2010).....	43
Figure III. 5: Courbe granulométrique des matériaux et des mélanges étudiés selon la norme .....	43
Figure III. 6: Mode opératoire. (Pesée hydrostatique).....	44
Figure III. 7: Exécution de l'essai avec pycnomètre. ....	46
Figure III. 8: verre déposé anarchiquement dans la nature.....	49
Figure III. 9: tri et préparation du verre.....	50
Figure III. 10: sable de verre de fraction 0/2 pour la première partie.....	50
Figure III. 11: sable de verre grossier, moyen, fin pour la deuxième partie.....	51

### **Chapitre IV**

Figure IV. 1 : Compactage des sols.....	55
Figure IV. 2: Équipements légers de compactage.....	57
Figure IV. 3 : Quelques engins lourds de compactage sur chantier .....	57
Figure IV. 4: Influence de l'énergie de compactage. ....	58
Figure IV. 5: Influence de la teneur en eau sur le compactage. ....	59
Figure IV. 6 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.....	59
Figure IV. 7: Essai de compactage.....	60
Figure IV. 8 : Essais Proctor modifié pour les différents mélanges. ....	61
Figure IV. 9: Courbe Proctor débris de béton seuls. ....	62
Figure IV. 10: Courbe Proctor pour les débris de béton + 10% de débris de verre.....	63

Figure IV. 11: Courbe Proctor pour les débris de béton + 15% de débris de verre.....	63
Figure IV. 12: Courbe Proctor des débris de béton + 20% de débris de verre .....	64
Figure IV. 13: Courbe Proctor des débris de béton + 40% de débris de verre .....	65
Figure IV. 14: Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.....	65
Figure IV. 15 : Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de débris de verre.....	66
Figure IV. 16 : Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de débris de verre.....	67
Figure IV. 17: Courbe Proctor des débris de béton + débris de verre fin.....	68
Figure IV. 18: Courbe Proctor des débris de béton + débris de verre fin et moyen .....	68
Figure IV. 19 : Courbe Proctor des débris de béton + débris de verre fin, moyen et grossier .....	69
Figure IV. 20: Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.....	69
Figure IV. 21: Évolutions des densités sèches en fonction de l'ajout de débris de verre.....	70
Figure IV. 22: Évolutions des teneurs en eau en fonction de l'ajout de débris de verre. ....	71
Figure IV. 23: Confection de l'éprouvette pour essai CBR .....	73
Figure IV. 24: La machine de poinçonnement LoadTrac II (LGEA).....	74
Figure IV. 25: poinçonnement des éprouvettes laboratoire LGEA .....	75
Figure IV. 26: Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement.....	76
Figure IV. 27: Courbes enfoncements-forces des échantillons avant immersion(CBR).....	77
Figure IV. 28: : Evolution des indices CBR immédiat en fonction des pourcentages de débris de verre. .....	78
Figure IV. 29 : Courbes enfoncements-forces des échantillons après immersion(CBRimm) .....	79
Figure IV. 30: Evolution des CBR imm en fonction des pourcentages de débris de verre .....	80
Figure IV. 31: Courbes comparatives des indices CBR et CBRimm des différents pourcentages de débris de béton.....	81
Figure IV. 32: Courbes enfoncements-forces débris de béton + verre fin, moyen et grossier .....	82
Figure IV. 33: Evolution des indices CBR immédiat en fonction de la teneur en débris de verre. ....	82
Figure IV. 34: Courbes enfoncements-forces débris des échantillons (CBRimm).....	83
Figure IV. 35 : Evolution des indices CBR après immersion en fonction des pourcentages des débris de verre.....	84

Figure IV. 36: Courbes comparatives des indices CBR et CBRimm des différents ajouts de débris de verre.....	85
---	----

## **Chapitre V**

Figure V. 1 : Machine Micro-deval.....	87
Figure V. 2: Mode opératoire de l'essai micro Deval. ....	88
Figure V. 3: Machine d'essai Los Angeles. ....	89
Figure V. 4: Mise en place des granulats pour l'essai Los Angeles.....	91
Figure V. 5: Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité. ....	93
Figure V. 6: Courbes granulométriques avant et après essais des débris de béton.....	95

# Liste des tableaux

## Chapitre II

Tableau II. 1: Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement.... 24

## Chapitre III

Tableau III. 1: Détermination de la teneur en eau..... 44

Tableau III. 2: Résultats de la détermination de la masse volumique sèche..... 45

Tableau III. 3: Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche..... 45

Tableau III. 4: Résultats de la détermination de la masse volumique des particules solides... 47

Tableau III. 5: Appréciation du degré de saturation. (D'après TERZAGHI). ..... 48

Tableau III. 6 résultats des essais d'identification ..... 48

Tableau III. 7 différentes propriétés physiques et mécaniques du verre ..... 52

Tableau III. 8: Composition chimique de verre (bouteilles). ..... 53

## Chapitre IV

Tableau IV. 1 : Conditions des essais Proctor normal et modifié NF P 94-078. .... 61

Tableau IV. 2 Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton seuls. .... 62

Tableau IV. 3: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 10% de débris de verre ..... 62

Tableau IV. 4: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 15% de débris de verre ..... 63

Tableau IV. 5: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 20% de débris de verre ..... 64

Tableau IV. 6: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 40% de débris de verre ..... 64

Tableau IV. 7: Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales. 66

Tableau IV. 8: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + verre fin ..... 67

Tableau IV. 9: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton +verre fin et moyen ..... 68

Tableau IV. 10: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + verre fin, moyen et grossier ..... 69

Tableau IV. 11: Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.

.....	70
Tableau IV. 12: Résultats des essais indice portant immédiat. ....	77
Tableau IV. 13: Résultats des essais CBR immergé. ....	79
Tableau IV. 14: Résumé des résultats d'essai (IPI et CBR imm). ....	80
Tableau IV. 15: Résultats des essais CBR immédiat (CBR). ....	82
Tableau IV. 16: Résultats des essais CBR immersion (CBRimm). ....	83
Tableau IV. 17: Résumé des résultats d'essai (CBR et CBR imm). ....	84

## **Chapitre V**

Tableau V. 1: Charge de boulets suivant le type de classe granulaire. ....	87
Tableau V. 2: Type de gravier selon le coefficient MDE ....	89
Tableau V. 3 : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire. ....	90
Tableau V. 4: Coefficients LA et MDE pour l'échantillon. ....	91
Tableau V. 5: Coefficients LA et MDE pour l'échantillon. ....	92
Tableau V. 6: Classification des matériaux rocheux. ....	93
Tableau V. 7: Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR. ....	95

# Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I

I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition et rôle d'une chaussée.....	3
I.3. Les principales couches de chaussées.....	3
I.3.1. Plateforme support de chaussée.....	4
I.3.2. La couche d'assise.....	5
I.3.3. Couche de surface.....	5
I.4. Les différents types de chaussées.....	5
I.4.1. Les chaussées souples.....	6
I.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses.....	6
I.4.3. Les chaussées en assise traitée aux liants hydrauliques.....	6
I.4.4. Les chaussées à structure inverse.....	7
I.4.5. Les chaussées à structure mixte.....	7
I.4.6. Les chaussées en béton de ciment.....	7
I.5. Rôle et fonctionnement d'une chaussée.....	9
I.6. Paramètres pris en compte pour le dimensionnement d'une chaussée.....	9
I.7. Fonctionnement et endommagement des chaussées souples.....	10
I.8.1. Causes de dégradations des chaussées.....	10
I.8.2. Types de dégradations des chaussées.....	11
I.8.2.1. les déformations.....	11
I.8.2.2. Les fissurations.....	13
I.8.2.3. Les arrachements des enrobages.....	15
I.8.2.4. Les remontées.....	17
I.9. Matériaux routiers.....	17
I.9.1. Les granulats.....	17
I.9.2.1. Les caractéristiques exigées des granulats.....	18
I.9.2. Les graves non traités 0/D(GNT).....	18
I.9.3. Les matériaux d/D (pierres cassées).....	18
I.10. Production des granulats dans le monde.....	19
I.11. Consommation de granulats en Algérie.....	20
I.12. Conclusion.....	21

## Chapitre II

II.1. Introduction.....	22
II.2. Généralités sur les déchets.....	22

II.2.1. Définition d'un déchet .....	22
II.2.2. Les différents types de déchets .....	22
II.2.3. Les grandes catégories de déchets de chantier.....	24
II.2.4. Origine de la production des déchets. ....	25
II.2.5. Les déchets de construction et de démolition .....	25
II.3. Généralités sur le verre .....	27
II.3.1. Définition du verre.....	27
II.3.2. La composition du verre .....	27
II.3.3. Principales matières premières du verre .....	28
II.3.3.1. Les oxydes formateurs .....	28
II.3.3.2 Les oxydes modificateurs.....	28
II.3.3.3 Les stabilisants .....	29
II.4. Le recyclage.....	30
II.4.1. Les types de recyclage .....	30
II.4.2. Recyclage de déchets dans le domaine du génie civil .....	30
II.4.2.1. Processus du recyclage des déchets du bâtiment.....	31
II.4.2.2. Elaboration .....	31
II.4.3. Les Avantages des matériaux de déconstruction recyclés .....	32
II.4.3.1. Réduction de l'effet environnementale et Protection des sites de décharges.....	32
II.4.3.2. Economie et épargne des matériaux.....	32
II.4.3.3. Economie de l'énergie.....	33
II.4.3.4. Créations de l'emploi .....	33
II.4.4. Le recyclage du verre.....	33
II.4.4.1. Origines du verre recyclé .....	34
II.4.4.2. Domaines d'utilisations.....	35
II.4.5. Avantage du recyclage du verre.....	37
II.4.6. Les Inconvénients du recyclage .....	37
II.5. Conclusion .....	39

### **Chapitre III**

III.1. Introduction .....	40
III.2. Présentation et identification des matériaux.....	40
III.2.1. Les débris de béton .....	40
III.3. Présentation et identification des débris de béton étudiés.....	40
III.3.1. Concassage et tamisage du béton .....	41
III.3.2. Teneur en eau (w) .....	43
III.3.3. Les masses volumiques .....	44
III.3.4. Indice des vides (e) .....	47

III.3.5. Degré de saturation (Sr).....	47
III.3.6. Porosité .....	48
III.4. Débris de verre de bouteilles .....	49
III.4.1. Collecte et concassage .....	49
III.4.2. Tamisage du verre .....	50
III.4.3. Quelques propriétés du verre .....	51
III.4.4. Composition chimique.....	52
III.5. Préparation des échantillons.....	53
III.6. Conclusion.....	53

## **Chapitre IV**

IV.1. Introduction .....	54
IV.2. Essais de compactage .....	54
IV.2.1. Définition du compactage NF P 94-078.....	54
IV.2.2. Objectif du compactage.....	55
IV.3. Classification des sols en vue du compactage .....	55
IV.3.1. Les enrochements .....	55
IV.3.2. Sables et graviers.....	55
IV.3.3. Limons, sols siliceux .....	56
IV.3.4. Argiles .....	56
IV.3.5. Le compactage sur le chantier .....	56
IV. 3.6. Matériel et procédés spéciaux de compactage in-situ .....	56
IV.4. Les facteurs qui influencent le compactage.....	57
IV.4.1. Energie de compactage.....	57
IV.4.2. Teneur en eau .....	58
IV.4.3. Nature du sol .....	59
IV.5. Les essais de compactage au laboratoire.....	59
IV.5.1. Essais réalisés .....	61
IV.5.2. Expression des résultats.....	62
IV.6. Essais de portance CBR (California Bearing Ratio) NF P 94-078 .....	71
IV.6 .1. But de l'essai .....	72
IV.6.2. Principe de l'essai.....	72
IV.6.3. Matériel utilisé.....	73
IV.6.4. Matériel de poinçonnement .....	74
IV.6.5. Mode opératoire .....	74
IV.6.6. Détermination de l'indice CBR immédiat.....	74
IV.6.7. Détermination de l'indice CBR après immersion (mesure du gonflement relatif) ...	75
IV.7. Expression des résultats .....	76

IV.7.1. Interprétation des résultats de la Première partie .....	76
IV.7.2. Interprétation des résultats de la deuxième partie .....	81
IV.8. Conclusion .....	85

## **Chapitre V**

V.1.Introduction .....	87
V.2. Essai micro Deval.....	87
V.2.1. Définition et But de l'essai (NF P18-572).....	87
V.2.2. Principe de l'essai .....	87
V.2.3. Matériaux utilisées.....	89
V.2.4. Résultats de l'essai.....	89
V.3. Essai Los Angeles .....	89
V3.1. Définition et but de l'essai (NF P18 573).....	89
V.3.2. Principe de l'essai .....	90
V.3.3. Matériaux utilisés.....	91
V.3.4. Résultats des essais .....	91
V.4. Essai de dégradabilité des matériaux rocheux (NF P 94-056) .....	92
V.4.1. Principe de l'essai .....	92
V.4.2. Exécution de l'essai .....	92
V.4.3. Résultats obtenus .....	93
V.5. Essai de fragmentabilité des matériaux rocheux (NF P 94-066).....	94
V.5.1. Principe de l'essai.....	94
V.5.2. Exécution de l'essai .....	94
V.5.3. Matériaux utilisés.....	94
V.5.4. Résultats des essais .....	95
V.6. Conclusion.....	95
Conclusions et perspectives .....	97

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Le développement durable est particulièrement lié aux ouvrages de génie civil, notamment les infrastructures routières. Cependant, la construction de ces ouvrages nécessite une quantité croissante d'agrégats, souvent au-delà des capacités des carrières existantes. En Algérie, par exemple, la demande annuelle dépasse les 60 millions de mètres cubes de sable et de gravier en 2009, principalement pour les travaux publics.

Cette surexploitation des carrières pose un problème environnemental sérieux, alors que les ressources naturelles diminuent tandis que la demande augmente. Parallèlement, d'importantes quantités de déchets sont générées par le secteur du bâtiment, des travaux publics et de l'industrie, offrant potentiellement une solution pour préserver les ressources naturelles en recyclant ces déchets pour créer des matériaux alternatifs. Elle permet simultanément de répondre au déficit entre production et consommation.

Plusieurs matériaux tels que, les débris de béton, les débris de verre, les déchets plastiques, etc ont fait l'objet de recyclage dans l'optique de les utiliser comme matériaux de travaux publics. Certains d'entre eux ont déjà donné des résultats très satisfaisant et ont été mise en œuvre dans des projets réels dépassant le stade de l'expérimentation au laboratoire, le taux de recyclage des débris de déconstruction/démolition a atteint dans certains pays les 80 %.

Le travail réalisé et présenté dans ce mémoire rentre dans cette perspective ; il consiste à étudier le comportement mécanique d'un mélange de débris de béton et de débris de verre de bouteilles pour une éventuelle utilisation dans la construction routière.

Après avoir identifié les matériaux sélectionnés, des échantillons en mélanges à différentes proportions des deux matériaux (débris de béton et débris de verre) sont reconstitués et 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 proprement dits (Los Angeles, Micro Deval, fragmentabilité et dégradabilité).

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 cinq chapitres, synthétisés par des conclusions et quelques perspectives.

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

Le chapitre II, est consacré aux généralités sur le recyclage et la valorisation des matériaux recyclés, particulièrement les débris de béton et les débris de verre. Il permet de montrer également l'intérêt du recyclage dans le génie civil.

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

Dans le chapitre IV, nous avons présenté la première série d'essais mécaniques réalisés au laboratoire à savoir, les essais de compactage au Proctor modifié et les essais de portance CBR. Ces essais permettent d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage ainsi que leur portance à l'état normal et sous les plus mauvaises conditions hydrométriques.

Le chapitre V, porte sur les principaux essais routiers indispensables dans toute construction routière ; à savoir les essais Los Angeles, les essais Micro-Deval, les essais de dégradabilité et les essais de fragmentabilité.

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 LESCHAUSSEES

### I.1. Introduction

Le succès de toute politique visant le développement économique ou social dépend essentiellement de la qualité du réseau routier disponible. Ce réseau joue un rôle crucial en répondant à la demande croissante de déplacements des individus et en facilitant le transport des marchandises, éléments essentiels dans un système économique en pleine évolution. Ainsi, l'importance de construire des routes durables est incontestable, surtout étant donné les investissements substantiels requis pour de tels projets. Ce chapitre abordera donc de manière générale les caractéristiques des routes modernes, les différentes couches qui les composent, les principaux types de revêtements, les facteurs pris en compte lors de leur conception, ainsi que les phénomènes de déformation observés dans les revêtements souples.

### I.2. Définition et rôle d'une chaussée

Selon le "Manuel d'Entretien Routier" publié par le Ministère des Transports du Québec (Canada), une chaussée est "une structure construite sur le sol naturel ou artificiel, supportant la circulation des véhicules, protégeant le sol naturel contre les effets de la circulation et assurant le confort et la sécurité des usagers".

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.

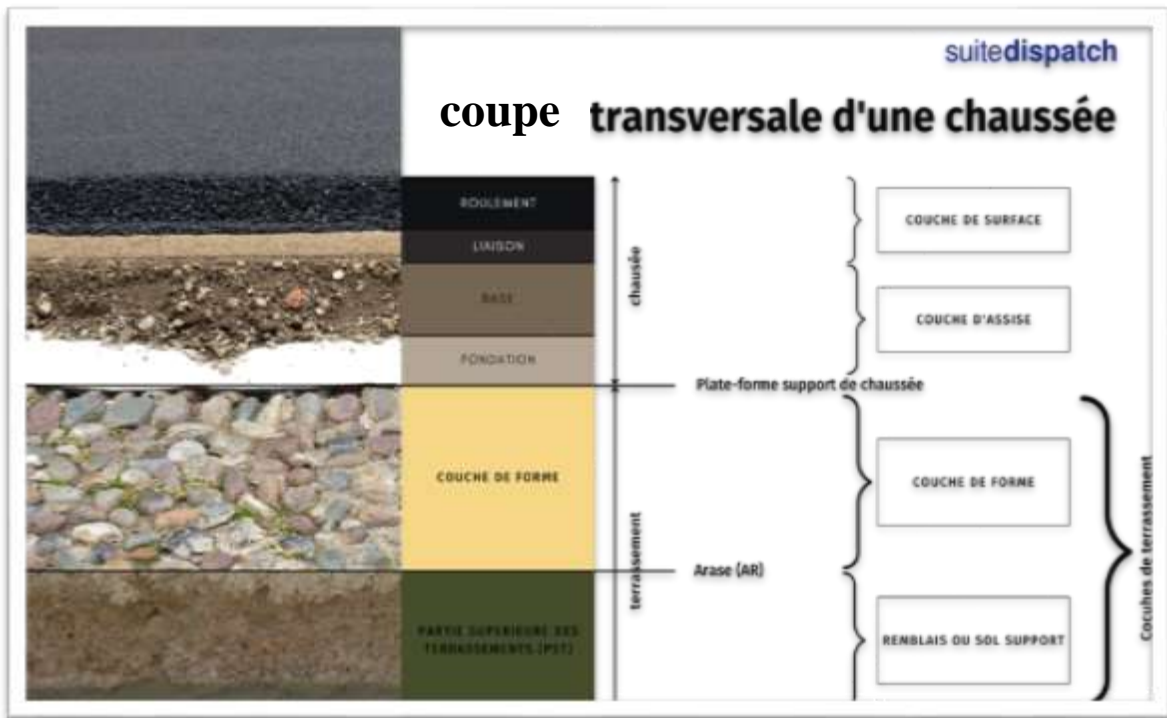


Figure I.1: Coupe type d'une structure de chaussée (L. Ordener .2023)

### I.3.1. Plateforme support de chaussée

Formée de la couche de forme et du sol support elle sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée.

#### 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 élevée savant 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**

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les trois différents types de structures suivants :

- Chaussée souples ;
- Chaussées semi-rigides ;
- Chaussées rigides.

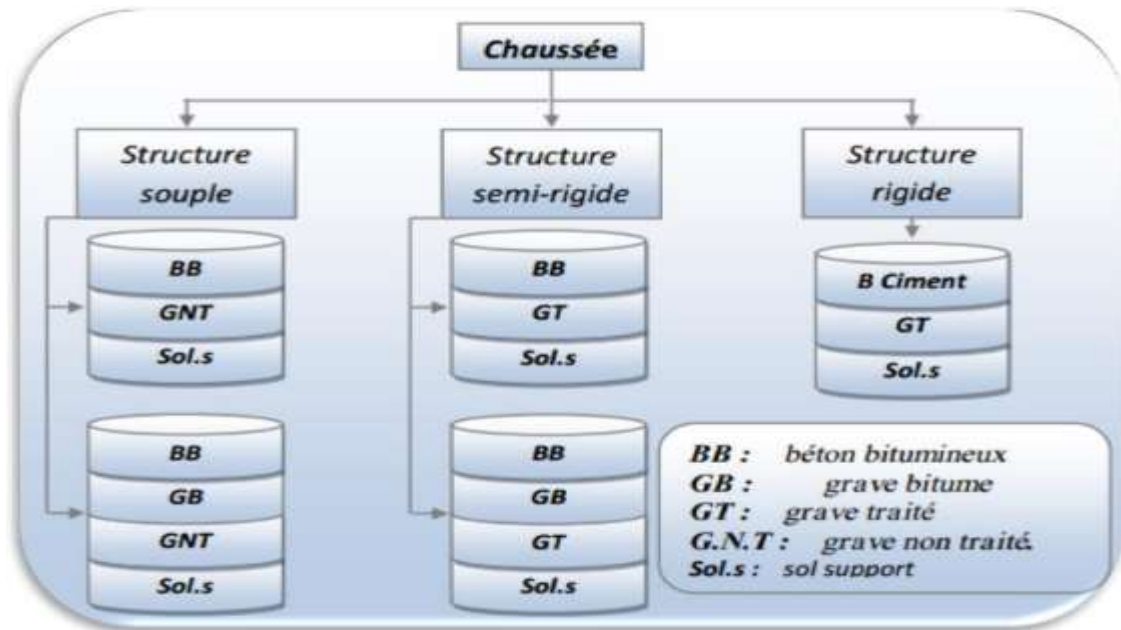


Figure I.2 : Schéma récapitulatif des différents types de chaussées. ( A.Bezzar 2019)

#### II.4.1. Les chaussées souples

D'une épaisseur comprise entre 30 et 60 cm, une chaussée souple est composée d'une couche de surface en matériaux bitumineux. En dessous, se trouve une assise en matériaux granulaires non traités, sur une ou plusieurs couches. Pour ce type de chaussée, la qualité du sol support influence fortement sa tenue dans le temps. Principalement utilisée pour la réalisation des routes secondaires peu empruntées par les poids lourds. (Nguyen, 2008)

#### II.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses

Composées de revêtements bitumineux, les chaussées bitumineuses épaisses disposent d'une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, d'une épaisseur de 15 à 40 cm. Les matériaux qui les composent étant d'une relative rigidité, cela permet de répartir les contraintes verticales et de réduire les efforts au niveau du sol support. (Nguyen, 2008)

#### II.4.3. Les chaussées en assise traitée aux liants hydrauliques

Communément appelée chaussée semi-rigide, la chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques comporte une couche de surface bitumineuse qui repose sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50 cm d'épaisseur). Présentant un fort risque de retraites thermiques, des fissures peuvent apparaître et remonter jusqu'à la couche de surface, entraînant une perte d'étanchéité.

#### I.4.4. Les chaussées à structure inverse

La chaussée à structure inverse se compose de trois couches, ayant toutes un rôle spécifique : la couche de surface, en matériaux bitumineux, assure l'étanchéité et l'uni de l'ensemble ; la couche granulaire absorbe les fissures de la couche de fondation, empêchant ainsi leur remontée ; et enfin, la couche de fondation, en matériaux traités aux liants hydrauliques, permet de répartir les contraintes sur le sol.

#### I.4.5. Les chaussées à structure mixte

Composée de matériaux bitumineux pour la couche de surface et la couche de base, la chaussée à structure mixte repose sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Cette dernière permet de diffuser les efforts et donc de les atténuer dans le sol support.

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

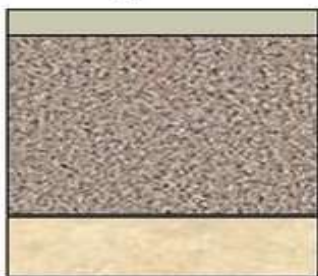
Constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide, cette chaussée rigide comporte les couches suivantes : une couche de roulement, une couche de fondation et une couche de forme. Ce type de chaussée absorbe les efforts et les transmet peu au sol.

Les différentes structures de chaussée sur les figures ci-dessus. (Nguyen, 2008) :



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.3: Chaussées souples assise non traitée



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

Figure I.4: Chaussées bitumineuses épaisses d'assis en grave (GB)



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: Chaussées à structure mixte.



1. Dalle béton armé
2. Béton maigre ou béton bitumineux
3. Plate-forme support.

Figure I.6: Chaussées rigides assise en béton



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

Figure I.7: Chaussées semi-rigide épaisses assise en graves hydrauliques (GH)



1. Matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm).
3. Matériaux granulaires non traités (12cm).
4. Matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20cm).
5. Plate-forme support.

Figure I.8: Chaussées à structure inverse.

### I.5. Rôle et fonctionnement d'une chaussée

La rigidité structurelle de la route est assurée par les couches d'assises (couche de fondation et couche de base). Ces couches permettent également de protéger la plateforme support.

Ensuite vient une couche de liaison qui a pour fonction d'assurer la symbiose entre les couches d'assise et la couche de roulement. Elle permet de spécialiser la couche de roulement au confort et à la sécurité des usagers (bruit, adhérence).

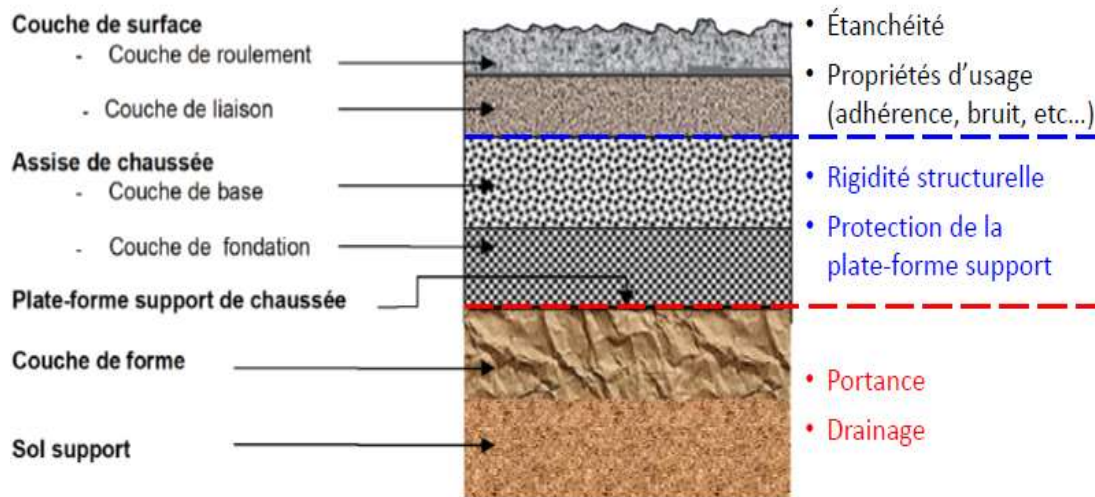


Figure I.9: Rôle et fonctionnement de couches d'une chaussée (Dreal, 2022)

### I.6. 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 jeu pour le dimensionnement d'une chaussée, car le choix des caractéristiques intrinsèques des matériaux est directement lié au poids auxquels sera confrontée la chaussée.

**L'environnement :** Le comportement des structures est influencé directement ou indirectement par les conditions climatiques. La température affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux. 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.7. Fonctionnement et endommagement des chaussées souples

Les infrastructures routières sont sollicitées par le passage des véhicules et surtout par celui des gros porteurs qui sont les principaux responsables de la dégradation des chaussées. Le trafic engendre des efforts verticaux qui se transmettent depuis l'enrobé jusqu'au sol support. L'enrobé des chaussées souples étant mince ( $\leq 5$  cm), ces efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques du sol ou du grave qui se répercutent en déformations permanentes en surface de la chaussée. La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion d'une charge roulante.

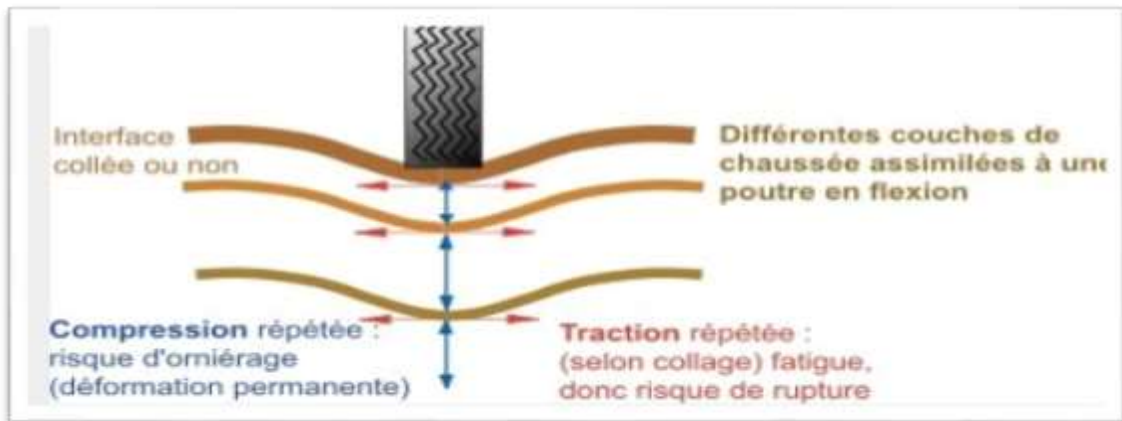


Figure I.10: Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous l'application d'une charge roulante.

### I.8. Dégradation des chaussées

#### I.8.1. Causes de dégradations des chaussées

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

##### a. 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 entraîne 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.

#### **b. 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.

#### **c. 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.

#### **d. 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.8.2. Types de dégradations des chaussées**

#### **I.8.2.1. les déformations**

##### **a. L'orniérage à grand rayon**

C'est une déformation permanente longitudinale qui se crée sous le passage des roues et dont la largeur est supérieure à 80 cm.

##### **Causes probables**

- Vieillissement (accumulation des déformations permanentes).
- Compactage insuffisant dans les couches de granulaire à la construction.
- Capacité structurale insuffisante de la chaussée.
- Mauvais drainage des matériaux granulaires de la chaussée
- Usure (milieu urbain ou secteur avec circulation peu canalisée).



Figure I.11: L'orniérage grand rayon(DAT Québec 2001)

### b. L'orniérage à faible rayon

Dépression longitudinale simple, double et parfois triple, de l'ordre de 250 mm de largeur, située dans les pistes de roues (bandes 2 et 4). Le profil transversal de ces dépressions est souvent similaire à des traces de pneus simples ou jumelés.

#### Causes probables

- Enrobé à stabilité réduite par temps chaud (ex. : bitume trop mou ou surdosage).
- Enrobé trop faible pour bien résister au trafic lourd (ex. : fluage).
- Compactage insuffisant de l'enrobé lors de la mise en place (post compactage).



Figure I.12: L'orniérage à faible rayon (ZEMMIRI. A.A 2008)

### c. L'affaissement de rive

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

- Manque de support latéral et instabilité du remblai.
- Présence de matériaux inadéquats ou mal compactés.
- Zone de déblai argileux ou secteurs marécageux.
- Affouillement ou assèchement du sol support Mauvais état des réseaux souterrains (milieu urbain).



Figure I.13: Affaissement de rive. ( MAIRIE D'EVENOS 2024)

### d. L'affaissement hors rive (flashe)

Dépression localisée de la surface de la chaussée, généralement de forme elliptique en plan

et de longueurs inférieures à 5m.

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



Figure I.14: L'affaissement hors rive (flashe) (LCPC, 1998)

#### e. Soulèvement différentiel

Gonflement localisé de la chaussée en période de gel, aussi bien parallèle que Perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

#### Causes probables

- Infrastructure gélive, phénomène hivernal récurrent.
- Matériaux sensibles à l'humidité, phénomène permanent.
- Nappe phréatique élevée et présence d'eau aux abords de la chaussée.
- Hétérogénéité des matériaux ou transition inadéquate dans la chaussée.
- Conduites souterraines à faible profondeur (milieu urbain).



Figure I.15: soulèvement différentiel (MDCS, Québec, 2002)

### I.8.2.2. Les fissurations

#### a. Fissuration transversale

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

**Causes probables**

- Retrait thermique.
- Vieillesse et fragilisation du bitume.
- Remontée de fissures après des travaux de surfacage.
- Joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé).
- Diminution de la section du revêtement (ex. : vis-à-vis des regards ou des puisards).
- La fissuration longitudinale en bande de roulement



Figure I.16: Fissures transversales. (MDCS, Québec ,2002)

**b. Fissuration longitudinale.**

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

**Causes Probables**

- 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)
- Fatigue du revêtement (trafic lourd).
- Capacité structurale insuffisante de la chaussée.
- Mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée .



Figure I.17 : Fissuration longitudinale. (MDCS, Québec ,2002)

### c. Le faïençage dans les bandes de roulement

Rupture du revêtement sur des superficies plus ou moins étendues, formant un patron de fissuration à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 300 mm ou moins. Couche de roulement. (Lesbats et Pejouan, 2012)

#### Causes Probables

- Épaisseur de revêtement insuffisante.
- Vieillesse de la chaussée (oxydation et fragilisation du bitume dans l'enrobé).
- Capacité portante insuffisante.



Figure I.18: Faïençage.

### I.8.2.3. Les arrachements des enrobages

#### a. Nid de poule

Désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables. Les trous peuvent être comblés par du rapiéçage temporaire.

#### Causes Probables

- 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
- Épaisseur insuffisante du revêtement.
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd.



Figure I.19: Nid de poule

**b. Pelade**

Arrachement par plaques de l'enrobé de la couche de surface.

**Causes Probables**

- Mauvaise adhérence de la couche de surface (ex. : manque de liant d'accrochage, incompatibilité chimique, saleté entre les couches).
- Épaisseur insuffisante de la couche de surface.
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic



Figure I.20 : pelade (Slideshare, 2013)

**c. Plumage**

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

**Causes Probables**

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

Cette dégradation se rencontre souvent dans les zones humides ou ombragées.



Figure I.21 : Plumage généralisé (Slideshare, 2013)

#### **I.8.2.4. Les remontées**

##### **Le ressuage**

Remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes de roues.

##### **Causes Probables**

Surdosage de bitume sur des emplois partiels à l'émulsion ou sur des enduits ;

Enfoncement des granulats dans un support bitumineux trop « mou » ou trop « gras » (enrobé trop riche en mastic) ;

Délai insuffisant entre les réparations localisées à l'émulsion et la réalisation de l'enduit.



Figure.I.22 : Ressuage (Slideshare, 2013)

#### **I.9. Matériaux routiers**

##### **I.9.1. Les granulats**

Ils peuvent provenir soit :

###### **a. 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.

###### **b. 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.9.2.1. 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.9.2. Les graves non traités 0/D (GNT)**

Les graves non traités 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.

### **I.9.3. 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.

#### **a. Les avantages**

Matériaux disponibles dans toutes les carrières et stockables.

#### **b. 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 8kg) d'émulsion par m<sup>2</sup>). L'épaisseur maximale de chaque couche doit être voisine de 2,5D.

**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.23: Grave non traité.



Figure I.24: Matériaux concassés

### I.10. Production des granulats dans le monde

Le granulat est le matériau le plus consommé au monde. Il représente au minimum 80% du volume des ouvrages de génie civil, dont l'importance pour l'aménagement du cadre de vie et le développement économique et culturel n'est à plus à démontrer.



Figure I.25: Consommation de granulats de quelques ouvrages (EL hadj M, 2016)

La demande mondiale des granulats est estimée à près de 24,9 milliards de tonnes en 2008 et près de 28,7 milliards de tonnes en 2013, faisant des granulats la ressource la plus consommée après l'eau (World Construction Agrégats, 2009)



Figure I.26: production mondiale de granulats

Depuis l'année 2000, la production, nationale des agrégats est en hausse constante. Elle a été multipliée par plus de 13, passant de 4,14 millions de m<sup>3</sup> en 2000 à 55,3 millions de m<sup>3</sup> pour l'année 2009. (Bilan des activités minières ,2008)

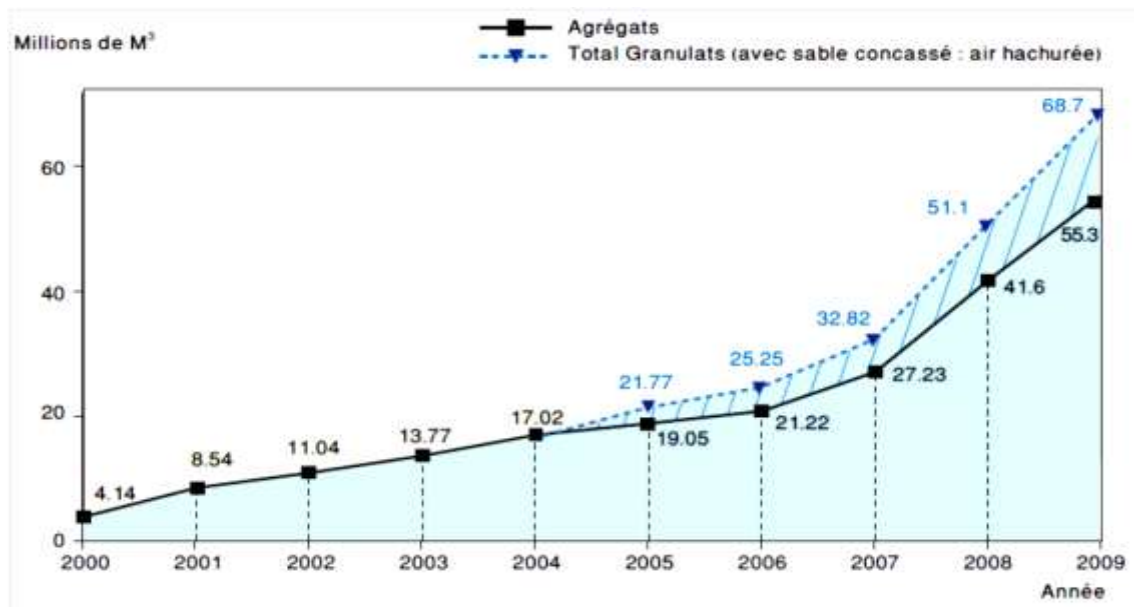


Figure I.27: évolution de la production nationale de granulats

### I.11. Consommation de granulats en Algérie

Le développement dans la construction des bâtiments et des ouvrages de génie civil a provoqué durant les dernières décennies un accroissement considérable dans la consommation de granulats. La demande de sable en Algérie est estimée à 25,1 millions de

tonnes, dont 16 millions de tonnes pour la construction et 9,1 millions de tonnes pour la réalisation des routes .la demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sablières et des ballastières. Une exploitation anarchique des sables de mer a causé ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages.

Par conséquent deux décret ministériels ont été approuvés en 1991 et 1999 par le ministère de l'équipement et du logement ,interdisant l'exploitation abusive de sable de mer et de sable d'alluvions ,il faut noter que la surexploitation de ces sables peut conduire à des répercussions directes sur les activités humaines et les ressources naturelles à savoir l'érosion des berges d'oued rabattements des nappes alluviales ( la nappe de Sebaou ) et l'avancée de mer et contamination des nappes par les eaux salées . (El hadj M.,2016)

### **Conclusion**

Les routes sont souvent construites en utilisant des granulats naturels provenant de carrières. Cependant, la demande en agrégats augmente constamment, au point que les ressources naturelles ne peuvent parfois pas répondre aux besoins nationaux. Ces dernières années, de nouveaux matériaux recyclés tels que les débris de béton, de briques et de verre ont été testés pour pallier, du moins en partie, le manque de granulats. Le prochain chapitre traitera du développement de la filière de recyclage et des divers matériaux recyclés utilisés dans le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP).

## CHAPITRE II

# VALORISATION DES DECHETS

### II.1. Introduction

La progression démographique des villes des pays en voie développement, rend le défi de la gestion de leurs déchets de plus en plus pressante. Or, le soutien offert par les institutions partenaires au développement, ou les solutions promues par le secteur privé tendent à orienter ces villes vers des technologies relativement coûteuses, tant en investissement qu'en fonctionnement.

Le contexte mondial de l'environnement a mis la question environnementale au centre des discussions scientifiques, en mettant particulièrement l'accent sur la pollution et la gestion des déchets. Dans le domaine du génie civil, qui est connu pour sa forte consommation de matériaux naturels, les progrès scientifiques ont permis d'exploiter divers sous-produits industriels dans la fabrication du béton et dans les techniques routières. La valorisation des déchets n'est pas seulement une réponse écologique, mais aussi une activité économiquement viable. Dans ce chapitre, nous aborderons de manière générale le recyclage et la valorisation des déchets, en mettant l'accent sur leur application dans le domaine du génie civil.

### II.2. Généralités sur les déchets

#### II.2.1. Définition d'un déchet

Un déchet est un matériau ou objet dont on se débarrasse car il est inutile ou indésirable. Cela peut être solide, liquide ou gazeux, et inclut les déchets industriels, commerciaux, domestiques, etc.

Selon La loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, un déchet est tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou, plus généralement, tout objet, bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer.

#### II.2.2. Les différents types de déchets

- **Déchets ménagers et commerciaux** : Ce sont les déchets produits dans les foyers et les entreprises. Ils peuvent inclure des déchets alimentaires, des emballages, des papiers, etc.

- **Déchets industriels** : Ce sont les déchets générés par les activités industrielles et artisanales. Ils peuvent être liés à la production, au traitement ou à la fabrication de produits.
- **Déchets médicaux et pharmaceutiques** : Ce sont les déchets provenant des établissements de santé, tels que les hôpitaux et les cliniques. Ils nécessitent un suivi et un traitement spécifiques en raison de leur potentiel de contamination.
- **Déchets dangereux** : Il s'agit de déchets présentant un risque pour la santé humaine ou l'environnement. Ils peuvent être explosifs, inflammables ou toxiques. Leur gestion est réglementée par des annexes spécifiques. (S.P.E., 1997)
- **Déchets inertes** : Ces déchets ne subissent pas de transformation physique, chimique ou biologique importante. Ils proviennent généralement de la construction et de la démolition.
- **Déchets agricoles** : tout déchet organique généré directement par des activités agricoles ou par des activités d'élevages ou de jardinages.
- **Déchets ultimes** : tout résidu résultant de déchets traités ou ceux qui ne sont pas traités selon les conditions techniques et économiques actuelles.
- **Déchets biodégradables** : tout déchet pouvant subir une décomposition biologique naturelle, anaérobie ou aérobie, comme les déchets alimentaires, les déchets de jardins, de papiers et de cartons ainsi que les cadavres d'animaux. (Ait Ali et Ould Amara, 2020)

## Durée de vie de certains déchets

**Tableau 1** : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement.

Produit	Temps de dégradation
Marceau de coton	1 à 5 mois
Papier	2 à 5 mois
Corde	2 à 5 mois
Pelures d'orange ou trognon de pomme	1 mois
Chaussette en laine	1 à 5 ans
Mégot de cigarette	1 à 12 ans
Brique de lait plastique+carton	5 ans
Chewing –gum	5 ans
Chaussures en cuir	25 à 40 ans
Tissu en nylon	30 à 40 ans
Boite de conserve	30 à 40 ans
Canette en aluminium	50 à 100 ans
Sac plastique	50 à 100 ans
Emballage plastique d'un pack de 6 bouteilles	400 ans
Bouteilles en plastique	400 ans
Bouteilles en verre	4000 ans

Source : Direction de l'environnement de la wilaya de Tizi Ouzou, service de l'environnement urbain.

### II.2.3. Les grandes catégories de déchets de chantier

#### a. Les déchets inertes

Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. En fin, ils ne détériorent pas d'autres matières en contact de manière préjudiciable à l'environnement ou à la santé humaine.

#### b. Les déchets non dangereux non inertes

Représentent quant à eux 26 % des déchets dans le secteur du BTP. Sans être des déchets inertes, ils ne sont pour autant pas dangereux : ils ne sont ni corrosifs, ni explosifs. On parle alors de déchets industriels banals (DIB). Parmi les déchets non

dangereux non inertes, on retrouve par exemple le bois, le plastique, les emballages, le plâtre, les métaux et les isolants...

### **c. Les déchets dangereux**

Enfin, la gestion des déchets dangereux constitue 2 % des déchets du bâtiment. Comme leur nom l'indique clairement, ils sont dangereux puisqu'ils contiennent des substances toxiques. On y retrouve notamment les huiles, le goudron, les hydrocarbures et leurs dérivés, les piles, l'amiante, le plomb, les appareils et produits contenant des gaz fluorés, les bouteilles de gaz ou encore les peintures et vernis.

## **II.2.4. Origine de la production des déchets.**

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites.
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet.
- Économiques : Le modèle linéaire qui se résume à « extraire, fabriquer, consommer et jeter », qui consomme des ressources naturelles et de l'énergie pour fabriquer des produits qui deviendront, en fin de compte, des déchets » (Remi Lemoigne, 2014)
- 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. (Pimienta et Remond, 1997)

## **II.2.5. Les déchets de construction et de démolition**

### **❖ Déchets de démolition**

Béton et briques, acier de renforcement béton, panneaux en bois, lambris en bois, céramiques, verre, terre, pierres et cailloux

L'essentiel de ces déchets est minéral et inerte Ils ne présentent donc pas de risque de pollution mais la présence de dépôts sauvages constitue une pollution visuelle



Figure II.1 : Opération de démolition de la ville de Ain El Hammam



Figure II.2 : Démolition de constructions illicites à Bejaïa



Figure II.3 : Tremblement de terre 6 février 2023 (Turquie)

❖ **Déchets de Construction**

- Maçonnerie
- Toutes les sortes de bois non traitées y compris le bois en sciage et les matériaux de dernière couche
- Matériaux de plaque en bois, dalles en bois, Métaux, toit, Isolation, tapis et protection, plâtre, Peinture inutile (résiduel), tuyauterie, canal d'électricité



Figure II.4 : restes des coffrages en bois (Guide Bâtiment Durable, Bruxelles 2017).



Figure II.5 : restes des matériaux de construction et gravats (Equipe C tendance 2022)

### **II.3. Généralités sur le verre**

#### **II.3.1. Définition du verre**

Le dictionnaire indique que le mot verre vient du mot latin vitrum qui désigne une substance minérale transparente et isotrope. (Azzedine Ayadi , 2004)

Au sens commun, le verre est un matériau dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de Silicium (Silice  $\text{SiO}_2$ , le constituant principal du sable). Les verres silicatés transparents sont les plus répandus, par exemple pour les fenêtres, les bouteilles ou les verres à boire. Il existe cependant d'autres types de verre organiques ou métalliques.

#### **II.3.2. La composition du verre**

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de métaux) utilisation (élévation de température). Ces oxydes sont appelés oxydes « formateurs » car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits « modificateurs » qui sont (Ilschner et Janot, 2001)

- Les fondants : qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice = 1730°C).
- Les stabilisants : qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

### II.3.3. Principales matières premières du verre

Le calcaire est désormais une matière première des verriers, certains fours utilisent jusqu'à 95%. En plus du sable les carbonates de calcium et de sodium les sulfates de potassium et de sodium, la dolomie et le charbon. (Www.univerre.fr)

#### II.3.3.1. Les oxydes formateurs

- a) La silice (dioxyde de silicium  $\text{SiO}_2$ )** : C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'on augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible donc, plus le verre est résistant. (Jo Pérez - 2001)
- b) L'anhydride borique (le bore ou borax anhydre  $\text{B}_2\text{O}_3$ )**: Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant, (Falcy, 2002)
- c) L'anhydride phosphorique (le phosphore  $\text{P}_2\text{O}_5$ )** : Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au moyen âge est les cendres de bois. (Baillon et Dorlot, 2000).

#### II.3.3.2 Les oxydes modificateurs

- a) Les fondants (oxydes alcalins)** : La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge. Un même verre peut associer plusieurs fondants : soude et chaux (verre sodo-

calcique), soude et plomb (cristal). (Barton et Guillemet, 2005)

- b) L'oxyde de sodium (la soude  $\text{Na}_2\text{O}$ ) :** Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage. (Canonne, 2010)
- c) L'oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ) :** Il est utilisé sous forme du salpêtre (nitrate de potassium  $\text{KNO}_3$ ). Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et le rend doux à la taille, mais il diminue sa résistance chimique. Il avantage le soufflage du verre car il augmente le temps de travail lors du façonnage. (Bray, 2001)
- d) L'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ) :** Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium + magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques. (Tournié, 2009)

**II.3.3.3 Les stabilisants** L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) provoque la rupture d'une liaison Si - O et l'apparition d'un oxygène "non pontant". Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'eau.

- a) L'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) :** Il se trouve sous forme de chaux (qui est le stabilisant le plus employé) ou de dolomie (lorsque le verre doit contenir de la magnésie). Il augmente la résistance chimique du verre, son éclat et diminue sa solubilité, mais en excès il provoque une dévitrification. Il était utilisé au moyen âge pour les verres sodiques. (Haussonne, 2005)
- b) L'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) :** Il augmente l'éclat et l'élasticité.
- c) L'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) :** c'est un stabilisant et un colorant souvent contenu dans les roches naturelles
- d) L'oxyde de plomb ( $\text{PbO}$ ) :** Entre dans la composition du cristal. Il abaisse également le point de fusion en stabilisant la composition. Il rend le verre plus éclatant tout en lui conférant une légère teinte jaunâtre, il est plus agréable à couper et à travailler. (Newton et Logan, 2007)

## II.4. Le recyclage

**II.4.1. Les types de recyclage :** Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- ❖ **Le recyclage chimique :** est un recyclage qui utilise une réaction chimique pour traiter les déchets.
- ❖ **Le recyclage mécanique :** est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple le broyage ou la séparation par le magnétisme.
- ❖ **Le recyclage organique :** consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

### II.4.2. Recyclage de déchets dans le domaine du génie civil

Par matériaux de démolition, on entend des produits très divers qui ne sont pas tous recyclables pour obtenir des granulats utilisables en techniques routières et donc nécessitent une sélection.

Outre le recyclage, la réutilisation directe du béton de démolition est une autre option à considérer. Plutôt que de le traiter en granulats recyclés, le béton peut être utilisé tel quel pour diverses applications sur le chantier ou dans d'autres projets de construction.

La réutilisation du béton de démolition peut prendre différentes formes. Par exemple, les morceaux de béton peuvent être utilisés comme remblai pour les routes, les parkings ou les fondations de nouveaux bâtiments. Ils peuvent également servir de matériau de remplissage dans les structures existantes ou être intégrés dans de nouveaux aménagements paysagers.

Cette approche présente plusieurs avantages, notamment la réduction des coûts de transport et de traitement associés au recyclage du béton. En réutilisant les débris de béton sur place, les entreprises peuvent économiser du temps et des ressources tout en minimisant l'impact environnemental de leurs projets. (Koncrete SAS, Paris)

L'engagement des acteurs de la filière se traduit par l'évolution du contexte normatif avec la révision des normes suivantes :

- Normes granulat NF EN 12620 de juin 2008 et NF P18-545 de septembre 2011 qui spécifient les caractéristiques et les propriétés des granulats recyclés ;
- Norme béton NF EN 206-1/CN de décembre 2012 qui autorise l'utilisation de granulats recyclés issus de la déconstruction pour la fabrication de bétons.

Mais pour développer encore plus cette démarche, les travaux de recherche autour d'axes techniques, environnementaux, réglementaires et économiques doivent se poursuivre. C'est dans ce contexte que notre recherche prend son chemin.

Ces matériaux de démolition peuvent être classés en quatre catégories selon leurs natures :

- **Les matériaux de déconstruction de bâtiments et ouvrages d'art** : constitués de bétons armés ou non, sans enduit, ni plâtre, ni amiante, ou autres déchets industriels spéciaux.
- **Les matériaux de déconstruction de chaussées** : constitués de matériaux traités ou non aux liants hydrauliques de matériaux traités aux liants hydrocarbonés, d'anciens blocages, de bordures en béton ou pierre naturelle, etc.
- **Des mélanges de matériaux** composites (ossatures en béton, maçonnerie, ...) avec de faibles teneurs en plâtres, bois, plastique, ....
- **Des mélanges hétérogènes** avec des teneurs en matières indésirables (plâtres, bois, plastique, ...) supérieures à 10 %.

#### **II.4.2.1. Processus du recyclage des déchets du bâtiment**

Les déchets inertes (pierres, matériaux de terrassement et de démolition, briques, verre...) représentent environ 65 % des déchets du bâtiment. Triés, puis recyclés, ils peuvent être réutilisés en remblai.

Les déchets non dangereux (bois, cartons, plastiques, métaux, plâtre...) sont envoyés sur différentes filières de recyclage pour être valorisés.

Les déchets dangereux (bois traités, métaux lourds, peintures, solvants...) sont, eux, traités dans des filières spécialisées.

**II.4.2.2. Elaboration** Les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont les suivantes :

- Sélection et stockage des produits bruts. Le stockage peut éventuellement être sélectif si l'installation traite plusieurs des familles décrites précédemment.
- Préparation avant traitement qui consiste à réduire les plus gros éléments à l'aide d'un brise roche hydraulique (B.R.H.), à couper les éléments longs à l'aide d'une cisaille, à retirer les impuretés les plus grosses.

- Concassage primaire à l'aide d'un concasseur à percussion ou à mâchoires, suivi d'un déferrailage électromagnétique.
- Selon les installations, le concassage peut être précédé d'un criblage destiné, à éliminer les matériaux à faibles caractéristiques et suivi d'un tri manuel destiné, à retirer les impuretés (bois, papiers, plastiques) résiduelles.
- Eventuellement concassage secondaire portant sur la fraction supérieure issue du concassage primaire (GTUMR, 2003)



Figure II.6 : préparation à la cisaille et déferrailage magnétiques

### **II.4.3. Les Avantages des matériaux de déconstruction recyclés**

#### **II.4.3.1. Réduction de l'effet environnementale et Protection des sites de décharges**

Le recyclage des déchets de construction peut réduire le besoin d'extraire des matières premières et de produire de nouveaux matériaux.

Le recyclage des déchets de construction et de démolition peut également réduire le besoin de nouveaux terrains de décharges. Puisque la majorité des déchets de construction seront recyclés et qu'il n'y a qu'une petite quantité de déchets provenant de l'industrie de la construction, le recyclage bénéficie les sites de décharge.

#### **II.4.3.2. Economie et épargne des matériaux**

Le recyclage des déchets de construction peut réduire les coûts du projet global de construction. Le coût du matériel dans l'industrie de la construction peut être

considérablement réduit par le recyclage, en utilisant des matériaux recyclés au lieu des nouveaux matériaux.

Le recyclage permet de protéger les matériaux de construction en diminuant la nécessité des nouvelles ressources utilisées pour produire de nouveaux matériaux. La quantité d'approvisionnement des nouveaux matériaux de construction peut être réduite car la plupart des déchets de construction sont recyclables et réutilisables

#### **II.4.3.3. Economie de l'énergie**

Le recyclage conserve 95% de l'énergie utilisé pour fabriquer des produits en aluminium et en cuivre. Généralement, le coût de production de l'aluminium recyclé serait moins cher par rapport à l'aluminium primaire car lors de la production on utilise moins d'énergie.

#### **II.4.3.4. Créations de l'emploi**

Le recyclage crée des opportunités d'emplois et des activités économiques dans le secteur de la construction. L'industrie de construction crée plus d'opportunité de recrutement car elle contient de nombreux traitement de recyclage à suivre par la main-d'œuvre.

#### **II.4.4. Le recyclage du verre**

Le verre est durable, inerte, hygiénique, malléable, esthétique et naturel. Pour cette raison il demeure incontournable comme matériau d'emballage pour les boissons et les aliments. Parmi les qualités du verre, il en est une d'importance sa recyclabilité. Le verre évolue en effet dans un circuit de matières fermé à 100%. Et, grâce au recyclage, on réduit de plus de 20% les besoins en énergie pour la fabrication de nouveaux emballages.

Le verre se compose de trois matières premières (le sable, le carbonate de sodium et le calcaire) qui sont fondues ensemble à très haute température, puis moulées en bouteilles, pots et bocaux en verre. Lorsque le verre recyclé est collecté, il est broyé en petits morceaux, appelés calcin. Le calcin est nettoyé de tous déchets autres que du verre, rebroyé, mélangé à une petite quantité de diverses matières premières, chauffé et moulé en nouveaux modèles de bouteilles, pots et bocaux.

L'évaluation des coûts énergétiques du recyclage du verre et du plastique par rapport à leur production respective est complexe et dépend de nombreux facteurs, notamment les technologies utilisées, l'efficacité des processus, la localisation géographique et les sources d'énergie utilisées. (<https://www.franceenvironnement.com>).

#### II.4.4.1. Origines du verre recyclé

On distingue deux sources de verre usagé destiné, après traitement, au recyclage dans les fours de verrerie :

- a) **Le verre ménager** : issu des collectes sélectives (container verre) et des collectes multimatériaux (poubelle verte) cette source représente 85 % du verre recyclé et se caractérise par une composition chimique assez homogène et stable.



Figure II.7 : collecte de bouteilles dans la nature.

- b) **Le verre industriel** : issu d'activités industrielles utilisant du verre plat ou du verre creux et produisant ponctuellement des rebuts importants, comme les brasseurs ou les entreprises de découpe et de façonnage de verre plat et de verres spéciaux ; ce gisement représente 15 % du verre recyclé, reconnu pour être de bonne qualité car peu contaminé, mais de composition chimique variable.



Figure II.8 : débris de verre industriel (Google image)

Seuls les pots, les bocaux, les bouteilles et les flacons en verre transparent, vert et ambre peuvent être recyclés. Le cristal ou la vitrocéramique, y compris les bols, les plats et le verre résistant à la chaleur ne sont pas recyclables car leur température de fusion est plus élevée. C'est pourquoi, mélanger du cristal ou de la vitrocéramique à du verre d'emballage peut conduire à l'arrêt complet de la chaîne de production. (Pajean, 2007)

#### **II.4.4.2. Domaines d'utilisations, (quelques exemples)**

Le verre a des vertus qui lui permettent d'être utilisé dans des applications autres que celles de la fabrication du même produit dont il est issu. En effet, il peut également entrer dans la composition de matériaux de construction et d'isolation, dans les peintures, ainsi que dans de nombreux autres domaines (CNR, 2007) Actuellement plus de cinquante procédés de fabrication permettent le recyclage ou la valorisation du verre. Quelques exemples de valorisation du verre sont expliqués ci-après.

##### **a) Utilisation en matériaux de construction**

Le calcin peut être incorporé dans la fabrication du ciment de verre. Pour sa fabrication il suffit de mélanger 80 % de verre broyé très finement à 20 % d'additifs. Le calcin utilisé peut être issu du rejet de tri optique des centres de traitement du calcin d'emballages, etc. La présence d'impuretés (infusibles, papier, plastique, métaux, etc.) n'est pas gênante tant que la proportion dans le verre n'excède pas 50 %. Actuellement, ce ciment est utilisé principalement dans la stabilisation des sols. Une application concrète de ce produit, et l'une des plus prestigieuses, est l'emploi de ce ciment pour la rénovation d'allées du château de Versailles. Mais d'autres utilisations peuvent lui être trouvées comme sur des pistes cyclables, des bouledromes, des pistes équestres, des terrains de sport, des allées de jardin, etc. De plus, de nombreux résidus verriers (fines de verre, refus de centre de tri, calcin ménager, etc.) Peuvent être utilisés comme additifs en remblais routiers. Ils peuvent servir à la stabilisation des sols et améliorent les propriétés des sous couches routières. Ils peuvent également être intégrés à des matrices béton destinées à la production de blocs de construction. Ces blocs de bétons présentent de meilleures qualités d'isolation phonique et thermique comparé à un même bloc dépourvu de calcin.

##### **b) Utilisation en isolation**

Peut être utilisé lors de la fabrication de la mousse de verre. C'est un verre expansé qui contient jusqu'à 44 % en masse de calcin et le reste de matières premières naturelles, principalement de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), de l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et de la chaux ( $\text{CaO}$ ).

L'utilité principale de cette mousse est l'isolation thermique. Ce procédé a été découvert par la Société Anonyme des Manufactures des Glaces et Produits Chimiques de Saint-Gobain en 1934 et breveté le 17 juin 1935. Les plaques et les granulats, obtenus à partir de la mousse de verre, sont un très bon isolant à la fois thermique et phonique.

#### c) Utilisation dans les céramiques

Le calcin peut être intégré dans la fabrication de l'ensemble des produits en céramiques. Il s'agit de tuiles, de dalles, de carrelage, de lavabos, de baignoires, de briques, etc. Ces produits et le calcin ont les mêmes constituants de base que sont la silice ( $\text{SiO}_2$ ), l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) et la chaux ( $\text{CaO}$ ). L'incorporation de calcin dans leur fabrication a de nombreux avantages. En effet, il permet de faire des économies de matières premières et d'énergie (la température de fusion du verre est inférieure à celle des céramiques).

#### d) Utilisation dans les peintures

Le calcin peut être incorporé dans la composition de certaines peintures. Ces peintures sont de deux types :

- **Les peintures de signalisation routière** : le calcin y est incorporé sous la forme de microbilles qui confèrent à la peinture un fort pouvoir réfléchissant. Ces peintures sont principalement utilisées sur les routes, les panneaux routiers et les vêtements de travail de nuit.
- **Les peintures acryliques modifiées** : le calcin y est introduit pour renforcer la structure de la peinture et lui donner de la souplesse et de l'élasticité. Ces peintures sont destinées à combler les fissures, prévenir les infiltrations d'eau, couvrir et lisser les surfaces comme le béton, etc.

#### e) Utilisation en filtration

Le calcin peut également être utilisé dans des systèmes de filtration de liquides, notamment celui de l'eau. En effet, son utilisation en remplacement du sable lui confère certains avantages :

- Une non adhésion des bactéries sur la surface lisse du calcin donc une diminution du nombre de rinçages
- Une masse volumique inférieure à celle du sable donc gain d'espace du système de filtration.
- Un effet catalytique de la filtration dû à la présence de métaux, en petite quantité, dans

la composition du verre

Ces filtres sont principalement utilisés pour l'eau des piscines, des aquariums, des effluents industriels, etc.

#### **II.4.5. Avantage du recyclage du verre**

Initié par les verriers, portés par les collectivités, impliquant tous les utilisateurs, professionnels comme particuliers, le recyclage du verre permet de répondre aux trois grands enjeux environnementaux.

- **Économiser les ressources naturelles**

Recyclable à 100 %, le verre peut être refondu à l'infini pour fabriquer du nouveau verre, sans aucune perte de qualité, de transparence ou de matière. Collecter le verre et l'utiliser comme matière première recyclée permet donc de réduire le prélèvement de ressources naturelles. Pour exemple, 1 kg de calcin (verre nettoyé et broyé) utilisé en remplacement de la matière première permet d'économiser 1,2 kg de matériaux vierges (silice, calcaire et carbonate de soude).

- **Protéger l'atmosphère**

Le calcin issu des collectes locales a suffi à répondre aux besoins de production de verre. L'utilisation de la seule matière première recyclée a ainsi permis : - d'éviter les importations de verre de l'étranger. - d'optimiser la logistique, en minimisant l'empreinte carbone liée au transport. - et de limiter le rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En 2014, les verriers français estiment déjà un déficit de 50 000 tonnes sur le million de tonnes nécessaire : d'où l'importance de se mobiliser davantage pour améliorer le taux de collecte et de recyclage.

- **Réduire les dépenses énergétiques**

La production de verre à partir de calcins, plutôt que de la matière première naturelle, nécessite moins d'énergie. Pour exemple, en recyclant 1 tonne de verre, l'économie réalisée équivaut à la consommation en électricité d'un français pendant 3 mois.

#### **II.4.6. Les Inconvénients du recyclage**

##### **II.4.6.1. Coûts d'investissement acompte élevés**

Le recyclage n'est pas toujours rentable. La mise en place d'une nouvelle installation de recyclage des déchets nécessite un grand capital.

**II.4.6.2. Les sites de recyclage sont souvent non-hygiénique, insécurité et disgracieuse**

Les endroits où tous les types de déchets sont excavés constituent une bonne toile de fond pour la formation d'éruption et la propagation de maladies infectieuses. Les produits chimiques nocifs provenant de ces déchets peuvent causer également de danger.

**II.4.6.3. Les produits provenant de déchets recyclés ne sont pas souvent durables**

Les produits fabriqués à partir de déchets recyclés ne sont pas toujours à bonne qualité. Ces produits sont presque souvent fabriqués à partir des matériaux réduits, qui sont extrêmement utilisés et fragiles, récupérés par des montagnes de déchets. Cela rend les déchets recyclés moins durables et moins coûteux.

**II.4.6.4. Le recyclage n'est pas souvent à bon marché**

Parfois, le recyclage des déchets n'est pas si moins cher comme la plupart des gens y pensent. Défis, il est nécessaire de mettre en place une autre unité de recyclage des déchets à traiter.

**II.4.6.5. Le recyclage n'est pas répandu à grande échelle**

Bien que le recyclage joue un rôle important dans la réduction du taux de pollution, le procédé n'a pas été largement adopté et amélioré. Malheureusement, le recyclage n'est considéré encore qu'une petite partie pour atteindre le succès à long terme. (Van overbeke)



Figure II.9 : Les filières de recyclage des déchets en action (CCTPE. Guiton 2023)



Figure II.10 : Concassage mobile, valorisation déchets inertes.

### **II.5. Conclusion**

Le bon traitement et la bonne gestion des déchets permettent de limiter les impacts nuisibles sur le plan environnemental et sanitaire et d'offrir de nouvelles ressources renouvelables et durables qui contribuent à l'innovation dans le domaine des matériaux de construction, notamment par leur valorisation en tant que granulats, à l'état brute (à moindre coût). Dans cette étude nous nous sommes penché sur deux matériaux disponibles en abondance dans la nature qui causent des dégâts énormes à savoir : le verre de bouteilles et les débris de béton en faisant de ces sources de déchets nuisibles, des sources non négligeables de granulats pour les travaux routiers. Cependant, vu les différentes sollicitations auxquelles il sera soumis en pratique, la connaissance d'autres caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux est indispensable pour confirmer son utilisation dans le domaine routier. Ce qui sera confirmé lors des chapitres suivants.



## CHAPITRE III

### IDENTIFICATION DES MATERIAUX

#### III.1. Introduction

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

- La teneur en eau ( $w$ ).
- Masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ).
- Masse volumique humide ( $\rho_h$ ).
- Masse volumique sèche ( $\rho_d$ ).
- L'indice des vides ( $e$ ).
- La porosité ( $n$ ).
- Le degré de saturation ( $S_r$ ).

#### III.2. Présentation et identification des matériaux

##### III.2.1. Les débris de béton

Les déchets de béton générés par la fabrication ont plusieurs origines : déchets de béton frais, déchets de béton durci (débris de démolition), rebuts de fabrication et retours de chantiers. Ils peuvent être réintégrés in situ (usine de préfabrication ou unité de production de béton prêt à l'emploi) pour la fabrication de nouveaux produits, ou recyclés une fois durcis, sans nécessité de tri complémentaire, dans des installations de concassage. (<https://www.infociments.fr/>)

La gestion des débris de béton de démolition constitue un enjeu crucial pour les entreprises du BTP, qui doivent faire face à des défis logistiques et financiers liés à leur accumulation.

Le recyclage du béton de démolition émerge comme une solution écologique et économique de plus en plus adoptée dans l'industrie, offrant la possibilité de réutiliser les granulats extraits dans de nouveaux projets de construction.

##### III.3. Présentation et identification des débris de béton étudiés

Les débris de béton étudiés dans ce travail sont récupérés dans la wilaya de Tizi-Ouzou. Ils sont ensuite acheminés au laboratoires de mécanique des sols et de béton du département de génie civil de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour subir les opérations de tri et

de concassage par des moyens mécaniques de façon à obtenir la granulométrie désirée.



Figure III.1 : décharge des débris de béton



Figure III.2 : déchets du laboratoire de béton de la faculté.

### III.3.1. Concassage et tamisage du béton

Avant concassage, les blocs de béton sont d'abord triés afin d'éliminer les éventuelles impuretés (plastique, fils, papier matière organique...) ces blocs ont été réduits manuellement à l'aide d'un marteau en petits fragments afin de passer plus aisément dans le concasseur qui les réduits ensuite à des éléments de plus petites tailles.

Afin d'assurer l'homogénéité du matériau durant tous les essais une grande quantité de béton a été concassée.



Figure III.3 : Concassage du béton

L'opération du tamisage permet de séparer les grains selon leurs dimensions afin de reconstituer des échantillons conformes à la classe 0/20 mm, délimitée par un fuseau bien précis relatif aux corps de chaussée prescrit par la norme NFEN13-285. Cette partie a été réalisée avec beaucoup d'attention afin d'obtenir des échantillons plus ou moins identiques permettant d'assurer la répétabilité des essais sans l'influence des inégalités granulométriques.



Figure III.4 : tamisage du béton NFEN13-285(2010).

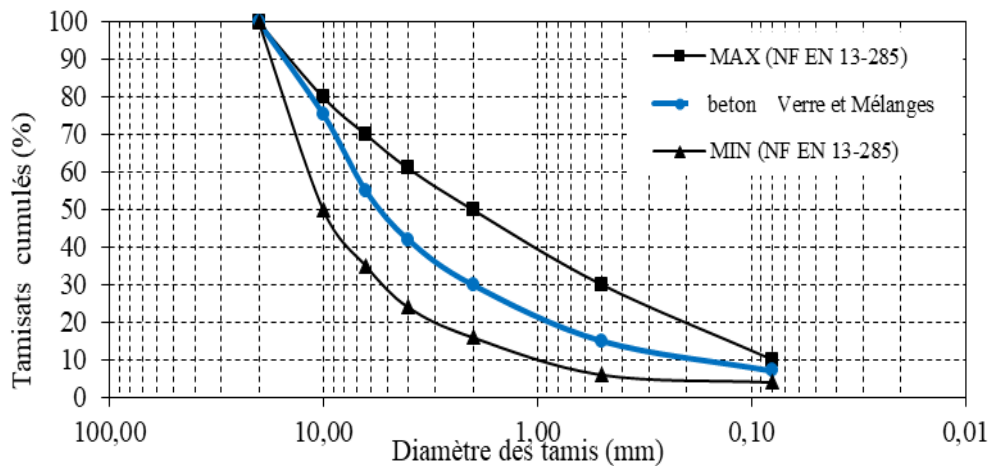


Figure III.5: Courbe granulométrique des matériaux et des mélanges étudiés selon la norme NFEN13-285 (2010).

### III.3.2. Teneur en eau (w)

La teneur en eau est le quotient de la masse de l'eau interstitielle (mw) par la masse des grains solides ; est déterminée selon la norme NFP94-050 (méthode par étuvage). L'essai de détermination de la teneur en eau, consiste à peser un échantillon humide puis le passer à l'étuve à 75°C pendant 24 heures et le peser une autre fois à sec. Donc la teneur en eau pondérale est calculée comme suit :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

$$W : \text{teneur en eau} \quad \frac{500-490}{490} * 100 = 2,04$$

$M_h$  : masse humide

$M_s$  : masse sèche

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

Matériau	W (%)
Débris de béton	2.04

Les résultats montrent que, la teneur en eau naturelle des débris utilisés dans ce travail est faible. Ceci est prévisible, du fait que le matériau étudié est granulaire non argileux, très perméable, et donc il emmagasine une faible quantité d'eau même à l'état humide.

### III.3.3. Les masses volumiques

#### a. La masse volumique sèche ( $\rho_d$ ) (Norme NF P94-064)

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



Figure III.6 : Mode opératoire. (Pesée hydrostatique)

La masse volumique déterminée 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

$\rho_p$ : Masse volumique de la paraffine = 0,88g/cm<sup>3</sup> ;

$\rho_w$ : Masse volumique de l'eau = 1g/cm<sup>3</sup>.

Le tableau ci-dessous présente les résultats des essais réalisés

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

Paramètres	1 <sup>ère</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai
Masse de la roche ( $M_r$ )	64,9	85,9	75,3
Masse de la roche paraffinée à l'air libre ( $M_{rp}$ )	70,2	93,2	82,1
Masse de la roche paraffinée dans l'eau ( $M'_{rp}$ )	37,4	48,8	42,4
Masse volumique sèche $\rho_d$	2,42	2,37	2,35
Moyenne	<b>2,38g/cm<sup>3</sup></b>		

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.

$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Appréciation
< 1.6	Faible
1.6 – 1.8	moyenne
> 1.8	Dense

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

#### b. La masse volumique humide $\rho_h$ (NF P94-053)

La masse volumique humide est calculée selon la formule suivante :

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

Avec :

W : Teneur en eau du matériau ;

$\rho_d$  : Masse volumique sèche.

L'application numérique donne :  $\rho_h = 2.38 \times (1+0.02)$

$$\rho_h = 2.42\text{g/cm}^3$$

#### c. La masse volumique des particules solide $\rho_s$ (NFP94-054)

La détermination de la masse volumique des particules solides est effectuée selon la norme NFP94-054. Elle consiste à mesurer le volume des particules solides par un pycnomètre en

utilisant l'eau distillée ou déminéralisée.  $\rho_s$  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.7: Exécution de l'essai avec pycnomètre.

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

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

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau III.4.

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

Masses	Valeurs en (g)
M <sub>1</sub>	207,0
M <sub>2</sub>	257
M <sub>3</sub>	803,8
M <sub>4</sub>	772,2
$\rho_s$	2,72 g/cm <sup>3</sup>

Avec :

M<sub>1</sub> : Masse du pycnomètre vide +bouchon ;

M<sub>2</sub> : Masse du pycnomètre+ particule solide +bouchon ;

M<sub>3</sub> : Masse du pycnomètre + particule solide + eau + bouchon ;

M<sub>4</sub> : Masse du pycnomètre +eau +bouchon ;

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau égale à 1(g/cm<sup>3</sup>).

### III.3.4. 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 :

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

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés ( $\rho_s$  et  $\rho_d$ ) selon la formule :

$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad e = \frac{2,72}{2.38} - 1 = 0.14 \quad e = 0.14$$

### III.3.5. Degré de saturation (Sr)

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

$$Sr = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \left(\frac{w}{e}\right) = \left(\frac{2,72}{1.00}\right) \left(\frac{2.04}{0.14}\right) = 39,63 \quad Sr = 39.63\%$$

Avec :

w : Teneur en eau ;

e : indice des vides ;

$\rho_s$  : Masse volumique sèche ;

$\rho_w$  : Masse volumique de l'eau.

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

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

D'après les valeurs du tableau III.5, le béton étudié est dans un état humide.

### III.3.6. Porosité

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

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

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

$$n = \frac{e}{(e + 1)} = 12.28\% \quad n = 0.12$$

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

Caractéristique déterminée	Résultat moyen
Teneur en eau naturelle : w(%)	2.03
La masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.38
La masse volumique humide $\rho_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.43
La masse volumique des particules solide $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.72
Indice des vides	0.14
Degré de saturation $S_r$ (%)	39,63
Porosité en (%)	12.28

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

### III.4. Débris de verre de bouteilles

#### III.4.1. Collecte et concassage

Le verre utilisé dans cette étude est récupéré sous forme de bouteilles jetées anarchiquement dans la nature, notamment sur les bords des routes, ce qui en a fait une source importante de pollution de l'environnement et potentiellement une source des feux de forêts déclenchés fréquemment en été.



Figure III.8 : verre déposé anarchiquement dans la nature.

Les bouteilles collectées sont acheminées vers le laboratoire de mécanique des sols de la faculté. Elles sont ensuite triées et lavées pour éliminer toutes les impuretés (matière organique, papier, plastique ...) susceptibles de nuire à la fiabilité des essais. Après séchage à l'air libre, elles sont concassées selon la granulométrie désirée.



Figure III.9 : tri et préparation du verre.

#### III.4.2. Tamisage du verre

L'étude réalisée est scindée en deux parties différentes, la première partie, consiste en un ajout de verre (0/2 mm) à différentes proportions pour le béton tout en respectant la courbe granulométrique 0/20.

La deuxième partie consiste en un remplacement des fractions sableuses du béton par les mêmes fractions en verre, tout en respectant la courbe granulométrique 0/20. Dans ce cas, le verre est tamisé de manière à avoir un sable fin 0/0.5 mm, un sable moyen 0.5/2mm et un sable grossier 2/5 mm.



Figure III.10 : sable de verre de fraction 0/2 pour la première partie.



Figure III.11 : sable de verre grossier, moyen, fin pour la deuxième partie.

### III.4.3. Quelques propriétés du verre

Dans le cas du matériau verre, d'autres essais peuvent donner plus de détails sur sa composition, notamment chimique. Sauf que ce type de résultats nécessite un matériel plus sophistiqué non disponible au niveau de notre laboratoire. Néanmoins, les principales propriétés du verre concassé relevées dans la littérature sont résumées dans ce qui suit (Recyc-Québec, 2006) :

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

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

stocker les débris de verre et de les revendre aux industries pharmaceutiques et vitrières de la région. Les essais en laboratoire ont consisté à déterminer les différentes propriétés physiques et mécaniques de ces résidus. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.7 : propriétés physiques et mécaniques verre essais de Wartman

Essais	Essai standard	Echantillon N° 1		Echantillon N° 2	
		Sans modification	Après compaction	Sans modification	Après compaction
Teneur en eau (%)	ASTM D2216-98	2.36	-	4.22	-
Teneur en saleté (%)	Gravimètre	0.34	-	1.82	-
Densité (D)	ASTM C127-88	2.48	-	2.48	-
Densité minimum (kg / m <sup>3</sup> )	ASTM D4254-00	1150	-	1270	-
Densité maximum (kg / m <sup>3</sup> )	ASTM D4253-00	1790	-	1740	-
Rapport des grains D50(mm)	-	2.24	1.6	3	2.5
Coefficient d'uniformité Cu	-	6.2	6.5	7.2	7.8
% sable (0,075-4,75mm)	-	91.3	87	70	76
Particules fines (<0,075mm)(%)	-	3.2	6.2	1.2	2.2
Classification USCS	ASTM D2487-98	SW	SW	SW	SW-SM
Conductivité hydraulique (cm/s)	ASTM D2434-68	1.61x10 <sup>-4</sup>	-	6.45x10 <sup>-4</sup>	-
Proctor modifié $\gamma_d$ max (KN/m <sup>3</sup> )	ASTM D1557-00	18.3	-	17.5	-
Wopt (%)		9.7	-	11.2	-
Proctor standard $\gamma_d$ max (KN/m <sup>3</sup> )	ASTM D698-00	16.8	-	16.6	-
Wopt (%)		12.8	-	13.6	-

Après avoir compilé les analyses en laboratoire sur les débris de verre, les auteurs, (Wartman et al., 2004) concluent que ces débris de verre peuvent être utilisés dans les ouvrages de génie civil, de construction et de géotechnique, y compris les tranchées, les remblais, les murs de soutènement, les aires de stationnement ainsi que dans la construction routière.

#### III.4.4. Composition chimique

L'analyse par diffraction des rayons X, réalisée Doumi et Khazaz (2018) sur deux types de verre (bouteilles et pare-brise) a donné les résultats présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.8 : Composition chimique de verre (bouteilles).

Eléments	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P.F
Pourcentages (%)	10.86	72.35	2.39	0.58	0.78	0.04	0.35	11.35	0.70

### III.5. Préparation des échantillons

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

#### Première partie

- Echantillon 1 : débris de béton seul ;
- Echantillon 2 : débris de béton + 10 % de verre (0/2 mm) ;
- Echantillon 3 : débris de béton + 15 % de verre (0/2 mm) ;
- Echantillon 4 : débris de béton + 20 % de verre (0/2 mm) ;
- Echantillon 5 : débris de béton + 40 % de verre (0/2 mm).

#### Deuxième partie

- Echantillon 1 : débris de béton seul ;
- Echantillon 2 : débris de béton avec remplacement de la fraction sable fin par du verre (0/0,5mm) ;
- Echantillon 3 : débris de béton avec remplacement de la fraction sable moyen par du verre (0,5/2 mm) ;
- Echantillon 4 : débris de béton avec remplacement de la fraction sable grossier par du verre (2/5mm).

Les mélanges sont formés de telle sorte à garder la même classe granulaire (0/20) correspondant à la courbe granulométrique présentée sur la (figure III.3)

### III.6. 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 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**

### **IV.1. Introduction**

Lors de la construction de routes, de voies ferrées, de remblais et de barrages, il est crucial d'assurer un compactage mécanique adéquat afin d'atteindre des densités optimales. Cette procédure renforce la résistance au cisaillement et diminue le risque de tassement sous des charges répétées. Le compactage est directement lié à la capacité portante des sols, des remblais, des couches de forme, des fondations et des sous-fondations des routes et des aéroports. Il est évalué par le biais de l'essai CBR, qui mesure la résistance d'un sol à l'effort tranchant et son gonflement lorsqu'il est immergé dans l'eau. Cet essai permet ainsi de déterminer la capacité portante du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement, fournissant ainsi des paramètres essentiels pour les tests géotechniques préalables à la construction d'infrastructures routières. L'essai CBR est largement utilisé à l'échelle mondiale pour déterminer l'épaisseur des couches de chaussées.

### **IV.2. Essais de compactage**

#### **IV.2.1. Définition du compactage NF P 94-078**

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

Après compactage, le sol acquière :

- Une augmentation de la capacité portante.
- Une augmentation de la résistance au cisaillement.
- Une augmentation de la densité sèche ( $\gamma_d/\gamma_w$ ).
- Une diminution de la perméabilité.

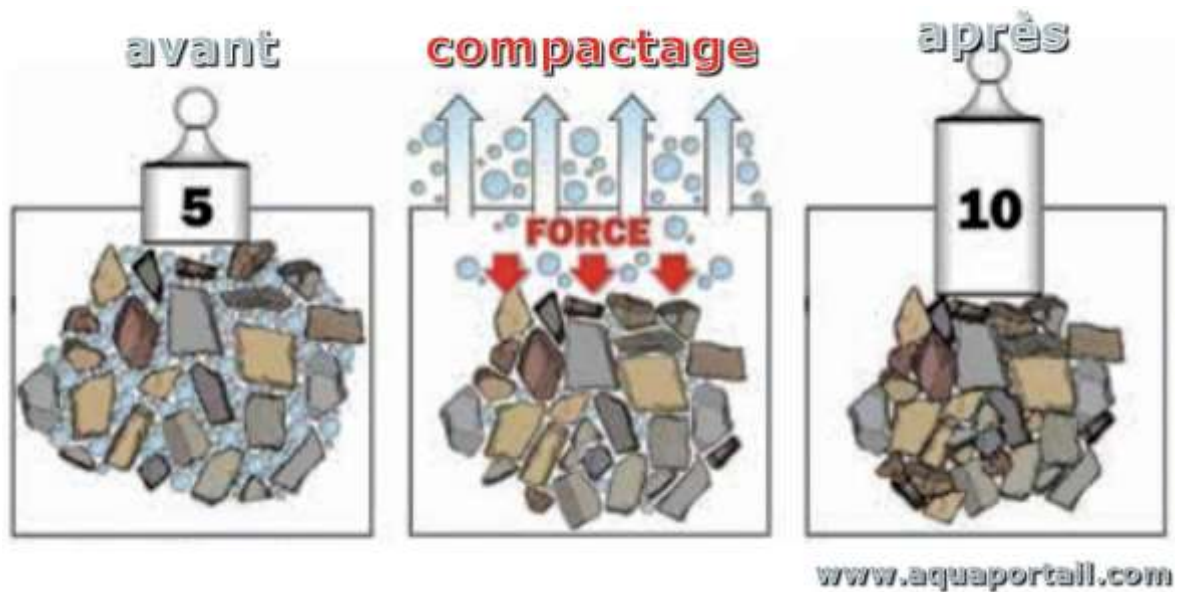


Figure IV.1: Compactage des sols.

### IV.2.2. 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 compacter un sol, on fait agir sur lui un engin qui développe, en tout point du sol, des contraintes qui dépendent de la nature de l'engin, de ses caractéristiques, la profondeur du point considéré

### IV.3. Classification des sols en vue du compactage

#### IV.3.1. Les 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  $800 - 1600 \text{ kg/cm}^2$  au premier cycle de chargement et  $1600 - 3200 \text{ kg/cm}^2$  au cycle suivant de chargement. Les tassements mesurés dans des enrochements de bonne qualité bien compactés se sont révélés très faibles.

#### IV.3.2. 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 bien 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. 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. 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.3.5. Le compactage sur le chantier**

Le principe du compactage repose sur la pression au sol exercée par une charge qui se déplace sur la surface. Lorsque l'on applique une charge au sol, celle-ci se transmet à travers cette couche pour atteindre les couches inférieures.

#### **IV. 3.6. Matériel et procédés spéciaux de compactage in-situ**

Dans les procédés courants de compactage sur chantier, on utilise des engins légers et des engins lourds (Figure IV.2) et cela suivant la spécificité du sol à compacter et la nature des

travaux à réaliser :

Les engins de compactage les plus utilisés sont classés en trois catégories :

- Les rouleaux à pneus
- Les rouleaux vibrants
- Rouleaux lisses
- Les rouleaux à pieds dameurs.



Figure IV.2 : Équipements légers de compactage.



Rouleaux vibrants,

Compacteur à pneus

Figure IV.3 : Quelques engins lourds de compactage sur chantier

#### 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.

##### 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)

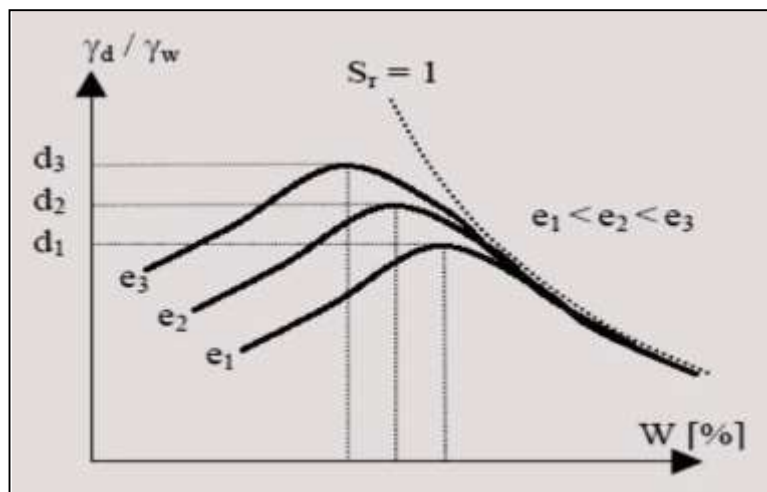


Figure IV.4 : Influence de l'énergie de compactage. (Lereau, 2006)

#### 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  $\gamma_d$  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).



**Faible teneur en eau**  
Frottements internes élevés  
Faible densité

**Teneur en eau optimale**  
meilleur compactage  
densité maximale

**Teneur en eau élevée**  
pression élevée de l'eau  
faible densité

Figure IV.5 : 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.

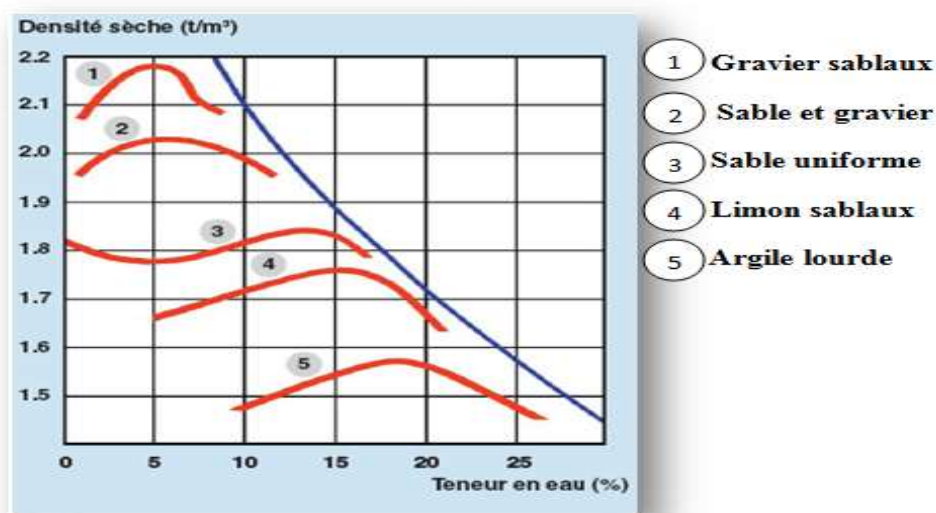


Figure IV.6 : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.

#### IV.5. Les essais de compactage au laboratoire

Les essais de compactage effectués en laboratoire permettent de déterminer la masse

volumique sèche maximale pour une énergie de compactage donnée. (Robitaille et Tremblay, 1997).

Les 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. (Le flaiive et al, 1974)



Figure IV.7 : Essai de compactage.

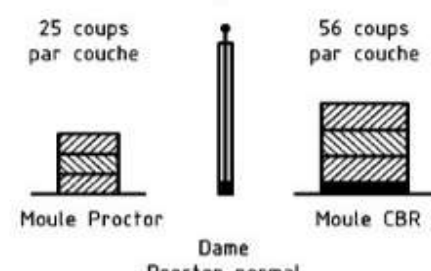
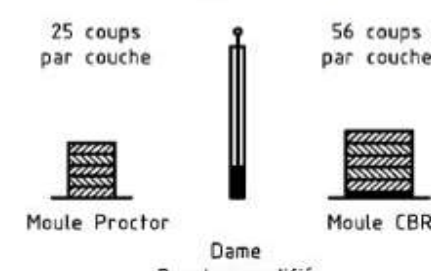
- **L'essai Proctor Normal (PN)**

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 56 coups pour le moule CBR.

- **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 56 coups pour le moule CBR.

Tableau IV. 1 : Conditions des essais Proctor normal et modifié NF P 94-078.

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	<p>3 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor      Dame Proctor normal      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	<p>5 couches, à raison de :</p> <p>25 coups par couche      56 coups par couche</p>  <p>Moule Proctor      Dame Proctor modifié      Moule CBR</p>
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

#### IV.5.1. Essais réalisés

Une série d'essai Proctor modifié a été réalisée dans la présente étude sur tous les échantillons de débris de béton avec différentes proportions de débris de verre évoquées en chapitre III.

Pour une meilleure approche des résultats, les essais sont réalisés méticuleusement, le même matériel a été utilisé pendant toute l'étude et lavé à chaque fin d'un essai.



Figure IV.8: Essais Proctor modifié pour les différents mélanges.

### IV.5.2. Expression des résultats

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

#### Première partie

- **Débris de béton seuls**

Tableau IV.2 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton seuls.

Essais	Teneur en eau w	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	9,81	1,94
Echantillon N°2	11,04	1,97
Echantillon N°3	11,59	1,98
Echantillon N°4	12,59	1,96
Echantillon N°5	13,1	1,95

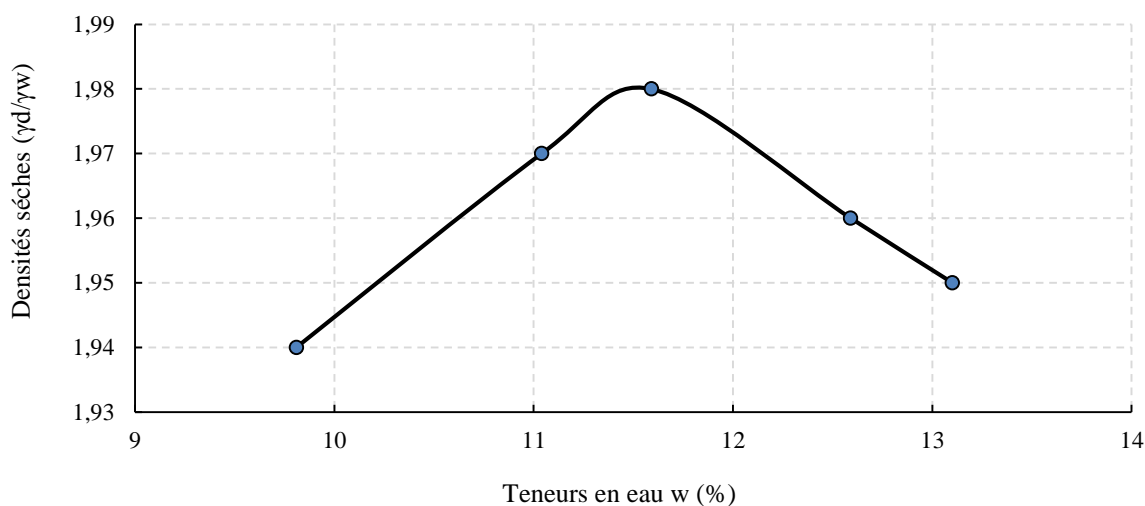


Figure IV.9 : Courbe Proctor débris de béton seuls.

- **Débris de béton + 10% de débris de verre**

Tableau IV.3 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 10% de débris de verre

Essais	Teneur en eau w	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	10,67	1,997
Echantillon N°2	11,1	1,994
Echantillon N°3	11,35	1,998
Echantillon N°4	11,56	1,996
Echantillon N°5	12	1,985

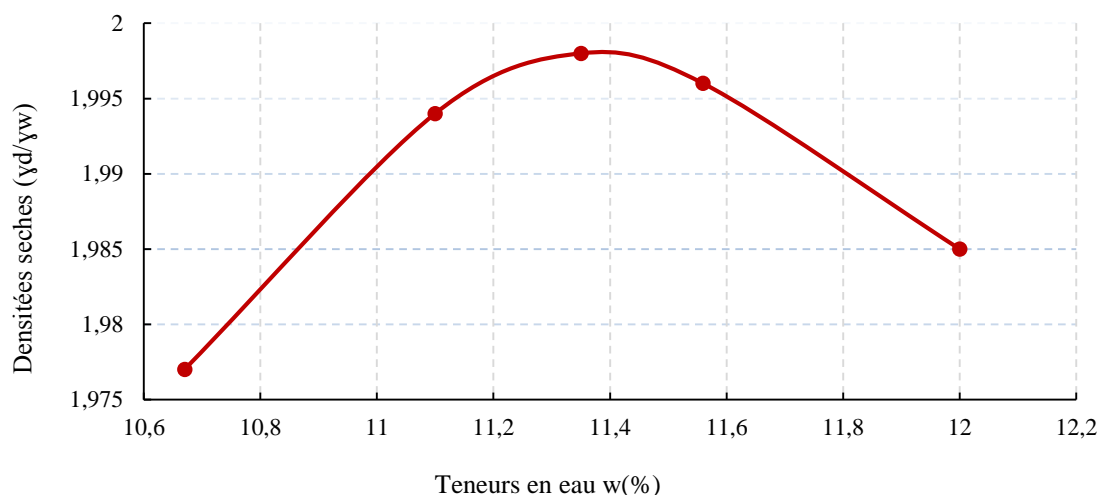


Figure IV.10: Courbe Proctor pour les débris de béton + 10% de débris de verre

- **Débris de béton + 15% de débris de verre**

Tableau IV.4 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 15% de débris de verre

Essais	Teneur en eau w	Densité sèche γd/γw
Echantillon N°1	11,2	1,97
Echantillon N°2	11,6	1,99
Echantillon N°3	11,92	2
Echantillon N°4	12,2	1,99
Echantillon N°5	12,3	1,985

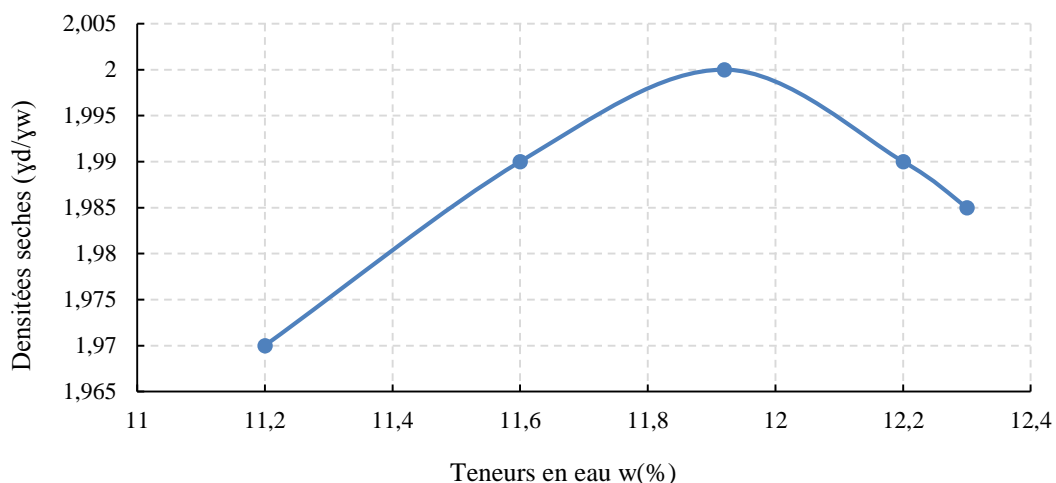


Figure IV.11 : Courbe Proctor pour les débris de béton + 15% de débris de verre

- **Débris de béton + 20% de débris de verre**

Tableau IV.5: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 20% de débris de verre

Essais	Teneur en eau	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	9,5	1,86
Echantillon N°2	10,28	1,92
Echantillon N°3	10,89	1,97
Echantillon N° 4	11,71	1,96
Echantillon N° 5	12,3	1,94

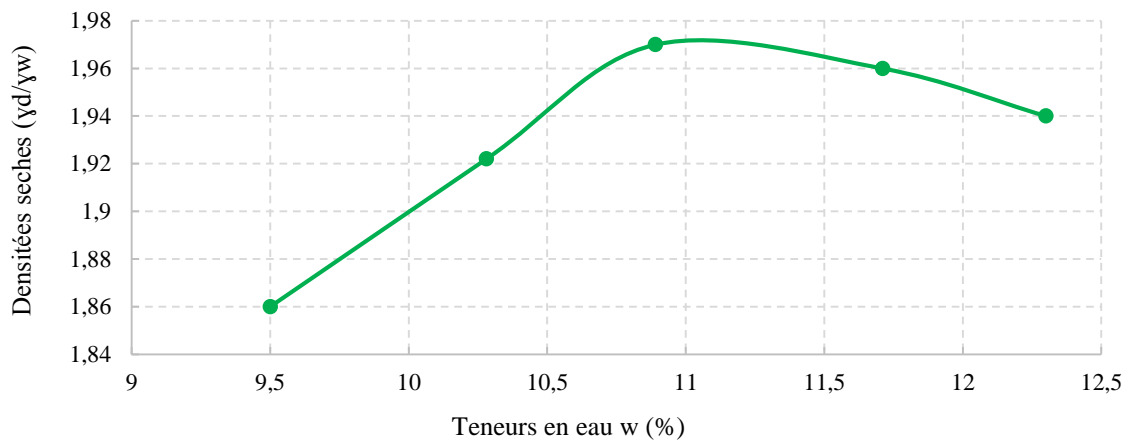


Figure IV.12 : Courbe Proctor des débris de béton + 20% de débris de verre

- **Débris de béton + 40% de débris de verre**

Tableau IV.6: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + 40% de débris de verre

Essais	Teneur en eau	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	10,55	1,9
Echantillon N°2	11,07	1,94
Echantillon N°3	11,43	1,95
Echantillon N° 4	11,84	1,94
Echantillon N° 5	12,21	1,93

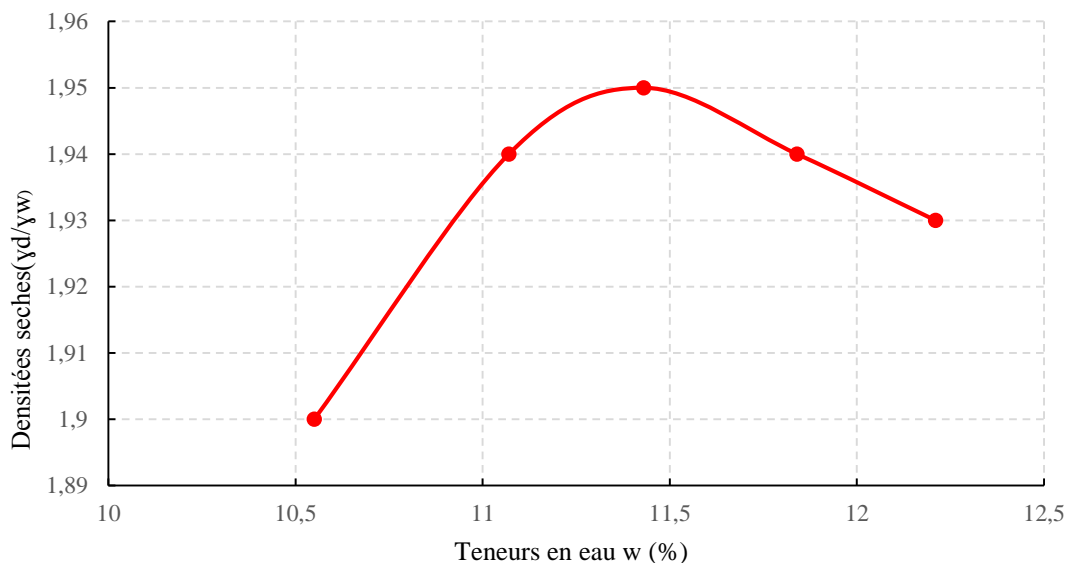


Figure IV.13 : Courbe Proctor des débris de béton + 40% de débris de verre

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

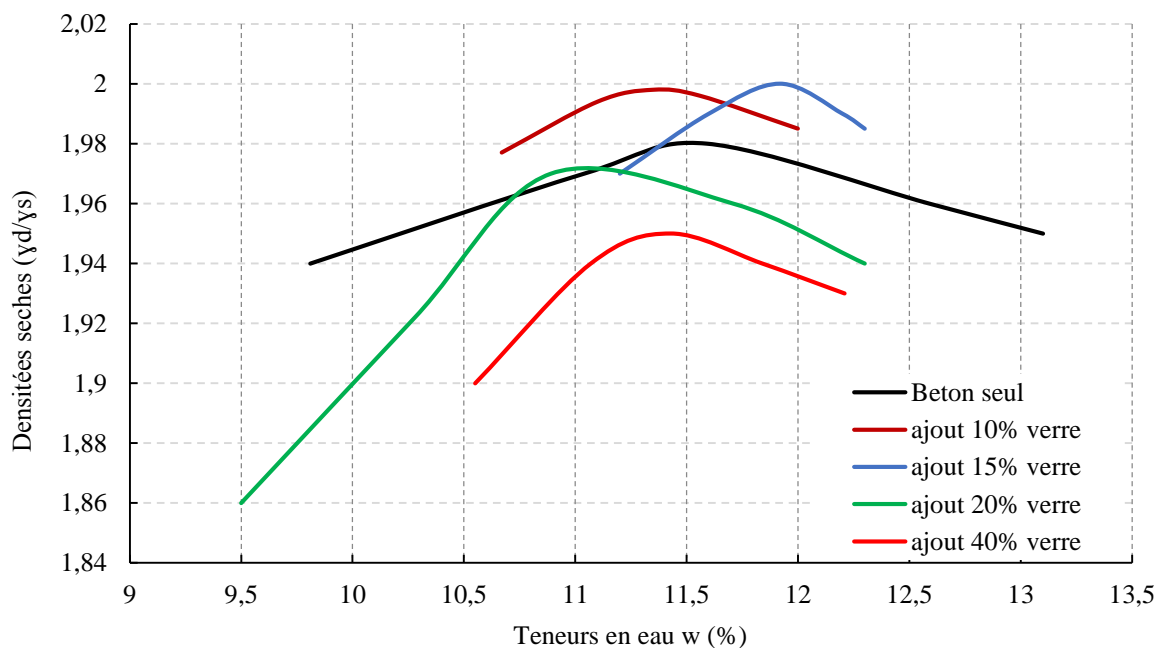


Figure IV.14 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

En se référant à la (figure IV.14), nous constatons que les courbes Proctor obtenues montrent une allure en forme de cloche, elles présentent généralement un pic plus ou moins marquant présentant la teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ ) appelée "optimum Proctor".

Ce point représente la teneur en eau idéale nécessaire pour atteindre la densité sèche maximale lors du compactage du matériau utilisé.

La courbe des débris de béton seuls et plus étalée du moment que c'est un matériau non sensible à l'eau, avec l'ajout des débris de verre, donc augmentation de la fraction fine dans l'échantillon (débris de béton + 10%, 15%, 20% et 40 % de débris de verre), on constate que les courbes sont légèrement plus bombées.

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

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

Echantillons	$w_{opt}$ (%)	Densités sèches
Débris de béton seuls	11,5	1,98
Débris de béton + 10% de débris de verre	11,4	1,99
Débris de béton + 15% de débris de verre	11,90	2,00
Débris de béton + 20% de débris de verre	11,2	1,97
Débris de béton + 40% de débris de verre	11,43	1,95

### Densités sèches maximales pour les différents mélanges

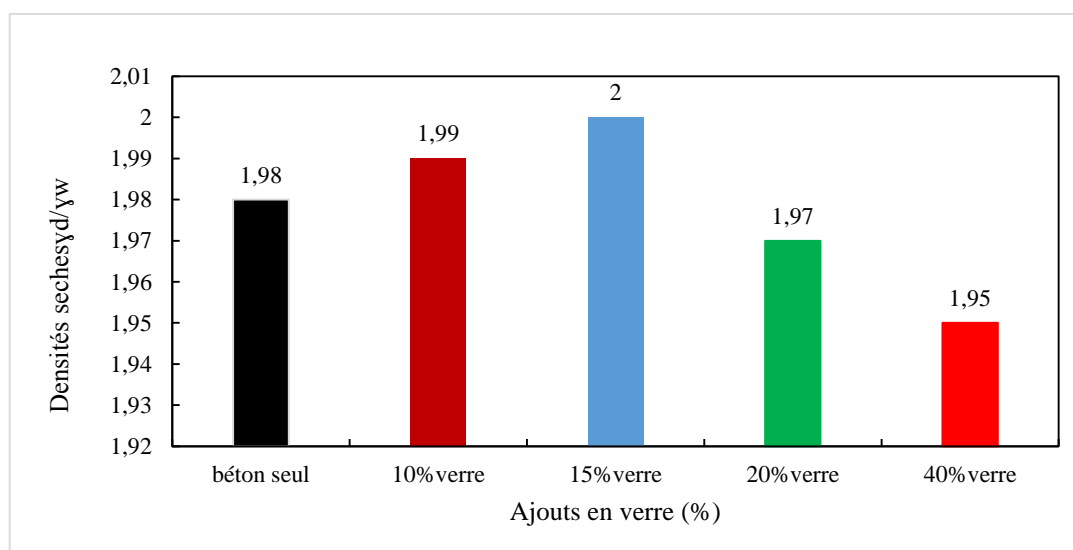


Figure IV.15 : Évolutions des densités sèches maximales en fonction du pourcentage de débris de verre.

Les résultats présentés sur la figure (IV.15) relatifs au compactage des différents échantillons (mélanges), permettent de constater que les densités sèches maximales augmentent au fur et à mesure que la quantité des débris de verre augmente jusqu' à 15%. Au-delà de cette proportion de verre, les densités sèches diminuent avec l'augmentation de la quantité de verre dans l'échantillon. On peut dire ainsi, que la proportion de 15% le verre est adéquate pour combler les vides existant dans la structure initiale de débris de béton.

Toutefois, ces densités peuvent être considérées très intéressantes vu qu'elles sont supérieures à 1.8 pour tous les mélanges. Ce qui vérifie amplement les valeurs de référence exigées par les normes en vigueur.

### Teneurs en eau optimales pour les différents mélanges

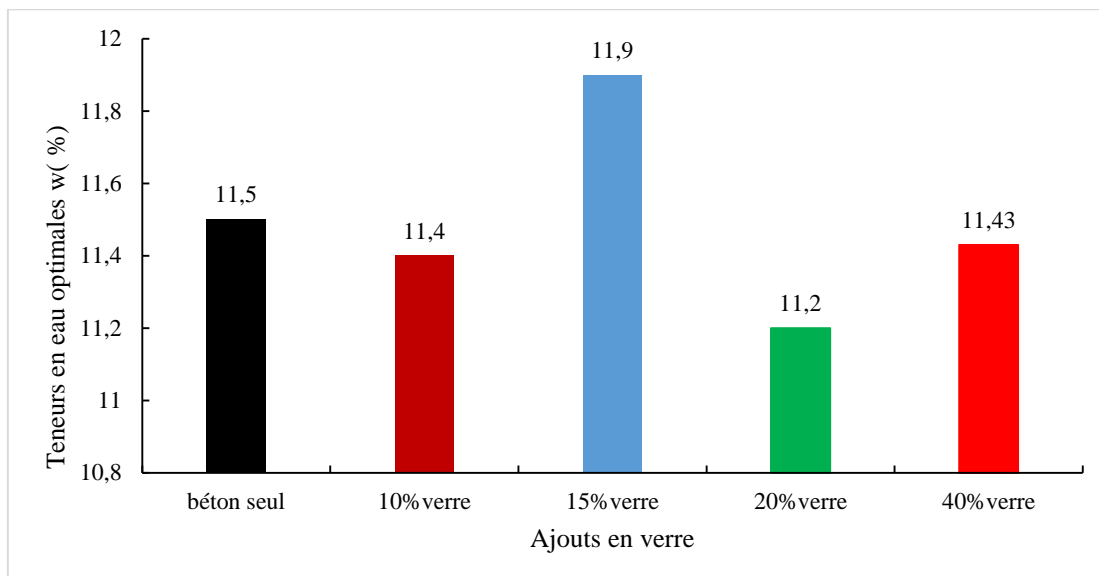


Figure IV.16 : Évolutions des teneurs en eau en fonction du pourcentage de débris de verre.

D'après la figure (IV.16), on constate que les teneurs en eau varient d'une manière aléatoire en ajoutant du verre du moment que ce dernier est insensible à l'eau. Mais si on se réfère à la plage de variation générale de cette teneur qui est de (11.2 à 11.9) on peut dire que nous restons toujours dans le voisinage de la teneur en eau optimale des débris de béton seul et cela semble logique puisque le verre concassé est un matériau sableux non sensible à l'eau

### Deuxième partie

- **Remplacement de la fraction sable fin des débris de béton par celle de débris de verre**

Tableau IV.8: Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + verre fin

Essais	Teneur en eau	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	10,61	1,94
Echantillon N°2	11,01	1,97
Echantillon N°3	11,35	1,98
Echantillon N° 4	11,47	1,97
Echantillon N° 5	11,56	1,96

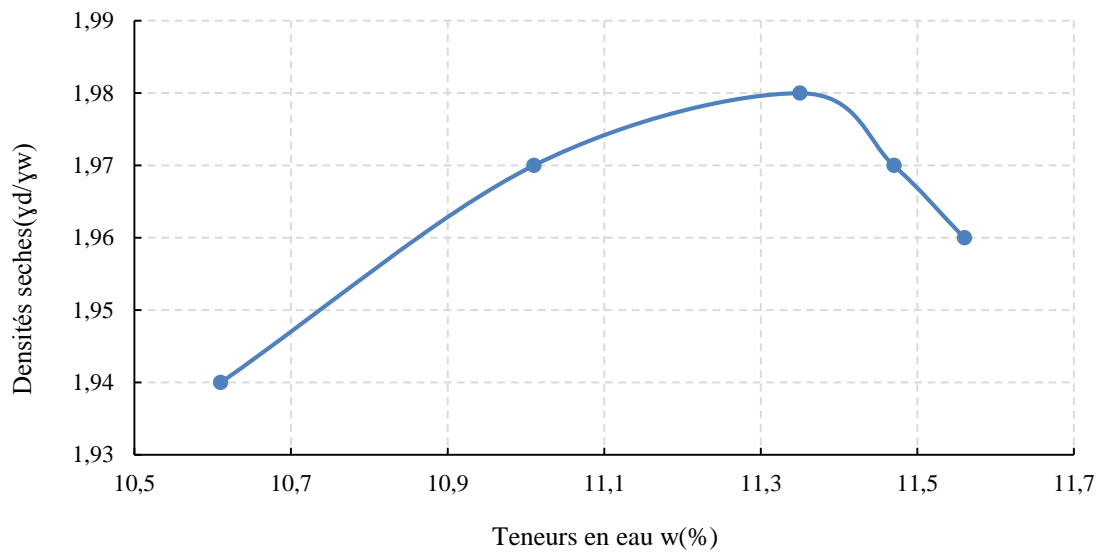


Figure IV.17 : Courbe Proctor des débris de béton + débris de verre fin

- **Remplacement des fraction sable fin et moyen des débris de béton par celles des débris de verre**

Tableau IV.9 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton +verre fin et moyen

Essais	Teneur en eau	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	9,13	1,97
Echantillon N°2	9,34	2
Echantillon N°3	9,62	2,03
Echantillon N° 4	9,8	2,02
Echantillon N° 5	10,1	2

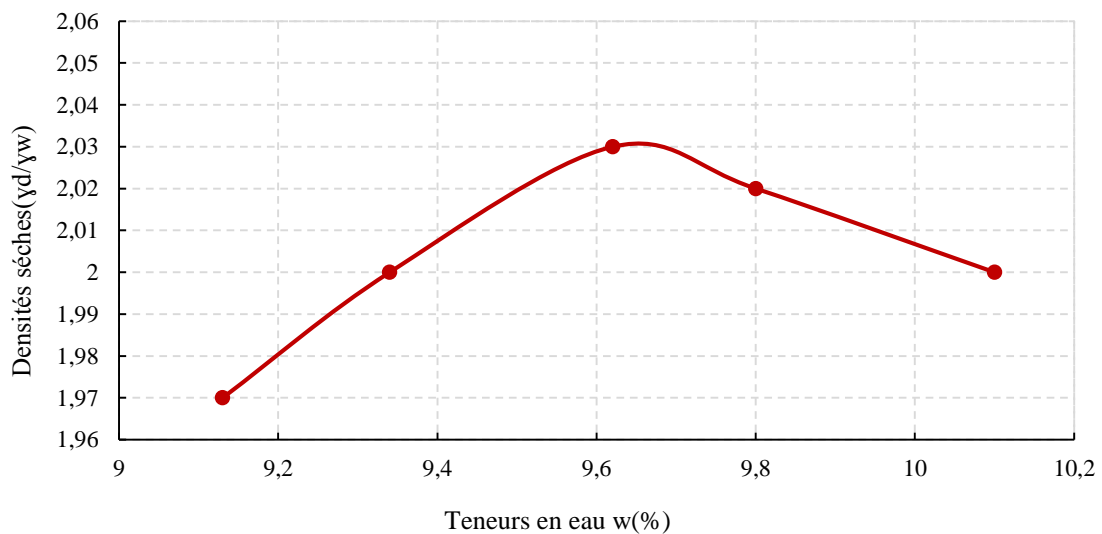


Figure IV.18 : Courbe Proctor des débris de béton + débris de verre fin et moyen

- **Remplacement des fraction sable fin et moyen des débris de béton par celles des débris de verre**

Tableau IV.10 : Résultats de l'essai Proctor modifié pour les débris de béton + verre fin, moyen et grossier

Essais	Teneur en eau	Densité sèche $\gamma_d/\gamma_w$
Echantillon N°1	7,51	2,03
Echantillon N°2	7,84	2,07
Echantillon N°3	7,97	2,07
Echantillon N° 4	8,1	2,05

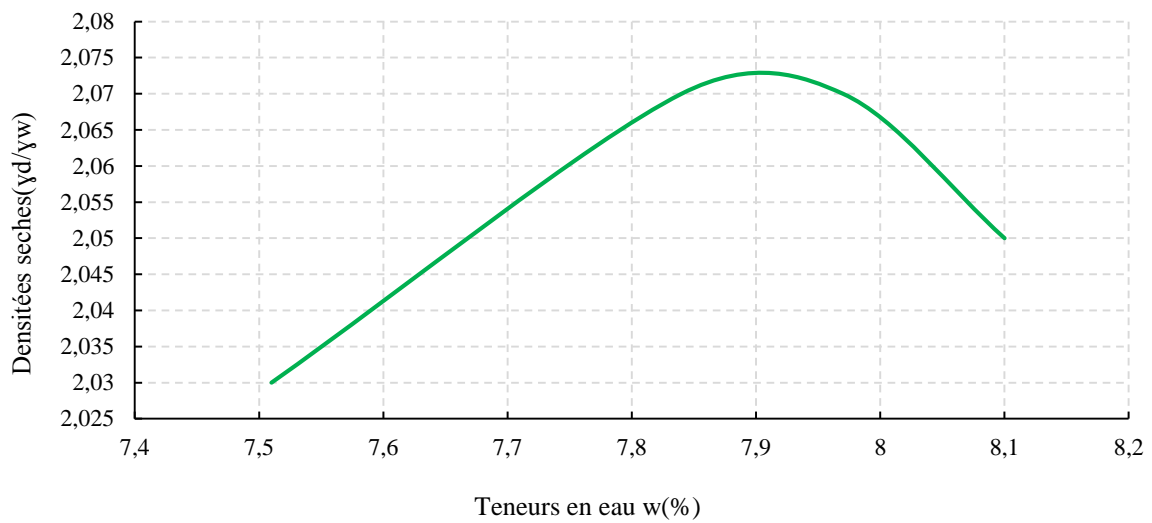


Figure IV.19 : Courbe Proctor des débris de béton + débris de verre fin, moyen et grossier  
Les courbes Proctor obtenues pour les différents mélanges sont regroupées sur la figure ci-dessous.

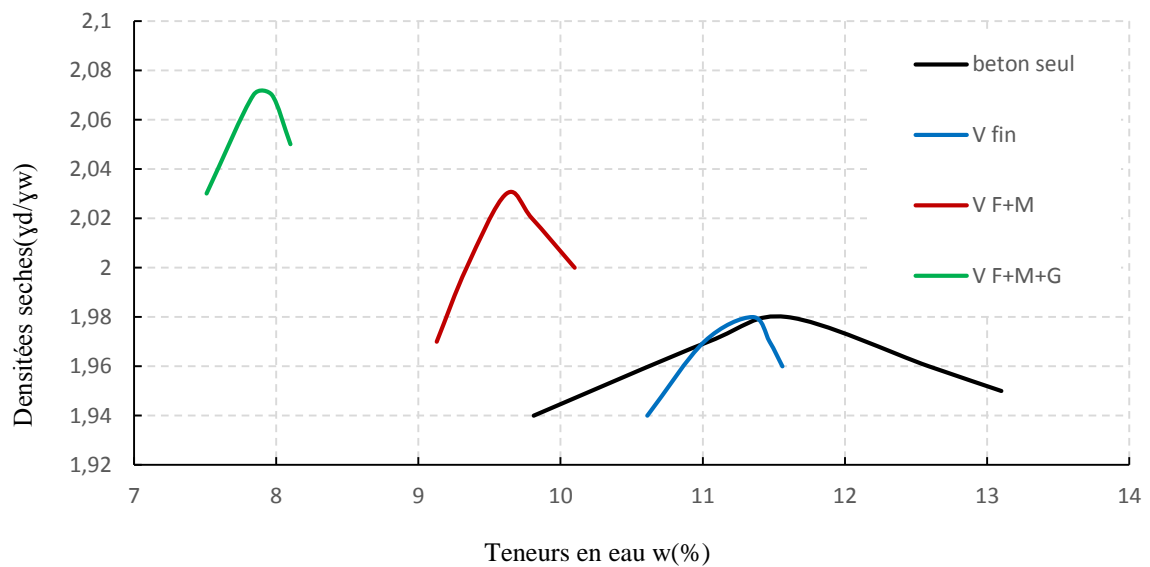


Figure IV.20 : Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

En se référant à la (figure IV.20), nous constatons que les courbes Proctor obtenues montrent une allure en forme de cloche 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. La courbe des débris de béton seuls et plus étalée du moment que c'est un matériau non sensible à l'eau, avec le remplacement des fractions sableuses des débris de béton avec celles du verre, on constate que les courbes sont moins étalées donc le matériau a acquis une légère sensibilité à l'eau, et on voit un comportement différent à chaque mélange par rapport au béton seul.

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

Tableau IV.11: Récapitulatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales.

Echantillons	$w_{opt}$ (%)	Densités sèches maximales
Débris de béton seuls	11,5	1,98
Débris de béton + débris de verre	11,35	1,98
Débris de béton + débris de verre	9,65	2,02
Débris de béton + débris de verre	7,95	2,07

#### Densités sèches maximales pour les différents mélanges

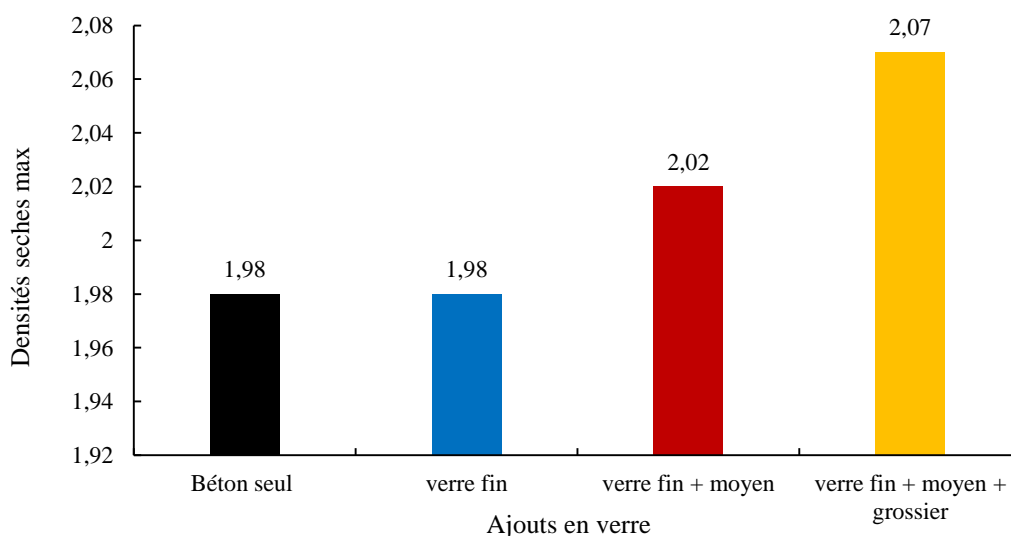


Figure IV.21 : Évolutions des densités sèches en fonction de l'ajout de débris de verre.

Les résultats de la figure (IV.21) indiquent que les densités sèches maximales augmentent progressivement lorsque les fractions sableuses du béton sont remplacées par celles du

verre, tout en maintenant la courbe granulométrique initiale. Cela suggère que l'introduction progressive de débris de verre dans le mélange augmente la compacité du matériau, probablement en optimisant l'emboîtement des particules et en réduisant les vides inter-granulaires.

### Teneurs en eau optimales pour les différents mélanges

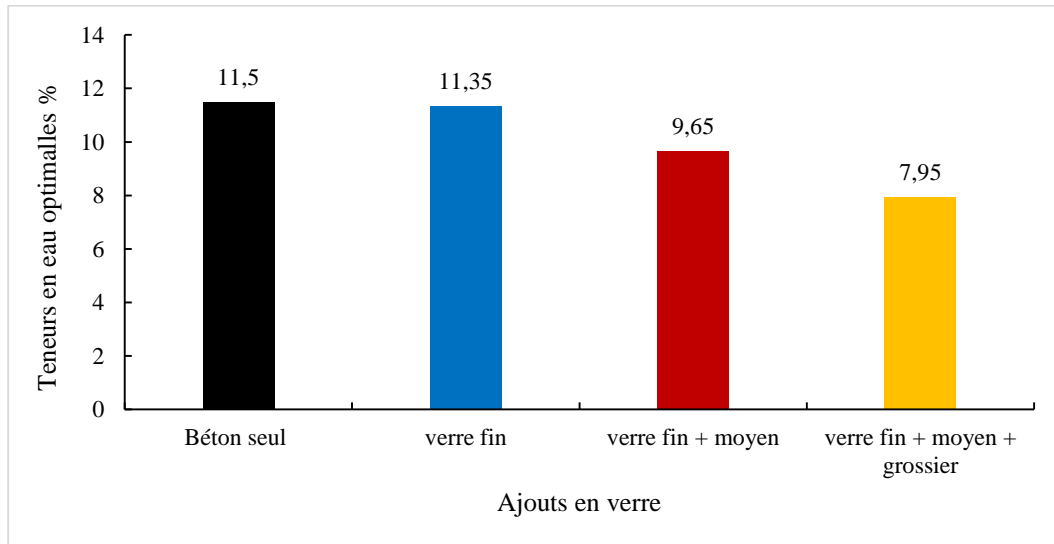


Figure IV.22 : Évolutions des teneurs en eau en fonction de l'ajout de débris de verre.

Selon la figure (IV.22), il est observé que les teneurs en eau optimales diminuent à mesure que la quantité de verre ajoutée augmente, en raison de l'insensibilité du verre à l'eau. La teneur en eau optimale obtenue lors du compactage des débris de béton seuls est de 11.5 %. L'ajout de verre a également influencé la teneur en eau au moment du compactage, réduisant cette dernière dans le cas des mélanges. Cette réduction pourrait entraîner des économies d'eau significatives, particulièrement bénéfiques dans les régions où l'eau est une ressource rare.

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

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

### IV.6 .1. 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 CBR qui permettent :

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

### IV.6.2. 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 (IPI) :** 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 (CBR) :** Mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté généralement à l'énergie Proctor modifiée à sa teneur en eau à l'optimum Proctor (Wopn). En sus, dans la mesure où le matériau est support ou constituant d'une structure de chaussée, l'éprouvette de sol testé sera surchargée en tête par des disques annulaires représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plateforme.

**-L'indice C.B.R après immersion (CBR 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 :

$$I(2.5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5mm d'enfoncement (enkN)}}{13.5} 100$$

$$I(5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 5mm d'enfoncement(enkN)}}{20} 100$$

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 :

$$G = \left(\frac{\Delta h}{H}\right) \times 100$$

Avec :

$\Delta h$  : variation de hauteur mesurée (mm).

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

### IV.6.3. 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...).

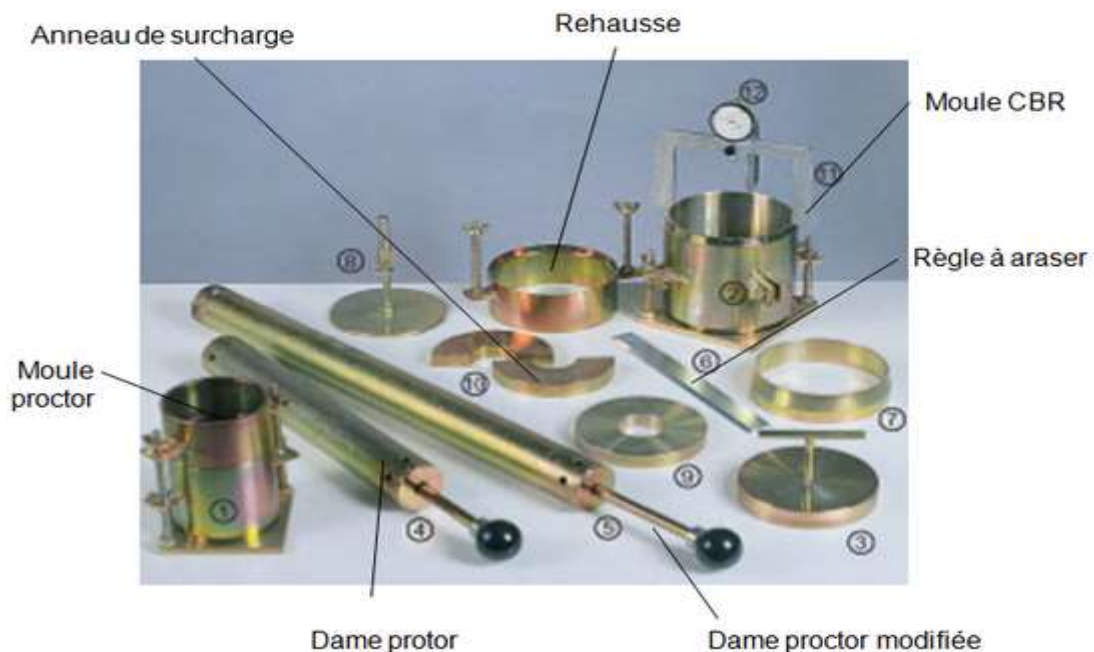


Figure IV.23 : Confection de l'éprouvette pour essai CBR

#### IV.6.4. Matériel de poinçonnement

Il comprend La LoadTrac II c'est une machine de poinçonnement automatique développée par la société Geocomp pour réaliser des essais géotechniques en laboratoire. Voici les principaux équipements et caractéristiques de la LoadTrac II :

- Châssis en acier rigide avec colonnes de chargement pouvant atteindre 45 kN.
- Vérin électromécanique assurant une vitesse de déplacement constante et contrôlée entre 0,00001 et 180 mm/min.
- Capteur de force et capteur de déplacement intégrés pour l'enregistrement des données en continu.
- Logiciel permettant le pilotage automatique des essais et le tracé effort-déplacement.

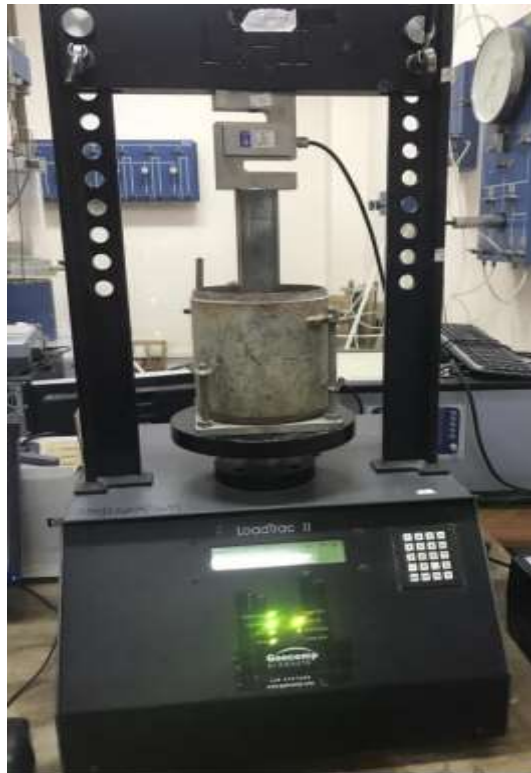


Figure IV.24 : La machine de poinçonnement LoadTrac II (LGEA).

#### IV.6.5. Mode opératoire

##### - Préparation des échantillons

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

#### IV.6.6. Détermination de l'indice CBR immédiat

Procéder au poinçonnement de la manière suivante (conforme à la norme NF P94-078) :

- ◆ Installation et mise en place de l'échantillon dans le dispositif de chargement ;
- ◆ Réglage des paramètres de l'essai dans le logiciel (vitesse de déplacement, course, seuils d'arrêt, etc.)
- ◆ Vérification du bon positionnement des capteurs de force et de déplacement.
- ◆ Démarrage de l'essai et enregistrement automatique des mesures par le logiciel.
- ◆ Poursuite de l'essai jusqu'aux critères d'arrêt fixés (force maximale, déplacement maximal, etc.).
- ◆ Arrêt automatique de l'essai par le logiciel.
- ◆ Relèvement automatique ou manuel du vérin de chargement.
- ◆ Démontage et récupération de l'échantillon après essai.
- ◆ Traitement des données d'essai et édition du rapport par le logiciel (courbes, valeurs caractéristiques, etc.)



Figure IV.25 : poinçonnement des éprouvettes laboratoire LGEA

#### **IV.6.7. 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 présent 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.



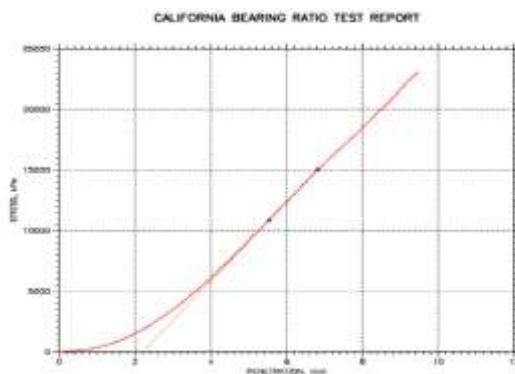
Figure IV.26 : Essai CBR après immersion, imbibition et gonflement.

#### IV.7. Expression des résultats

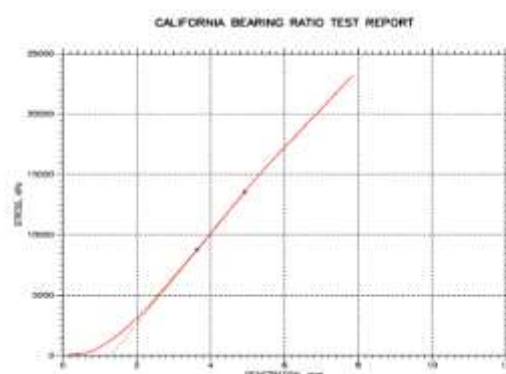
Dans cette étude des essais CBR ont été réalisés pour tous les échantillons des différents ajouts, afin de déterminer les indices portant immédiats (IPI) et les indices CBR après immersion.

##### IV.7.1. Interprétation des résultats de la Première partie

###### ❖ Indice (C.B.R immédiat)



Débris de béton seuls



Débris de béton + 10% de verre

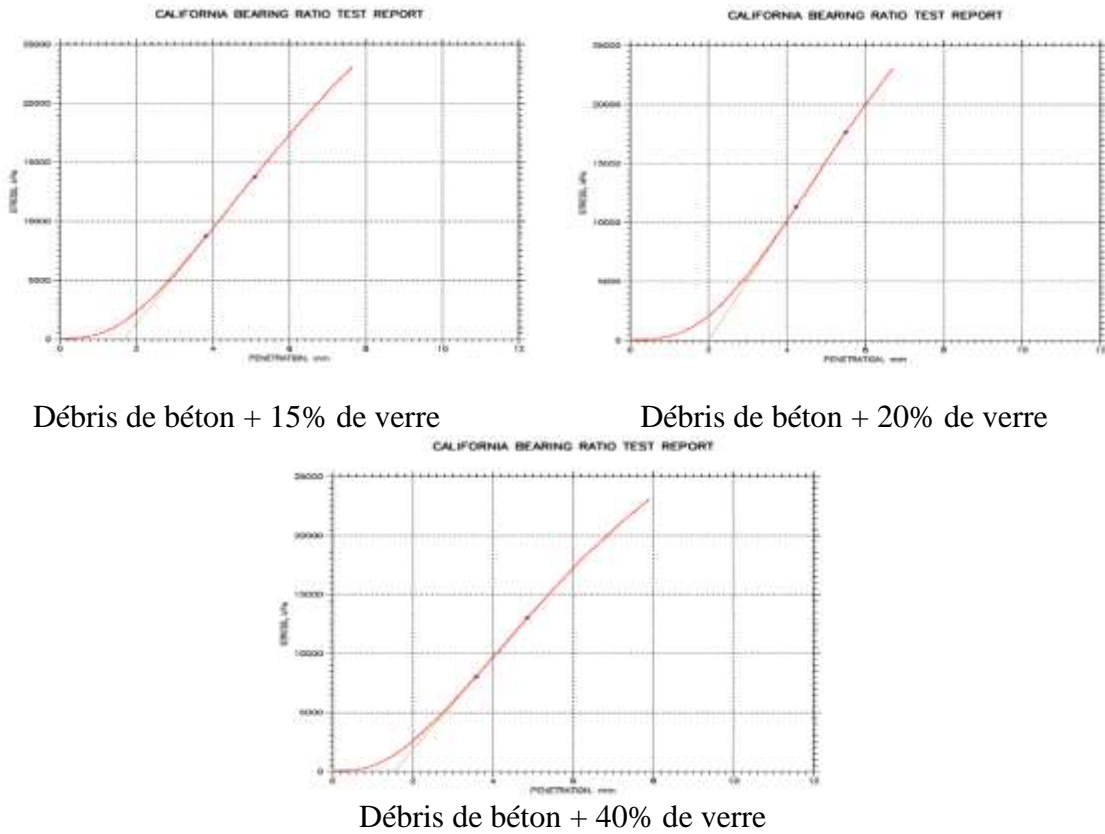


Figure IV.27 : Courbes enfoncements-forces des échantillons avant immersion(CBR)

Tableau IV.12 : Résultats des essais indice portant immédiat.

Echantillons	Indice portant immédiat (CBR)		
	I (2.5)	I (5)	IPI
Débris de béton seuls	121	158	158
Débris de béton + 10 % de débris de verre	138	179	179
Débris de béton+ 15 % de débris de verre	149	194	194
Débris de béton + 20 % de débris de verre	147	183	183
Débris de béton + 40 % de débris de verre	143	180	180

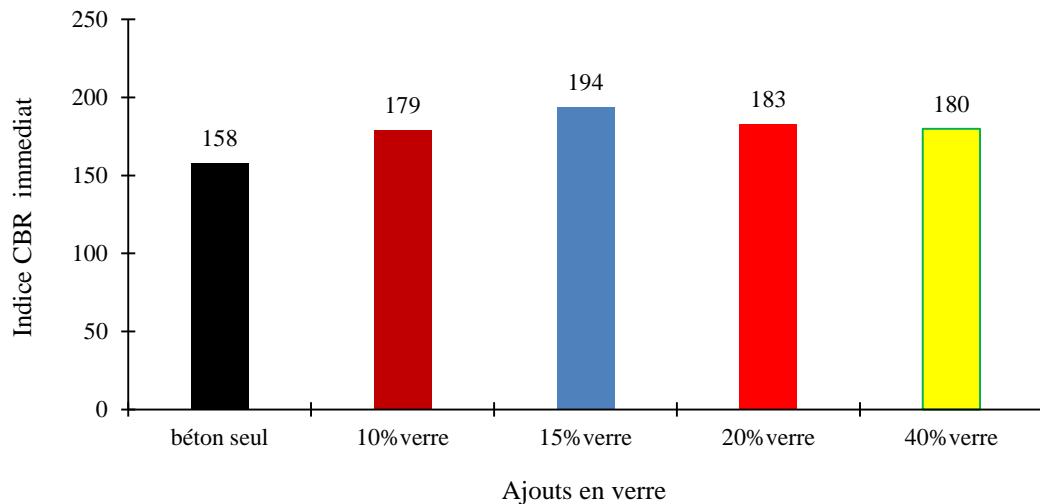


Figure IV.28 : Evolution des indices CBR immédiat en fonction des pourcentages de débris de verre.

Les résultats des essais de portance CBR réalisés avant immersion, présentés sur la figure (IV.28), révèlent que la portance des mélanges augmente avec l'incorporation de verre jusqu'à une teneur de 15% (correspondant à l'ajout qui a fourni la meilleure densité sèche). Au-delà de cette proportion, la portance commence à diminuer. L'excès de verre peut perturber la structure initiale du matériau et fait diminuer sa portance. Toutefois, malgré cette diminution, l'ajout des débris de verre confèrent aux mélanges une résistance notable supérieure à celle développée par les débris de béton seuls. A souligner que tous les résultats obtenus aux essais CBR avant immersion pour les différents échantillons étudiés sont très intéressants et répondent largement aux exigences des normes relatives aux granulats routiers

#### ❖ Indices (CBR imm)



Débris de béton seuls



Débris de béton + 10% de verre

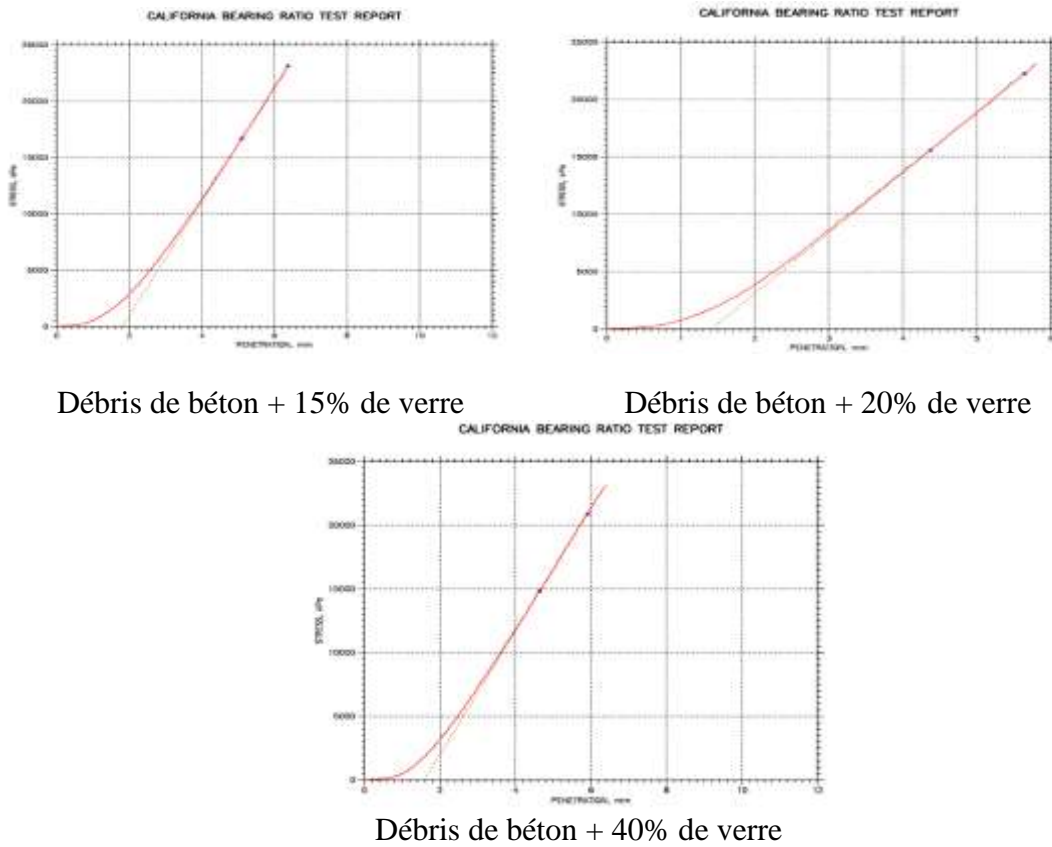


Figure IV.29 : Courbes enfoncements-forces des échantillons après immersion(CBRimm)

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

Tableau IV.13 : Résultats des essais CBR immergé.

Echantillons	Indice portant Immergé		
	I (2.5)	I (5)	CBR imm
Débris de béton seuls	196	N/A	N/A
Débris de béton + 10 % de débris verre	186	N/A	N/A
Débris de béton + 15% de débris verre	188	N/A	N/A
Débris de béton + 20 % de débris verre	195	N/A	N/A
Débris de béton + 40 % de débris verre	180	N/A	N/A

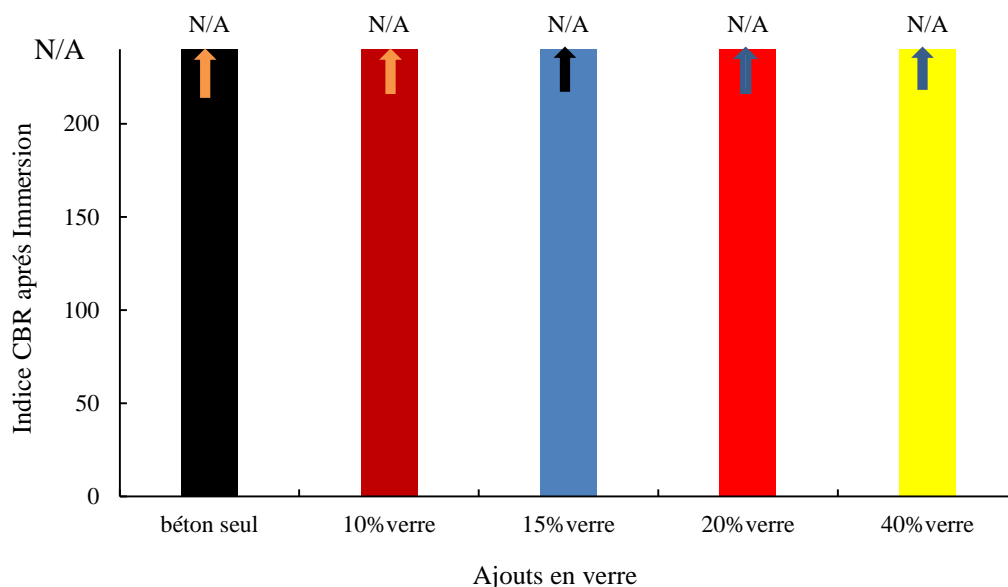


Figure IV.30 : Evolution des CBR imm en fonction des pourcentages de débris de verre

Les résultats des essais de portance CBR réalisés après immersion, illustrés sur la figure (IV.30), montrent que les échantillons reconstitués de débris de béton seuls ainsi qu'avec les différents ajouts de verre développent de meilleures résistances après immersion (en contact avec l'eau). Les valeurs de portances mentionnées (N/A) sur le logiciel de l'appareil signifient que la machine a atteint sa capacité maximale. De telles résistances au poinçonnement demeurent significatives. Cela peut être déterminant pour l'application de ces matériaux dans des conditions où l'humidité est un facteur critique.

#### Résumé des résultats (CBR et CBR imm)

Tableau IV.14: Résumé des résultats d'essai (IPI et CBR imm).

Echantillons	CBR	CBR imm
Débris de béton seuls	158	N/A
Débris de béton + 10 % de débris verre	179	N/A
Débris de béton + 15% de débris verre	194	N/A
Débris de béton + 20 % de débris verre	183	N/A
Débris de béton + 40 % de débris verre	180	N/A

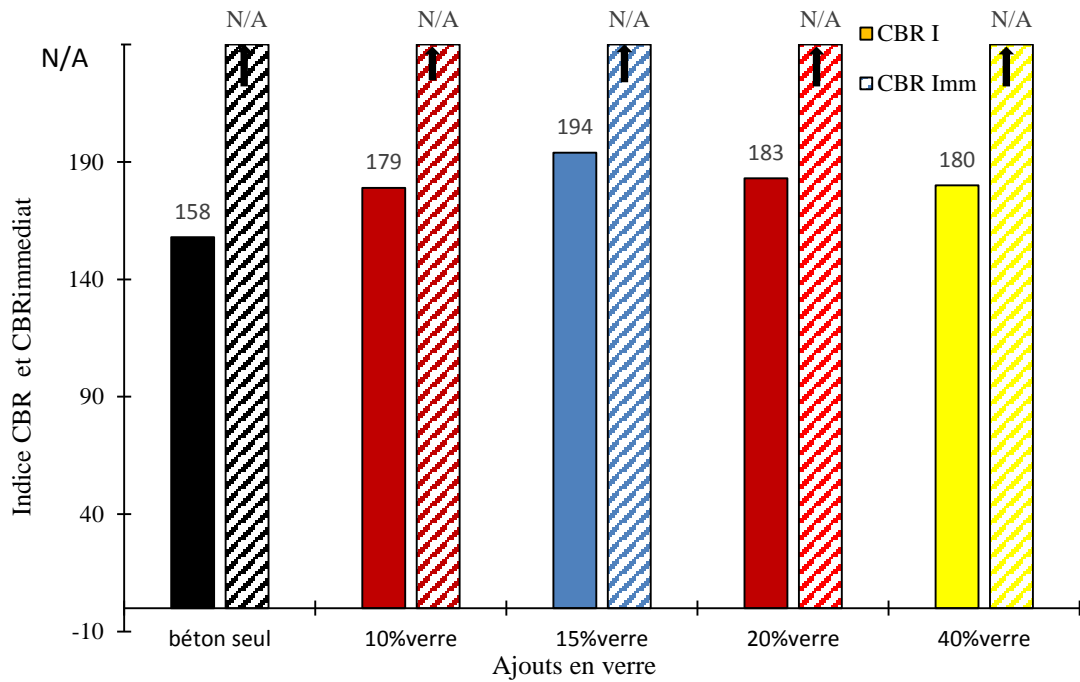


Figure IV.31: Courbes comparatives des indices CBR et CBRimm des différents pourcentages de débris de béton

A titre de comparaison, les résultats ci-dessus permettent de constater que les portances des échantillons étudiés après immersion sont supérieures à celles développées avant immersion. Ce comportement est différent de la plupart des matériaux naturel routiers qui perdent de leurs résistances en passant de l'état sec à l'état humide.

Ce comportement peut être due à la réaction des fractions fines des deux matériaux en présence d'eau (cimentation).

### IV.7.2. Interprétation des résultats de la deuxième partie

#### ❖ Indices (C.B.R immédiat)





Figure IV.32 : Courbes enfoncements-forces débris de béton + verre fin, moyen et grossier

Tableau IV.15: Résultats des essais CBR immédiat (CBR).

Echantillons	Indice portant immédiat (IPI)		
	I (2.5)	I (5)	CBR
Débris de béton seuls	121	158	158
Débris de béton + fraction fine de débris de verre	145	180	180
Débris de béton+ fraction fine et moyenne de débris de verre	168	217	217
Débris de béton + fraction fine ,moyenne et grossière de débris de verre	173	N/A	N/A

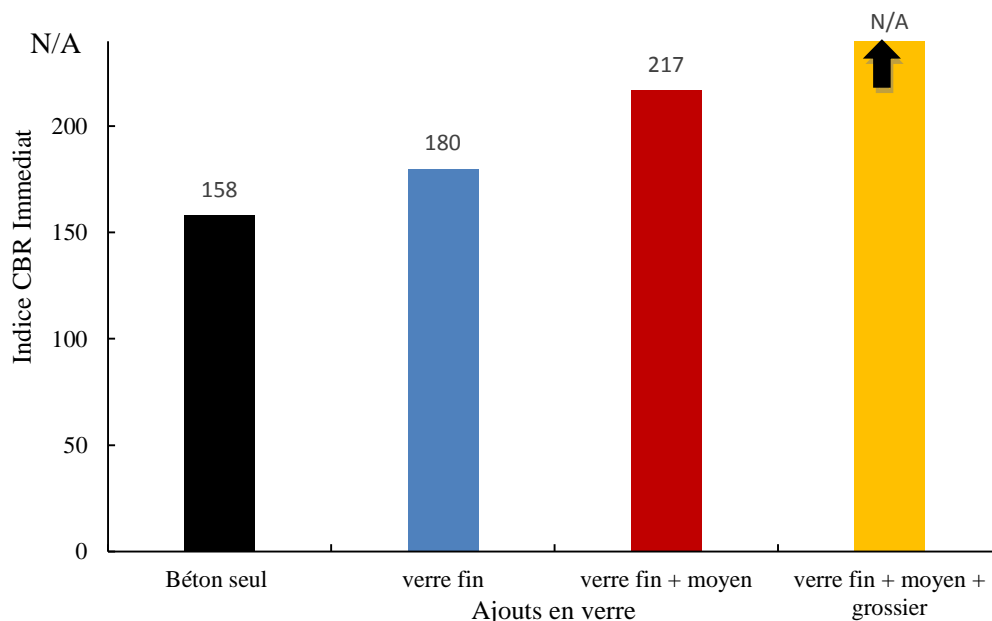


Figure IV.33 : Evolution des indices CBR immédiat en fonction de la teneur en débris de verre.

Les résultats des essais de portance CBR réalisés avant immersion présentés sur la figure (IV.33), permettent de constater que la portance des mélanges augmente avec le remplacement des fractions sableuses des débris de béton avec celles du verre. Nous

pouvons constater que les meilleures portances sont développées par les échantillons ayant donné les meilleures densités aux essais de compactage.

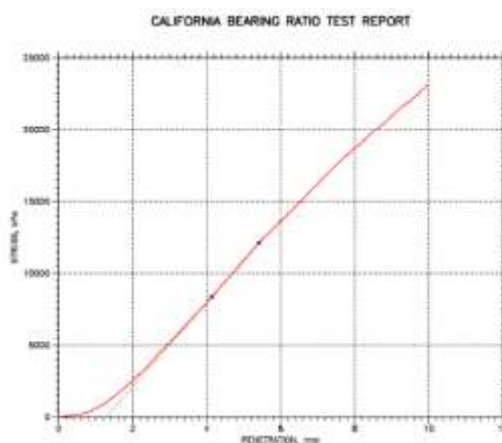
❖ **Indices (C.B.R imm)**



Débris de béton + débris de verre fin



Débris de béton + débris de verre fin, moyen



Débris de béton + débris de verre fin, moyen et grossier

Figure IV.34 : Courbes enfoncements-forces débris des échantillons (CBRimm).

Tableau IV.16: Résultats des essais CBR immersion (CBRimm).

Echantillons	Indice portant immergé		
	I (2.5)	I(5)	CBRimm
Débris de béton seuls	198	N/A	N/A
Débris de béton + fraction fine de débris de verre	179	N/A	N/A
Débris de béton+ fraction fine et moyenne de débris de verre	182	N/A	N/A
Débris de béton + fraction fine ,moyenne et grossière de débris de verre	169	N/A	N/A

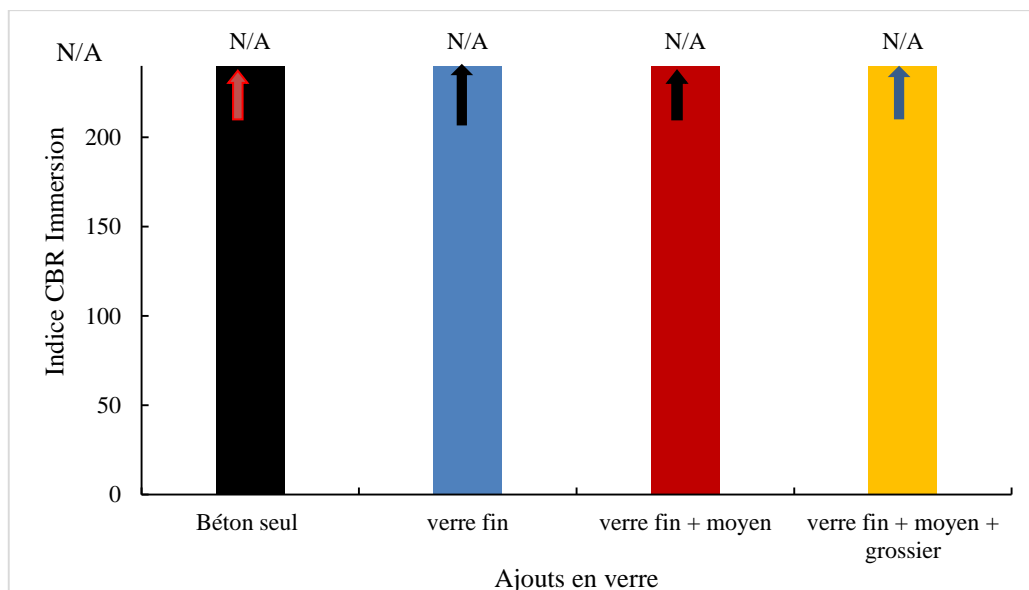


Figure IV.35 : Evolution des indices CBR après immersion en fonction des pourcentages des débris de verre.

Les résultats des essais de portance CBR réalisés après immersion, illustrés sur la figure (IV.35), montrent que les échantillons reconstitués par la substitution des fractions sableuses des débris de béton par celles des débris de verre développent des portances très intéressantes en présence d'eau (après immersion). Les valeurs de portances mentionnées (N/A) sur le logiciel de l'appareil signifient que la machine a atteint sa capacité maximale. De telles résistances au poinçonnement demeurent significatives. Cela peut être déterminant pour l'application de ces matériaux dans des conditions où l'humidité est un facteur critique.

#### ❖ Résumé des résultats (CBR et CBR imm)

Tableau IV.17: Résumé des résultats d'essai (CBR et CBR imm).

Echantillons	CBR	CBR imm
Débris de béton seuls	158	N/A
Débris de béton + verre fin	180	N/A
Débris de béton + verre fin et moyen	217	N/A
Débris de béton + verre fin ,moyen et grossier	N/A	N/A

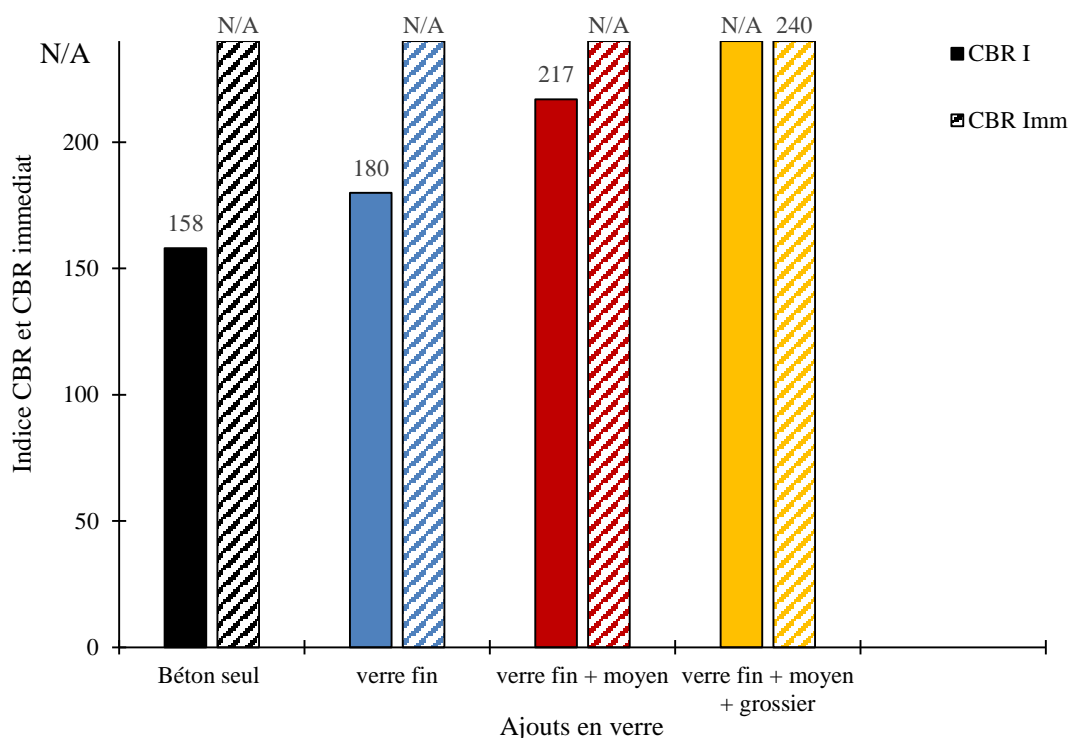


Figure IV. 36: Courbes comparatives des indices CBR et CBRimm des différents ajouts de débris de verre.

A titre de comparaison, les résultats ci-dessus permettent de constater que les portances des échantillons étudiés après immersion sont supérieures à celles développées avant immersion. Ce comportement est différent de la plupart des matériaux naturels routiers qui perdent de leurs résistances en passant de l'état sec à l'état humide.

Ce comportement peut être dû à la réaction des fractions fines des deux matériaux en présence d'eau (cimentation). Sachant que les proportions de ces fractions augmentent au cours des opérations de compactage ; ce qui rend les mélanges à la fois plus denses et plus résistants au poinçonnement.

En résumé, l'augmentation de la portance après immersion peut être due à des processus de cimentation des fines, d'amélioration de la densification des mélanges et d'autres effets physico-chimiques qui renforcent les matériaux étudiés une fois qu'ils sont exposés à l'eau.

#### IV.8. Conclusion

Les essais Proctor et CBR présentés dans cette étude ont permis de montrer le comportement très intéressant des mélanges au compactage, ainsi qu'au poinçonnement avant et après immersion dans les conditions les plus défavorables. En se basant particulièrement sur ces résultats, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés ont développé des caractéristiques mécaniques 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 sera fera l'objet du chapitre suivant.

## 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 permettant 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 matériau, 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  $500 \pm 2$  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	$500 \pm 2$	$2000 \pm 5$
6.3-10	$500 \pm 2$	$4000 \pm 5$
10-14	$500 \pm 2$	$5000 \pm 5$

$M$  est la masse du matériau soumis à l'essai,  $M'$  la masse des éléments supérieurs 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 de l'essai micro Deval.

### V.2.3. Matériaux utilisées

Nous avons réalisé des essais micro Deval sur la classe granulaire 6.3-10 mm pour les débris de béton, car il est le matériau principal de l'étude, par contre pour le verre on ne peut réaliser ce type d'essais, car la classe utilisé dans cette étude est de l'ordre 0-5 et que la norme de l'essai exige une classe à partir de 4-6.3 .

### V.2.4. Résultats de l'essai

Calcul du coefficient Micro Deval

$$MDE = \frac{500 - 305,1}{500} \times 100 = 38,9$$

Tableau V.2 : Type de gravier selon le coefficient MDE

Valeurs du coefficient Micro Deval en présence de l'eau	Appréciation
De 10 à 20	Bon à moyen
De 20 à 35	Moyen à faible
>35	Médiocre

D'après les résultats obtenus dans cet essai (MDE = 38,98), et d'après le tableau V.2 nous pouvons dire que les débris de béton étudiés sont des matériaux médiocres.

## 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.3 : 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.3 : 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 1.6 mm. 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.4 : Mise en place des granulats pour l'essai Los Angeles.

### V.3.3. Matériaux utilisés

Nous avons réalisé des essais micro Deval sur la classe granulaire 6.3-10 mm pour les débris de béton, car il est le matériau principal de l'étude, par contre pour le verre on ne peut réaliser ce type d'essais, car la classe utilisé dans cette étude est de l'ordre de 0-5mm et que la norme de l'essai exige une classe à partir de 4-6,3 mm.

### V.3.4. Résultats des essais

Calcul du coefficient Los Angeles.

$$LA = \frac{5000 - 3380}{5000} \times 100 = 32.4$$

Tableau V.4 : Coefficients LA et MDE pour l'échantillon.

Echantillon	LA	MDE	LA+MDE	Catégories
Débris de béton	32.4	38,98	71,38	E

Tableau V.5 : Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure.

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

En se référant aux résultats du tableau (V.4) et aux restrictions du tableau (V.4), nous pouvons dire que les débris de béton utilisés sont de catégories F. Ce type de matériau peut être utilisé pour couches de chaussées avec un traitement éventuel en fonction de l'intensité du 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 D<sub>10</sub> 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 : D<sub>10</sub>: 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. Résultats obtenus

Les résultats obtenus sur les débris de béton à l'issue de l'essai de dégradabilité sont présentés sur la figure suivante :

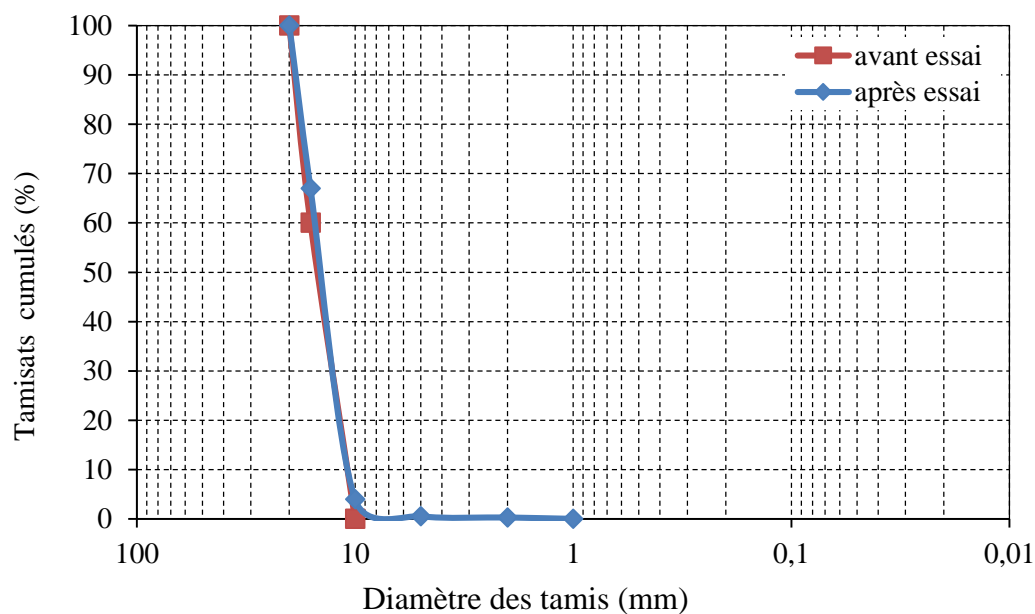


Figure V.5 : Courbes granulométriques avant et après essai de dégradabilité

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

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

$$DG = 1$$

Tableau V.6 : Classification des matériaux rocheux.

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

L'exposition des débris de béton aux différents cycles climatiques (chaleurs et hydratations) n'a pratiquement aucune influence sur la dégradabilité de l'échantillons. En effet, l'essai a présenté des courbes granulométriques presque identiques avant et après essai (voir figure : V.5) et un coefficient de dégradabilité égal à 1. Ainsi en se référant au

tableau (V.5) les matériaux étudiés sont considérés comme matériaux 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 :

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

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**

Ces essais sont réalisés avec le matériau principal soit les débris de béton puisque la fraction ciblée est contenue dans le fuseau de la courbe granulométrique de ces derniers. (10/20),

Pour les débris de verre, ils ne sont pas concernés par l'essai car la granulométrie utilisée est imposée et elle est de l'ordre de 0/5

### V.5.4. Résultats des essais

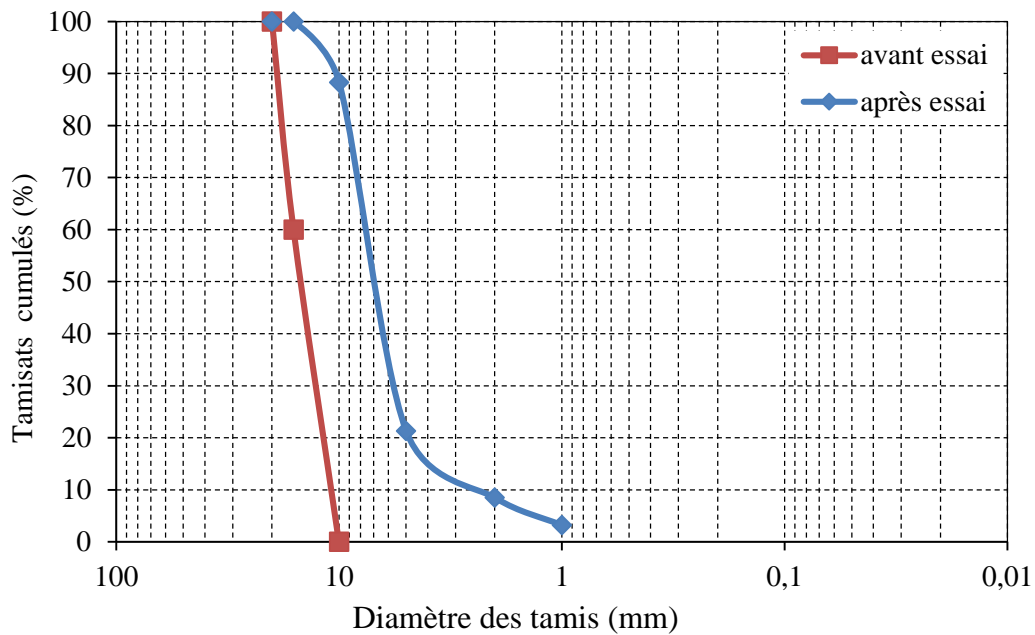


Figure V.6 : Courbes granulométriques avant et après essais des débris de béton.

L'application numérique a donné :

$$FR = \frac{D_{10} \text{ du matériau avant essai}}{D_{10} \text{ du matériau après essai}} = \frac{11}{2,5} = 4,4$$

$$FR = 4,4$$

Tableau V.7 : Classification des matériaux rocheux selon le coefficient FR.

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

D'une manière générale, les résultats obtenus à l'issue de l'essai de fragmentabilité montrent que les matériaux présentés peuvent être classés dans la catégorie des roches peu fragmentables avec des coefficients de fragmentabilité  $FR < 7$  (voir tableau V.6).

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

### V.6. Conclusion

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 sont très intéressants et encourageant ; ils

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.

## Conclusions et perspectives

Le recyclage des déchets, en particulier des déchets inertes, offre de nombreux avantages significatifs pour l'environnement et le développement durable. Tout d'abord, il permet la valorisation des déchets qui autrement pourraient polluer notre environnement, en les réutilisant de manière productive. Cela réduit également la nécessité d'extraire de nouvelles ressources naturelles, préservant ainsi ces précieuses ressources pour les générations futures.

En ce qui concerne les déchets de construction et les agrégats, le recyclage contribue à libérer les espaces occupés par les décharges sauvages et les sites d'enfouissement. Cela aide à réduire la pression sur l'utilisation des terres et à prévenir la pollution des sols et des eaux souterraines. De plus, en diversifiant les sources de granulats et d'autres matériaux recyclés, le recyclage aide à combler les insuffisances en matériaux dans certaines régions, où l'approvisionnement en ressources naturelles peut être limité.

Les débris de béton et de verre, comme toutes les matières recyclables souffrent d'une compétition inéquitable avec les matières premières qui menacent leur recyclage. Afin d'assurer la transition vers l'économie circulaire, il devient urgent de mettre en place des mesures incitatives pour accélérer le remplacement de matières premières par des matières recyclées, pour ce faire il faut prendre en considération l'aspect économique, environnemental et le raccourcissement du cycle de recyclage.

Dans cette étude nous avons proposé un processus de recyclage (des débris de béton et de verre) propre, économique, facilement réalisable, ne nécessitant pas une grande technologie, avec un cycle de recyclage court et surtout fiable d'après les résultats des essais réalisés au laboratoire. Ce travail consiste en l'incorporation de ces débris dans les corps de chaussées (couches de fondations et couches de base).

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons reconstitués en mélange à base des matériaux cités permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les mélanges étudiés présentent des densités sèches élevées pour l'ajout de 15% de verre (2), et le remplacement des fractions sableuses par celles du verre (2,07) par rapport aux débris de béton seuls (1,98), donc elles sont satisfaisantes (supérieures à 1.8) au regard des seuils fixés par les normes pour les matériaux routiers.

- L'ajout des débris de béton améliore nettement la portance des mélanges, même en présence d'eau après immersion. Ces résultats très intéressants dépassent les qualités attendues pour ces matériaux. De plus, les mélanges ne présentent pas de gonflements, ce qui est un signe de stabilité et donc une qualité précieuse pour un matériau routier.
- Stabilité à long terme : Des matériaux qui conservent une bonne résistance au poinçonnement après immersion sont plus susceptibles de maintenir leur performance structurelle et leur stabilité dans des environnements humides ou lorsque exposés à des cycles d'humidité et de sécheresse.
- Réduction des dommages : Une bonne résistance au poinçonnement signifie que les matériaux sont moins susceptibles de se déformer sous chargement, ce qui réduit les dommages potentiels causés par le trafic et les conditions climatiques variables.
- Durabilité améliorée : La capacité des matériaux à maintenir leur intégrité structurelle sous stress mécanique, même après exposition à l'humidité, est cruciale pour assurer leur durabilité à long terme et minimiser les coûts de maintenance.
- Par ailleurs, les essais de dégradabilité et fragmentabilité indiquent que les matériaux étudiés sont peu sensibles à la dégradation sous sollicitations hydriques.

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 et les essais à long terme sous l'effet d'agents climatiques agressifs (gel-dégel, ...).

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 (préservation des nappes d'eau alluvionnaires) et l'exploitation de nouvelles sources de granulats permettant d'assurer la continuité d'approvisionnement des projets, et par conséquent à économiser du temps et de l'argent.
- La préservation de l'environnement, par la récupération des débris de béton et de débris de verre (cause majeure des feux de forêt) abandonnés dans la nature. Par conséquent, la récupération des espaces occupés par ces matériaux inertes pour d'autres utilisations.

- 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. Ces derniers offrent un champ étendu de matériaux à recycler (béton, verre, plastique...) dont l'utilisation peut être élargie dans plusieurs domaines de génie civil et des travaux publics, ce qui ouvre de nouvelles perspectives d'emploi. D'autres possibilités d'utilisation de ces matériaux restent envisageables. Cela permettrait d'élargir la gamme des matériaux de construction, de réduire les déchets à la source et de promouvoir l'utilisation de matériaux recyclés dans les chantiers.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- A.N.D, (2015). (Agence Nationale des Déchets). Schéma Directeur de gestion des déchets ménagers et assimilés de la commune de Tizi-Ouzou.
- Ait Ali, G et Ould Amara, M (2020). Management des entreprises de recyclage Cas de l'entreprise : ALUVERPLAS , mémoire de master ; 2020.
- Aliabdo A.A, Abd-Elmoaty M.A et Hassan H.H (2014). "Utilization of crushed clay brick in concrete industry, Alexandria engineering Journal (Volume 53, Issue 1, March 2014, Pages151-168).
- Arquie et Morel, (1988). Le compactage / Edition paris Eyrolles.
- Aurélie Tournié, (2009). Analyse Raman sur site de verres et vitraux anciens : modélisation, procédure, lixiviation et caractérisation, thèse de doctorat, université pierre et marie curie Paris.
- Ayadi,A, (2004). Technologie du verre édition OPU.
- Beghin A, (2003). Etude de la rupture des bitumes à basse température : influences des facteurs de composition et de la rhéologie des liants. Thèse : Université Paris VI.
- Ilschner B et Christian Janot,C, (2001). Matériaux émergents, Éditeur: Lausanne Presses Polytechniques et Universitaires Romandes,
- Bodin D, Chabot A ; Pijaudier-Cabot G et Piau J.M, (2004). A continuum damage approach to asphalt concrete modelling. Journal of Engineering Mechanics (ASCE).
- Bouchard M, (1984). "Utilisation en technique routière de granulats provenant du concassage de béton de démolition". Bulletin liaison laboratoire Pont et Chaussée, n° 134, Réf 2852.
- Bray C, (2001). Dictionary of glass: materials and techniques Edition A & C Black [u.a.] London.
- CNERIB, (2002). Valorisation des déchets de construction " Rapport interne, Algérie.
- CNR 2007. Cercle National du Recyclage.
- Coquand R, (1978). Routes (Circulation – Tracé – Construction), livre II, Construction et Entretien, 6eme éditions, Eyrolles.
- Degoutte G, (2002). Petit barrage : recommandation pour la conception, la réalisation etsuivi.
- Doumi I, khazaz A , (2018). Mémoire de master ; Valorisation des déchets de verre dans le domaine de matériaux de construction, université de Bejaia.
- EL hadj M, (2016). Etude des propriétés mécaniques et durabilité du béton à base de sable de concassage, thèse de doctorat, Université Saad Dehleb Blida 1 .2016
- Faure M, (1998). Les Routes, cours de l'ENTPE, Tome II, édition Aléas.
- Pajean ,G (2007). L'élaboration du verre, un petit polycopié du verre.
- GTUMR (2003). Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France,  
<https://www.infociments.fr/>

- Barton,J, Guillemet,C , (2005). Le verre, science et technologie Éditeur : Les Ulis : EDP sciences.
- Baillon,J, Dorlot,J (2000). Des matériaux, Édition Presses internationales Polytechnique, Montréal.
- Canonne,J (2010), Emaux et glaçures céramiques, Édition Eyrolles, DL Paris.
- Haussonne,JM (2005). Céramiques et verres, Édition Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Jo Pérez, (2001). Matériaux non cristallins, Éditeur : presses polytechniques P321, 2001
- LCPC, (1998). Laboratoire centrale des ponts et chaussées. Catalogues des dégradations de surface des chaussées.
- Leflaive , E. et al., (1974). Le choix de modalité de compactage
- Loi n°1-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, journal officiel, n°77, article n°3.
- M. Falcy, (2002). Bore et ses composés, encyclopédie toxicologie professionnelle. Magazine, n° 109.
- Manuel d'Entretien Routier, publié par le Ministère des Transports du Québec (Canada)
- Chopinnet,M H (2010). La couleur du verre, en suivant Georges Bontemps, Journées organisées par l'USTV et le GDR Verres, Nancy.
- MDCS, (2002). Manuel dégradation des chaussées souples, Québec.
- Neji J, (2005). «LE PROJET ROUTIER » Centre de Publication 'Universitaire- Ingénieur ETP - Enseignant à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.
- Newton C et Logan J, (2007). Le soin de la céramique et du verre. Notes de l'ICC Edition: institut de conservation du Canada.
- NF EN 13-285 (2010). Norme française, Graves non traitées, Spécifications.
- NF P 18-572 (2011). Norme Française, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval).
- NF P 18-573 (2010). Norme Française, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles).
- NF P 94 – 050 (1995). Norme Française, Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage.
- NF P 94 – 054 (1991). Norme Française, reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des particules solides des sols. Méthode du pycnomètre à eau.
- NF P 94 – 064 (1993). Norme Française, Sols : reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique sèche d'un élément de roche. Méthode par pesée hydrostatique.
- NF P 94-053 (1991). Norme Française, Sols, reconnaissance et essais. Détermination de la masse volumique des sols fins au laboratoire. Méthode de la trousse coupante, du moule et de l'immersion dans l'eau.

NF P 94-066 (1992). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-067 (1992). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

NF P 94-078 (1997). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion-Indice CBRimmédiat - Indice portant immédiat. Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

NF P 94-093 (2014). Norme française, Sols, reconnaissance et essais. Détermination des références de compactage d'un matériau. Essai Proctor normal- Proctor modifié.

Nguyen T, (2008). «Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédéNOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée – Comportement mécanique et environnemental», Thèse Doct. Délivrer par Université Paul Sabatier. L'université de Toulouse. PP 67-68.

Pimienta P et Remond S, (1997). "Bétons de déchets : prévenir les risques", CSTB

Lemoigne,l, (2014). L'Économie circulaire, Dunod, Fonction de l'entreprise, Paris, Dunod, p.10.

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

S.P.E., 1997- Société pour la protection de l'environnement, les déchets dangereux, histoire, gestion, et prévention édition GEORG, dossier de l'environnement, paris 1997. 125p.

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

VAN OVERBEKE, E. (2010). RDC-Environnement identification des limitations techniques et environnementales du recyclage matière des déchets- Université catholique de Louvain.

Varlet, (1966). Barrages en terre et en enrochements, Volume 3. Usines Hydrauliques. Edition, Eyrolles.

WCA, (2009). World Construction Agrégats,

[www.univerre.fr](http://www.univerre.fr) matières premières pour la fabrication du verre sur site consulte 4/2018