

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

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



## Mémoire de Master

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

### Thème

*Etude du comportement d'un mélange de calcaire + (verre et plastique) pour une valorisation dans les travaux publics.*

Présenté par :

**M<sup>elle</sup> BOUAZIZ Sarah**

Devant le jury composé de :

Mme BELHASSANI.O

Maitre-assistante A à l'UMMTO

Présidente.

Mme MOBAREK. H

Maitre-assistante A à l'UMMTO

Examinatrice.

Mr BOU DLAL. O

Maitre de conférences A à l'UMMTO

Promoteur.

**Promotion : 2020 / 2021**

## *REMERCIEMENTS*

*Toute ma gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à DIEU le tout puissant qui m'a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail dans les meilleures conditions.*

*J'adresse mes sincères remerciements et j'exprime ma profonde gratitude à mon promoteur Mr BOUDLAL Omar, Maître de conférences A à l'UMMTO, pour ses conseils judicieux, pour ses qualités scientifiques et humaines, pour la disponibilité dont il a toujours fait preuve à mon égard, et pour m'avoir fait profiter de son expérience dans le domaine.*

*Mes vifs remerciements s'étendent également à Melle BELHASSANI présidente du jury et Mme MOBAREK examinatrice, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes recherches en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Je tiens à remercier les responsables du laboratoire MDS de l'UMMTO, Mme BOUAZZOUNI Fatima et Mr KHELIFA Sid Ali, pour leurs soutiens, disponibilité surtout leur confiance.*

*Je remercie également toutes les personnes qui ont de près ou de loin contribué à la réussite de ce mémoire.*

*Enfin je tiens à exprimer toute ma gratitude à toute ma famille, en particulier ma chère et tendre mère pour sa patience et de m'avoir soutenue pendant tout mon parcours d'étude, et aussi mon cher époux pour sa patience et compréhension également, ses encouragements et son soutien.*



## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail.*

- \* *A mon père.*
- \* *A ma chère mère, Qui m'a toujours soutenue.*
- \* *A mon cher époux.*
- \* *A mes frères et ma sœur.*
- \* *A tous ceux qui me sont chers.*



# Sommaire

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Liste des principales notations et indices**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**INTRODUCTION GENERALE ..... 1**

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ROUTES ET LES CHAUSSEES..3**

I.1 Introduction..... 3

I.2 La route à travers l’histoire en Algérie ..... 3

I.2.1 Période avant la colonisation française ..... 3

I.2.2 Période après la colonisation française ..... 4

I.2.3 Périodes Post indépendance ..... 4

I.2.4 Période de 1999- 2016..... 4

I.3 Définition de la chaussée ..... 5

I.4 La terminologie d’une chaussée..... 5

I.5 Constitution d’une structure de chaussée et leur fonctionnement ..... 6

I.5.1 La plateforme ..... 6

I.5.2 La couche d’assise..... 6

I.5.3 La couche de surface ..... 7

I.6 Différents types de structures de chaussée..... 8

I.6.1 Chaussées souples ..... 8

I.6.2 Chaussées bitumineuses épaisses ..... 8

I.6.3 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques ..... 8

---

I.6.4 Chaussées à structure mixte .....	9
I.6.5 Chaussées à structure inverse.....	9
I.6.6 Chaussées en béton de ciment .....	10
I.7 Principes généraux de construction d'une route .....	11
I.7.1 Influences naturelles.....	11
I.7.2 Influences techniques et économiques.....	11
I.7.3 Sécurité d'exploitation et confort.....	11
I.8 Les matériaux routiers.....	12
I.8.1 Les matériaux traités aux liants .....	12
I.8.1.1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques.....	12
I.8.1.2 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés.....	13
I.8.2 Les matériaux non traités .....	15
I.8.3 Les matériaux de finition (utilisés en couche de surface) .....	16
I.9 Les dégradations des chaussées .....	17
I.9.1 Paramètres influençant l'apparition et l'évolution des dégradations .....	17
I.9.2 Type de dégradation .....	18
I.9.2.1 Les déformations.....	18
I.9.2.2 Les fissures .....	20
I.9.2.3 Les arrachements et les remontées.....	23
I.10 Conclusion .....	25
<b>CHAPITRE II : GENERALITE SUR LES MATERIAUX UTILISES ET LE RECYCLAGE DES DECHETS .....</b>	<b>26</b>
II.1 introduction .....	26
II.2 Le calcaire .....	26
II.2.1 Définition .....	26
II.2.2 La formation du calcaire .....	26

II.2.3 La classification du calcaire.....	27
II.2.4 Les différentes transformations du calcaire .....	28
II.2.5 Utilité du calcaire .....	30
II.2.6 Les caractéristiques physiques et les aptitudes mécaniques des calcaires.....	30
II.2.6.1 Les caractéristiques physique .....	30
II.2.6.2 Les aptitudes mécaniques .....	31
II.3 Le verre.....	31
II.3.1 Définition.....	31
II.3.2 Composition et fabrication du verre .....	31
II.3.3 Les différents types de produits verriers .....	34
II.3.4 La durabilité du verre.....	35
II.4 Le plastique.....	36
II.4.1 Définition .....	36
II.4.2 Les types de plastique .....	37
II.4.2.1 Les thermoplastiques .....	37
II.4.2.2 Les thermodurcissables .....	37
II.4.2.3 Les élastomères .....	38
II.4.3 Les propriétés des plastiques .....	38
II.5 Le recyclage.....	39
II.5.1 Définition .....	39
II.5.2 Les principes de gestion des déchets .....	39
II.5.3 Origine de la production des déchets .....	39
II.5.4 Procédés du recyclage.....	40
II.5.5 Les différentes filières du recyclage .....	40
II.6 Le recyclage du plastique .....	42
II.6.1 Les étapes de recyclage du plastique .....	43

---

II.6.2 Le recyclage des plastiques dans les mélanges bitumineux.....	44
II.6.3 Les déchets plastique dans l'enrobé.....	44
II.6.4 Production de bitume modifié avec des déchets plastiques recyclés.....	45
II.7 Le recyclage de verre.....	45
II.7.1 Le cycle de recyclage du verre.....	45
II.7.2 Utilisation des débris de verre dans le ciment Portland.....	46
II.7.3 Utilisation des débris de verre dans les enrobés bitumineux.....	47
II.7.4 Utilisation des débris de verre dans la structure des chaussées.....	48
II.8 Le recyclage de verre en Algérie.....	48
II.9 Conclusion.....	49
<b>CHAPITRE III : ESSAIS D'IDENTIFICATION.....</b>	<b>50</b>
III.1 Introduction.....	50
III.2 Matériaux utilisés.....	50
III.2.1 Matériaux industriels (plastique et verre).....	50
III.2.2 Matériau naturel (calcaire).....	53
III.3 Essais d'identification.....	54
III.3.1 La teneur en eau naturelle.....	54
III.3.2 La masse volumique des sols.....	55
III.3.2.1 La masse volumique sèche $\rho_a$ par pesée hydrostatique.....	55
III.3.2.2 Masse volumique humide $\rho_h$ .....	56
III.3.2.3 Masse volumique des grains solides des sols $\rho_s$ par la méthode du pycnomètre.....	56
III.3.3 L'indice des vides et la porosité.....	58
III.3.3.1 L'indice des vides.....	58
III.3.3.2 La porosité.....	58
III.3.4 Le degré de saturation.....	58

---

III.3.5 Limite d'Atterberg.....	59
III.3.5.1 Généralité .....	59
III.3.5.2 La détermination des limites d'Atterberg .....	60
III.3.6 Valeur de bleu de méthylène VBS .....	62
III.4 Préparation des mélanges de calcaire et de déchets plastiques et verre.....	64
III.5 Conclusion .....	65
<b>CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX</b>	
<b>ETUDIÉS.....</b>	<b>66</b>
IV.1 Introduction.....	66
IV.2 Définition du compactage .....	66
IV.3 Objectif du compactage .....	66
IV.4 Facteurs susceptibles d'améliorer le compactage .....	67
IV.4.1 Influence de la teneur en eau et du poids volumique .....	67
IV.4.2 Influence de l'énergie de compactage .....	68
IV.4.3 Influence de la nature du sol.....	69
IV.5 Matériaux et méthodes de compactage .....	69
IV.5.1 Compactage statique.....	70
IV.5.2 Compactage dynamique .....	70
IV.6 L'essai Proctor .....	70
IV.6.1 Définition et but de l'essai Proctor.....	70
IV.6.2 Principe de l'essai Proctor .....	70
IV.7 L'essai Proctor modifié.....	72
IV.7.1 but de l'essai.....	72
IV.7.2 Principe de l'essai.....	72
IV.7.3 Matériels utilisés.....	72
IV.7.4 Exécution des essais réalisés .....	73

---

IV.7.5 Présentation des résultats.....	74
IV.7.6 Interprétation des résultats.....	76
IV.8 Essai de portance Californien (California Bearing Ratio) (CBR).....	79
IV.8.1 Définition et but de l'essai.....	79
IV.8.2 Principe de l'essai.....	79
IV.8.3 Matériels utilisés.....	80
IV.8.4 Exécution des essais réalisés .....	81
IV.8.5 Expression des résultats.....	82
IV.8.6 Interprétation des résultats.....	84
IV.9 Conclusion .....	88
<b>CHAPITRE V : ESSAIS ROUTIERS.....</b>	<b>89</b>
V.1 Introduction .....	89
V.2 Essai Micro Deval .....	89
V.2.1 Définition et but de l'essai .....	89
V.2.2 Principe de l'essai .....	90
V.2.3 Exécution de l'essai .....	90
V.2.4 Présentation des résultats.....	91
V.2.5 Interprétation des résultats.....	93
V.3 Essai Los Angeles .....	93
V.3.1 Définition et but de l'essai.....	93
V.3.2 Principe de l'essai.....	94
V.3.3 Exécution de l'essai .....	94
V.3.4 Présentation des résultats.....	95
V.3.5 Interprétation des résultats.....	96
V.4 Essai de fragmentabilité .....	97
V.4.1 définition et but de l'essai.....	97

---

V.4.2 Principe de l'essai .....	97
V.4.3 Exécution de l'essai .....	97
V.4.4 Présentation des résultats .....	98
V.4.5 Interprétation des résultats .....	100
V.5 Essai de dégradabilité .....	100
V.5.1 Définition et but de l'essai .....	100
V.5.2 Principe de l'essai .....	101
V.5.3 Exécution de l'essai .....	101
V.5.4 Présentation des résultats .....	102
V.5.5 Interprétation des résultats .....	104
V.6 Conclusion .....	104
<b>CHAPITRE VI : RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX</b>	
<b>ETUDIÉS.....</b>	<b>106</b>
VI.1 Introduction .....	106
VI.2 Le concept de cisaillement .....	106
VI.3 Critère de rupture de Mohr-Coulomb .....	107
VI.4 paramètres de la résistance au cisaillement.....	107
VI.4.1 La courbe contrainte-déformation .....	107
VI.4.2 La courbe de variation du volume .....	108
VI.4.3 La courbe intrinsèque .....	108
VI.5 Quelques définitions importantes.....	109
VI.6 Méthodes de détermination de la résistance au cisaillement des sols.....	110
VI.6.1 méthode d'essai in situ .....	110
VI.6.2 Méthode d'essai au laboratoire.....	110
VI.6.2.1 L'essai triaxial.....	111

VI.6.2.2 L'essai de cisaillement à la boîte .....	112
VI.7 La différence entre l'essai de cisaillement à la boîte et l'essai triaxial.....	113
VI.8 Exécution de l'essai .....	113
VI.9 Présentation et interprétation des résultats .....	114
VI.9.1 Courbes contraintes-déformation .....	115
VI.9.2 Courbes de variation de volume .....	117
VI.9.3 Les courbes intrinsèques .....	119
VI.10 Conclusion .....	120
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>121</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	

## **Liste des principales notations et indices**

C : cohésion drainée ;  
CBR<sub>imm</sub> : l'indice CBR après immersion ;  
DG : coefficient de dégradabilité.  
e : l'indice des vides ;  
FR : coefficient de fragmentabilité ;  
G : Gonflement linière relatif ;  
H : hauteur initiale de l'éprouvette ;  
I<sub>p</sub> : Indice de plasticité ;  
IPI : l'indice Portant immédiat ;  
L : longueur de la boîte de cisaillement ;  
LA : Coefficient Los Angeles ;  
M : Masse totale ;  
M<sub>b</sub> : Masse au bleu de méthylène ;  
MDE : Coefficient Micro Deval.  
M<sub>h</sub> : Masse humide ;  
M<sub>s</sub> : Masse des grains solides ;  
n : La porosité ;  
S<sub>c</sub> : la section corrigée ;  
S<sub>r</sub> : Le degré de saturation ;  
T : la force de cisaillement ;  
V<sub>a</sub> : Volume de l'aire ;  
VBS : Valeur au bleu de méthylène ;  
V<sub>s</sub> : Volume des particules solides ;  
V<sub>t</sub> : Volume total ;  
V<sub>v</sub> : Volume des vides ;  
V<sub>w</sub> : Volume de l'eau ;  
W : Teneur en eau naturelle ;  
W<sub>opm</sub> : Teneur en eau de l'optimum ;  
 $\Delta h$  : la variation de hauteur mesurée ;  
 $\Delta L$  : déplacement horizontale ;  
 $\Delta V$  : variation volumique ;

$\epsilon_h$  : la déformation horizontale ;

$\epsilon_v$  : La variation de volume en pourcentage (%) ;

$\rho_d$  : La masse volumique sèche ;

$\rho_h$  : La masse volumique humide ;

$\rho_s$  : La masse volumique des particules solides ;

$\rho_w$  : masse volumique de l'eau ;

$\sigma$  : la contrainte normale appliquée.

$\tau$  : La contrainte tangentielle ;

$\varphi$  : angle de frottement interne des grains.

## Liste des Tableaux

### Chapitre II : GENERALITE SUR LES MATERIAUX UTILISES ET LE RECYCLAGE DES DECHETS

<b>Tableau II.1</b> : pression nécessaire pour provoquer la rupture par compression de quelques roches .....	31
<b>Tableau II.2</b> : Composition du verre silico-sodo-calcique .....	33
<b>Tableau II.3</b> : Propriétés du verre silico-sodo-calcique.....	33
<b>Tableau II.4</b> : Les différents produits verriers .....	35
<b>Tableau II.5</b> : Composition chimique des débris de verre utilisés dans le ciment Portland.....	47

### CHAPITRE III: ESSAIS D'IDENTIFICATION

<b>Tableau III.1</b> : Récapitulatif de la composition et utilisation des différents types de plastiques .....	51
<b>Tableau III.2</b> : Caractéristiques physiques et mécaniques des polymères utilisés .....	52
<b>Tableau III.3</b> : Teneur en eau de matériau étudiée .....	54
<b>Tableau III.4</b> : Résultats de la détermination de la masse volumique sèche .....	56
<b>Tableau III.5</b> : Les résultats de la masse volumique des particules solides .....	57
<b>Tableau III.6</b> : Interprétations des degrés de saturations établies par .....	59
<b>Tableau III.7</b> : Les seuils d'argilosité selon $I_p$ retenu par le GTR 1992 .....	61
<b>Tableau III.8</b> : Classe de sol en fonction du VBS .....	63
<b>Tableau III.9</b> : Récapitulatif des résultats de l'essai VBS .....	64

### CHAPITRE IV: COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

<b>Tableau IV.1</b> : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié.....	71
<b>Tableau IV.2</b> : Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire seul .....	74

<b>Tableau IV.3</b> : Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 5% de (déchets plastiques + débris de verre).....	74
<b>Tableau IV.4</b> : Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 7% de (déchets plastiques + débris de verre).....	75
<b>Tableau IV.5</b> : Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 10% de (déchets plastiques + débris de verre).....	76
<b>Tableau IV.6</b> : Evolution des teneurs en eau et des masses volumiques sèches pour les différents mélanges .....	77
<b>Tableau IV.7</b> : Résultats d'essai CBR pour le calcaire seul .....	83
<b>Tableau IV.8</b> : Résultats d'essai CBR pour le calcaire + 7% (déchet plastique et débris de verre) .....	84
<b>Tableau IV.9</b> : Classe de portance aux essais CBR .....	87

## **CHAPITRE V : ESSAIS ROUTIERS**

<b>Tableau V.1</b> : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire .....	90
<b>Tableau V.2</b> : Calcul de coefficient Micro-Deval de calcaire seul .....	91
<b>Tableau V.3</b> : Calcul de coefficient Micro-Deval de calcaire+7%(déchet plastique+débris de verre) .....	92
<b>Tableau V.4</b> : Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval.....	92
<b>Tableau V.5</b> : Charge de boulets suivant le type de classe granulaire .....	94
<b>Tableau V.6</b> : Calcul de coefficient Los Angeles de calcaire seul.....	95
<b>Tableau V.7</b> : Calcul de coefficient Los Angeles de calcaire+7%(déchet plastique+débris de verre) .....	96
<b>Tableau V.8</b> : Valeurs de références .....	98
<b>Tableau V.9</b> : Valeurs de références .....	102

## **CHAPITRE VI : RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX ETUDIÉS**

<b>Tableau VI.1</b> : Les paramètres intrinsèques des mélanges étudiés.....	120
-----------------------------------------------------------------------------	-----

## Liste des Figures

### CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES ET LES ROUTE

<b>Figure I.1</b> : Evolution de la consistance du réseau routier de 1999-2016.....	5
<b>Figure I.2</b> : Profil en travers type d'une route.....	5
<b>Figure I.3</b> : Cas d'une chaussée à 2 ou 3 voies .....	6
<b>Figure I.4</b> : Constitution d'une chaussée.....	7
<b>Figure I.5</b> : Les couches d'une chaussée souple. ....	8
<b>Figure I.6</b> : Les couches d'une chaussée bitumineuses épaisses .....	8
<b>Figure I.7</b> : Les couches d'une chaussée semi rigide.....	9
<b>Figure I.8</b> : Les couches d'une chaussée mixte.....	9
<b>Figure I.9</b> : Les couches d'une chaussée à structure inverse .....	10
<b>Figure I.10</b> : Les couches d'une chaussée en béton de ciment .....	10
<b>Figure I.11</b> : graveleux latéritique.....	13
<b>Figure I.12</b> : banco-coquillage .....	13
<b>Figure I.13</b> : Schéma de distillation du goudron brut et pétrole brut .....	13
<b>Figure I.14</b> : Terminologie en matière de liants hydrocarbonés .....	14
<b>Figure I.15</b> : Grave-bitume .....	14
<b>Figure I.16</b> : Sables-bitume.....	14
<b>Figure I.17</b> : Graves-émulsion .....	15
<b>Figure I.18</b> : Grave 0/10 ; 0/31.5.....	15
<b>Figure I.19</b> : Grave 0/80.....	15
<b>Figure I.20</b> : Gravier 4/6 ; 6/10 ; 10/14.....	15
<b>Figure I.21</b> : Gravier 20/31.5 drainant .....	15
<b>Figure I.22</b> : la mise en œuvre d'enduit superficiel .....	16
<b>Figure I.23</b> : Formulation d'enrobé.....	16

<b>Figure I.24</b> : Le BBSG et BBDr.....	17
<b>Figure I.25</b> : Les orniérages .....	19
<b>Figure I.26</b> : Les affaissements .....	19
<b>Figure I.27</b> : Tôle ondulée.....	20
<b>Figure I.28</b> : Fissures longitudinales .....	20
<b>Figure I.29</b> : Fissures transversales .....	21
<b>Figure I.30</b> : Fissures de rives .....	21
<b>Figure I.31</b> : Fissures en carrelage .....	22
<b>Figure I.32</b> : fissures de gel.....	22
<b>Figure I.33</b> : Nid-de-poule .....	23
<b>Figure I.34</b> : Pelade .....	24
<b>Figure I.35</b> : Ressuage.....	24
<b>Figure I.36</b> : Le ravinement .....	25

## **CHAPITRE II : GENERALITE SUR LES MATERIAUX UTILISES ET LE RECYCLAGE DES DECHETS**

<b>Figure II.1</b> : Cycle du carbone .....	27
<b>Figure II.2</b> : Le marbre.....	29
<b>Figure II.3</b> : La marne.....	29
<b>Figure II.4</b> :L'ophicalcite.....	29
<b>Figure II.5</b> : La chaux vive.....	29
<b>Figure II.6</b> : Les principales figures du karst.....	29
<b>Figure II.7</b> : Le composant de base du verre .....	32
<b>Figure II.8</b> : Fusion de la silice mélangée au fondant : 1400°C .....	32
<b>Figure II.9</b> : Exemple des verres de base .....	34
<b>Figure II.10</b> : Exemple des verres de base spéciaux .....	34
<b>Figure II.11</b> : Exemple des verres transformés .....	35

<b>Figure II.12</b> : Exemple des thermoplastiques.....	37
<b>Figure II.13</b> : Exemple des thermodurcissables.....	38
<b>Figure II.14</b> : Exemple des élastomères.....	38
<b>Figure II.15</b> : Les différentes filières du recyclage.....	42
<b>Figure II.16</b> : Schéma du processus standard de régénération.....	43
<b>Figure II.17</b> : Cycle du recyclage du verre.....	46

### **CHAPITRE III : ESSAIS D'IDENTIFICATION**

<b>Figure III.1</b> : Situation géographique de l'EURL ALUVERPLAS.....	51
<b>Figure III.2</b> : Les déchets plastiques et les débris de verre concassé.....	53
<b>Figure III.3</b> : Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme.....	53
<b>Figure III.4</b> : Matériau calcaire après concassage et tamisage.....	54
<b>Figure III.5</b> : Etape de la pesée hydrostatique.....	55
<b>Figure III.6</b> : mode opératoire de l'essai au pycnomètre.....	57
<b>Figure III.7</b> : Détermination de la limite de liquidité $W_L$ .....	60
<b>Figure III.8</b> : Détermination de la limite de liquidité $W_p$ .....	61
<b>Figure III.9</b> : Diagramme de Casagrande.....	62
<b>Figure III.10</b> : Mise en suspension des particules dans l'eau distillée, ajout du bleu de méthylène et prise de la tâche.....	63

### **CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX**

#### **ETUDIES**

<b>Figure IV.1</b> : Objectifs de compactage des sols.....	67
<b>Figure IV.2</b> : allure d'une courbe de compactage.....	68
<b>Figure IV.3</b> : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor.....	68
<b>Figure IV.4</b> : Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor.....	69
<b>Figure IV.5</b> : Matériels utilisés pour l'essai Proctor.....	72
<b>Figure IV.6</b> : Exécution de l'essai Proctor.....	73

<b>Figure IV.7 :</b> Courbe Proctor du calcaire seul .....	74
<b>Figure IV.8 :</b> Courbe Proctor du calcaire + 5% de (déchets plastiques + débris de verre).....	75
<b>Figure IV.9 :</b> Courbe Proctor du calcaire + 7% de (déchets plastiques + débris de verre).....	75
<b>Figure IV.10 :</b> Courbe Proctor du calcaire + 10% de (déchets plastiques + débris de verre)...	76
<b>Figure IV.11 :</b> Courbe comparative des essais Proctor modifié .....	76
<b>Figure IV.12 :</b> Evolution de la teneur en eau des différents mélanges .....	77
<b>Figure IV.13 :</b> Evolution de la densité sèche des différents mélanges .....	78
<b>Figure IV.14 :</b> Matériels utilisés pour l'essai CBR.....	81
<b>Figure IV.15 :</b> Exécution de l'essai CBR avant immersion.....	81
<b>Figure IV.16 :</b> Exécution de l'essai CBR après immersion .....	82
<b>Figure IV.17 :</b> Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immédiat .....	82
<b>Figure IV.18 :</b> Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR après immersion.....	83
<b>Figure IV.19 :</b> Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immédiat .....	83
<b>Figure IV.20 :</b> Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR après immersion.....	84
<b>Figure IV.21 :</b> Courbe enfoncement-forces de l'essai CBR immédiat .....	84
<b>Figure IV.22 :</b> Evolution des indices CBR immédiat en fonction de la teneur en (Plastiques+verre).....	85
<b>Figure IV.23 :</b> Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR après immersion.....	85
<b>Figure IV.24 :</b> Evolution des indices CBR après immersion en fonction de la teneur en (plastiques+verre).....	86
<b>Figure IV.25 :</b> courbes comparative des indices CBR immédiat et après immersion des différents échantillons .....	86
<b>Figure IV.26 :</b> Evolution des indices CBR immédiat et après immersion des différents échantillons.....	87

## **CHAPITRE V : ESSAIS ROUTIERS**

<b>Figure V.1 :</b> Machine d'essai Micro-Deval.....	89
<b>Figure V.2 :</b> Mode opératoire d'essai micro Deval.....	91

<b>Figure V.3</b> : Evolution du coefficient MDE des différents échantillons.....	92
<b>Figure V.4</b> : Machine d'essai Los Angeles .....	93
<b>Figure V.5</b> : Mode opératoire d'essai Los Angeles.....	95
<b>Figure V.6</b> : Evolution de coefficient LA des différents mélanges.....	96
<b>Figure V.7</b> : l'essai de fragmentabilité .....	97
<b>Figure V.8</b> : Les essais de fragmentabilité réalisés .....	98
<b>Figure V.9</b> : Courbes granulométriques du calcaire seul .....	99
<b>Figure V.10</b> : Courbes granulométriques du calcaire+7%(déchet plastique+débris de verre) .	99
<b>Figure V.11</b> : Evolution de coefficient FR des différents mélanges .....	100
<b>Figure V.12</b> : l'essai de dégradabilité .....	101
<b>Figure V.13</b> : Les essais de dégradabilité réalisés.....	102
<b>Figure V.14</b> : Courbes granulométriques du calcaire seul .....	108
<b>Figure V.15</b> : Courbes granulométriques du calcaire+7%(déchet plastique+débris de verre)	103
<b>Figure V.16</b> : Evolution de coefficient DG des différents mélanges .....	104
<b>CHAPITRE VI : RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX</b>	
<b>ETUDIÉS</b>	
<b>Figure VI.1</b> : Zone de cisaillement de roches .....	106
<b>Figure VI.2</b> : Exemple de dégradation par cisaillement d'une chaussée (zone de freinage-accélération). .....	107
<b>Figure VI.3</b> : Courbes de contraintes-déformations.....	108
<b>Figure VI.4</b> : courbe de variation de volume .....	108
<b>Figure VI.5</b> : courbe intrinsèque d'un sol .....	109
<b>Figure VI.6</b> : Appareil triaxial .....	111
<b>Figure VI.7</b> : Appareillages de l'essai de cisaillement à la boîte .....	113
<b>Figure VI.8</b> : Mode opératoire de l'essai de cisaillement à la boîte .....	114
<b>Figure VI.9</b> : Courbes contraintes-déformations du calcaire seul.....	115

<b>Figure VI.10 :</b> Courbes contraintes-déformations du calcaire + 7% de (plastiques+verre).....	115
<b>Figure VI.11:</b> Courbes comparative contraintes-déformations a (1, 2,3 bar) respectivement .	116
<b>Figure VI.12 :</b> Courbes de variation du volume du calcaire seul.....	117
<b>Figure VI.13 :</b> Courbes de variation du volume du calcaire + 7% de (plastiques + verres)....	117
<b>Figure VI.14 :</b> Courbes comparative de variation de volume a (1, 2,3 bar) respectivement ...	118
<b>Figure VI.15 :</b> Droite intrinsèque du calcaire seul.....	119
<b>Figure VI.16 :</b> Droite intrinsèque du calcaire + 7% de (déchets plastiques+débris de verre) .	119

## **INTRODUCTION GENERALE**

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources naturelles, nécessite d'établir de nouvelles lois et d'adapter de nouveaux concepts. Ainsi, la valorisation des matériaux naturels et le recyclage des déchets s'avèrent efficaces face aux contraintes économiques et écologiques de ces dernières années.

L'Algérie est un pays en développement, ce qui augmente le taux de déchets générés par les acteurs économiques. La prise en charge des déchets est parmi les priorités inscrites par les pouvoirs publics, d'autant plus que les déchets peuvent être introduits directement dans plusieurs domaines, notamment le secteur de la construction. En effet, ce domaine, s'intéresse de plus en plus à la valorisation des déchets, vu l'importance économique, environnementale et technique que certains déchets inertes (plastique, verre, produits céramiques.....etc.) peuvent apporter au secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP). Bien entendu, des mesures doivent être prises en compte en amont, entre autres ; l'étude des propriétés des déchets, afin de bien cerner leurs utilisations. D'ailleurs, les recherches récentes s'intéressent de plus en plus au développement de nouveaux matériaux et composites naturels et industriels de meilleures caractéristiques, pour étendre leurs utilisations dans plusieurs domaines, particulièrement, le domaine du BTP.

Cette étude rentre dans cette perspective ; elle consiste à étudier le comportement d'un matériau composé d'un mélange de granulats de calcaire, de déchets plastiques et de débris de verre pour une utilisation dans la construction routière.

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

- \* Le chapitre I, présente des généralités sur les chaussées et les matériaux routiers. Il comporte principalement, les définitions des différentes couches constituant une chaussée, les différents types de chaussées, les dégradations, la définition des granulats et les types employés en constructions routières... ;
- \* Le chapitre II, c'est l'état de l'art sur les matériaux utilisés (calcaire, plastique et verre), ainsi que le recyclage des déchets ;
- \* Le chapitre III, entame la partie expérimentale de ce travail. Il est consacré aux différents essais d'identification des matériaux utilisés.
- \* Dans le chapitre IV, est présentée la première série d'essais mécaniques réalisés au laboratoire. En l'occurrence, les essais de compactage au Proctor modifié et les essais

de portance CBR avant et après immersion. Sont présentés ainsi, les différents modes opératoires, les résultats d'essais et les différentes comparaisons effectuées sous forme de tableaux et de courbes avec les interprétations correspondantes.

\* Le chapitre V, porte sur d'autres essais routiers, à savoir l'essai Los Angeles, l'essai Micro Deval, l'essai de dégradabilité et l'essai de fragmentabilité. Il présente ainsi les différents résultats obtenus et les interprétations correspondantes.

\* Le chapitre VI est consacré aux essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Ces essais permettent de traduire le comportement des matériaux étudiés du point de vue résistance au cisaillement et variation de volume. Ils permettent de déduire les caractéristiques mécaniques en cisaillement, à savoir l'angle de frottement interne et la cohésion. Sont ainsi présentés, le but et le principe de l'essai, l'appareillage, le mode opératoire, et enfin, les principaux résultats obtenus et les interprétations correspondantes.

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

# CHAPITRE I

## GENERALITES SUR LES ROUTES ET LES CHAUSSEES

### I.1 Introduction

Le domaine des routes constitue une partie très importante du patrimoine national d'un pays. Il est alors un facteur très important de développement économique et social ; entre les villes, les provinces, les pays et les civilisations.

Le mot route vient du mot latin « viarupta » qui signifie « voie frayée » c'est donc une voie de communication terrestre permettant de relier un point à un autre, un village à un autre, etc..... La route moderne est définie, comme étant « un espace correctement aménagé pour recevoir un ou plusieurs courants de circulation construite dans le respect des règles d'art ».

### I.2 La route à travers l'histoire en Algérie

En se référant à (Rabah, 2017), nous avons résumé la route à travers l'histoire en Algérie dans les points suivant :

#### I.2.1 Période avant la colonisation française

L'Algérie de par sa position géographique a toujours été une terre de convoitises ; et de ce fait a connu de multiples invasions et occupations :

- Les puniques
- Les Carthaginois
- Les romains : s'étaient illustrés plus dans les constructions des voies que des ports, se contentant pour ces derniers de consolider, agrandir et moderniser ceux, nombreux d'ailleurs existant depuis les époques puniques et carthaginoises, pour les adapter à leurs besoins de transport tant des groupes que des marchandises.
- Les Byzantins : se contentèrent d'exploiter l'héritage que leurs avaient laissé les romains, qui commençaient à se dégrader faute d'entretiens. Mais Ces routes furent abandonnées, laissant la place aux pistes permettant des changements d'itinéraires au gré de la fatigue et de la facilité des déplacements.
- La Période turque : cette période n'a pas connu de grandes réalisations en matière d'extension de routes.

### **I.2.2 Période après la colonisation française**

A partir de 1847, l'autorité militaire se préoccupa de développer largement le réseau routier afin, tout en assurant le ravitaillement des premiers colons de permettre aux troupes de se porter rapidement sur les points menacés par une résistance qui ne désarmait pas.

En 1948 le réseau routier en Algérie comptait environ 60 050 Km réparti :

- 8016 Km de Routes Nationales ;
- 7500 Km de Pistes sahariennes ;
- 13835 Km de Chemins Départementaux à l'état d'entretien ;
- 13200 Km de Chemins Vicinaux à l'état d'entretien ;
- 17500 Km de chemins Ruraux à l'état d'entretien ;

Dès 1850, une étape substantielle était déjà réalisée. On disposait, en effet de :

- 450 Km de routes empierrées ou entretenues ;
- 450 Km de routes ouvertes en terrassement ;
- 1650 Km de routes aménagées au moyen de simples travaux de campagnes ;
- En outre, 2250 Km étaient à l'étude.

La colonisation française, en dépit de sa monstruosité, avait permis le développement des routes, des pistes sahariennes, des ports et des aérodromes.

### **I.2.3 Périodes Post indépendance**

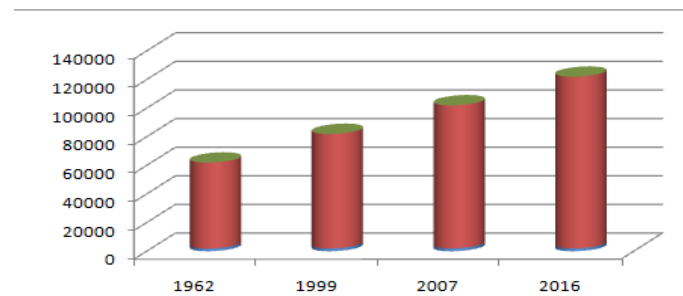
Entre 1962 et 1999, le réseau routier a progressé en linéaire de plus de 37000 km, soit une progression de plus de 55% sur une période de 37 ans par rapport à l'année 1962. L'extension de ce réseau s'est poursuivie au-delà de 1999.

### **I.2.4 Période de 1999- 2016**

Le réseau routier a connu depuis 1999 une nouvelle dynamique suite à l'évolution des budgets alloués à travers les différents programmes.

En 1999, l'Algérie disposait d'un patrimoine infrastructurel composé de 104000 Km de routes dont :

- 73000Km revêtues ;
- 49Km autoroute Est Ouest ;
- 3900 Ouvrages d'art.

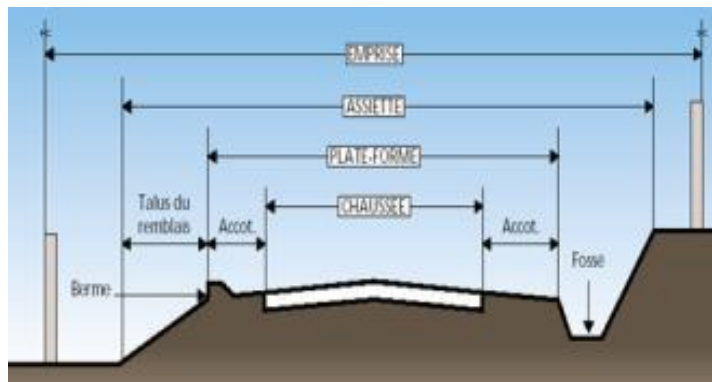


**Figure I.1 :** Evolution de la consistance du réseau routier de 1999-2016.

### I.3 Définition de la chaussée

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches mises en œuvre sur un ensemble appelé plateforme support de chaussée. Constituée du sol terrassé dit sol support, surmonté généralement d'une couche de forme, elle est défini comme étant une surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules. Elle est constituée d'une ou plusieurs voies de circulation.

### I.4 La terminologie d'une chaussée



**Figure I.2 :** Profil en travers type d'une route (Visa, 2009).

- \* L'emprise : partie du terrain qui appartient à la collectivité et affectée à la route ainsi qu'à ses dépendances ;
- \* L'assiette : surface du terrain réellement occupée par la route ;
- \* Plate-forme : surface de la route qui comprend la chaussée et les accotements ;
- \* Chaussée : surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules. Elle est constituée d'une ou plusieurs voies de circulation ;

\* Accotements : zones latérales de la plate-forme qui bordent extérieurement la chaussée. L'accotement est constitué de la berme et de la bande dérasée.

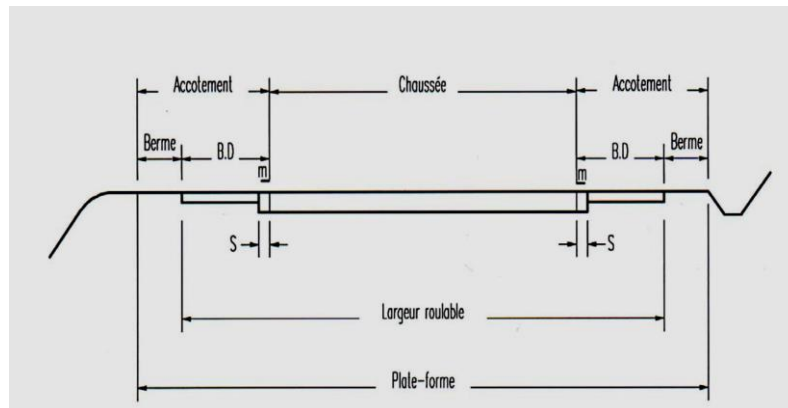


Figure I.3 : Cas d'une chaussée à 2 ou 3 voies (Visa ,2009).

### I.5 Constitution d'une structure de chaussée et leur fonctionnement

Selon Faure (1997), une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilement successifs de couches de matériaux granulaires.

#### I.5.1 La plateforme

Les structures d'une chaussée sont construites sur un ensemble dont la surface supérieure est appelée plate-forme support de chaussées cet ensemble est constitué :

- a- Un sol support** : déblai ou remblai, sol en place ou rapporté désigne dans sa partie supérieure (sur 1 mètre d'épaisseur environ) par le terme partie supérieure des terrassements et dont la surface constitue l'arase de terrassement ;
- b- Couche de forme** : une couche particulière de la chaussée située entre la partie supérieure du terrassement et la couche d'assise. Cette couche a pour but le drainage de l'eau et de ce fait limite le phénomène du gel dégel très nuisible à la structure. Si le sol en place comporte toutes les caractéristiques requises alors la couche de forme sera inexistante, si par contre ce sol est médiocre la couche de forme devient obligatoire.

#### I.5.2 La couche d'assise

L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches :

- a- Couche de fondation** : première phase de la couche d'assise de la chaussée, elle est formée de différents graves naturels sélectionnés.
- b- Couche de base** : couche de matériaux située sous la couche de surface, destinée à répartir les efforts dus aux charges.

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

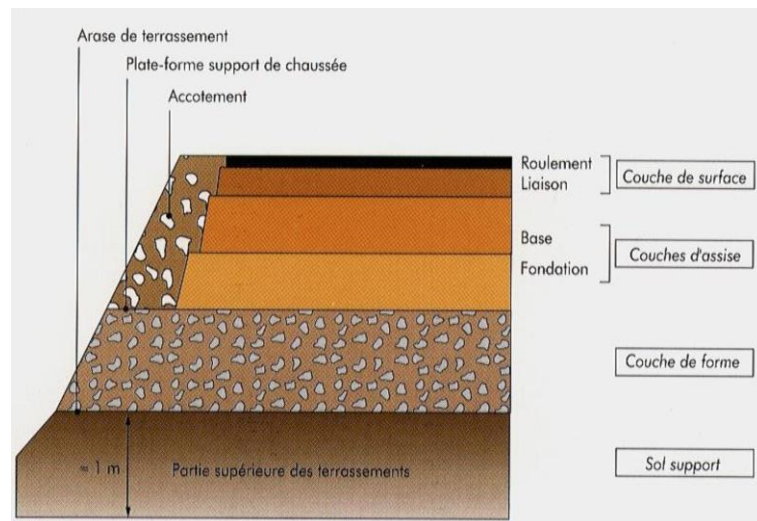
### I.5.3 La couche de surface

La couche de surface est constituée de deux couches :

**a- Couche de roulement** : est la couche supérieure de la chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat.

**b- Couche de liaison** : déposée sur la couche de base comme cure pour permettre provisoirement la circulation des véhicules avant la mise en place de la couche de roulement.

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

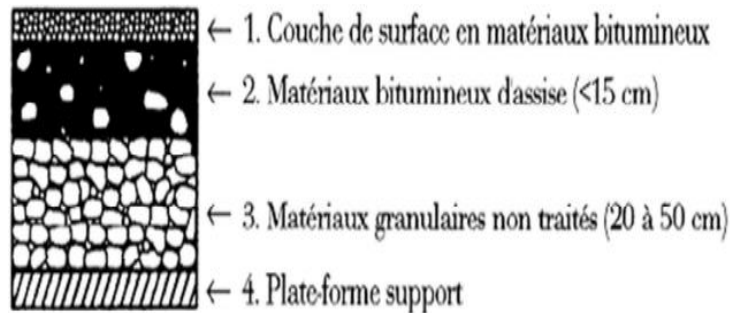


**Figure I.4:** Constitution d'une chaussée (Faure, 1997).

## I.6 Différents types de structures de chaussées

### I.6.1 Chaussées souples

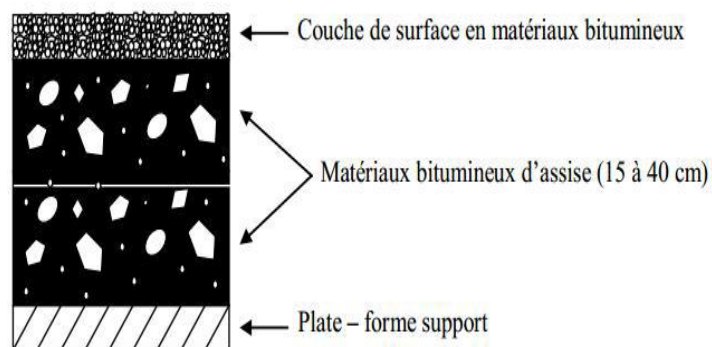
Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm (LCPC, 1998).



**Figure I.5 :** Les couches d'une chaussée souple (LCPC, 1998).

### I.6.2 Chaussées bitumineuses épaisses

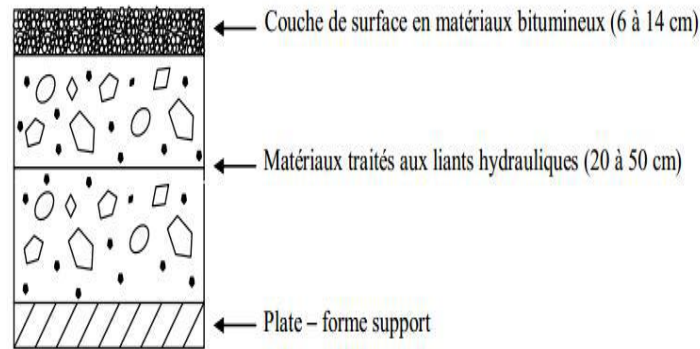
Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm (LCPC, 1998).



**Figure I.6 :** Les couches d'une chaussée bitumineuses épaisses (LCPC, 1998).

### I.6.3 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

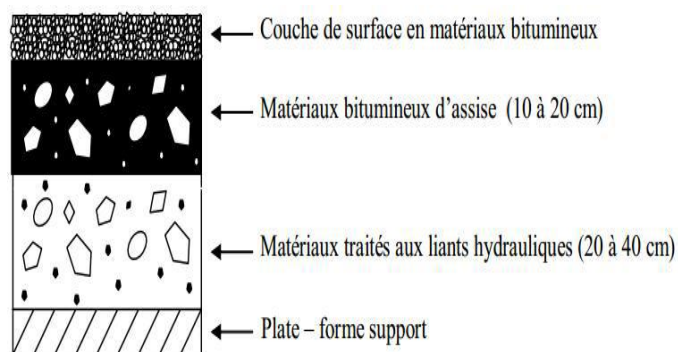
Ces structures sont qualifiées couramment de semi rigide. Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm (LCPC, 1998).



**Figure I.7 :** Les couches d'une chaussée semi rigide, (LCPC, 1998).

#### I.6.4 Chaussées à structure mixte

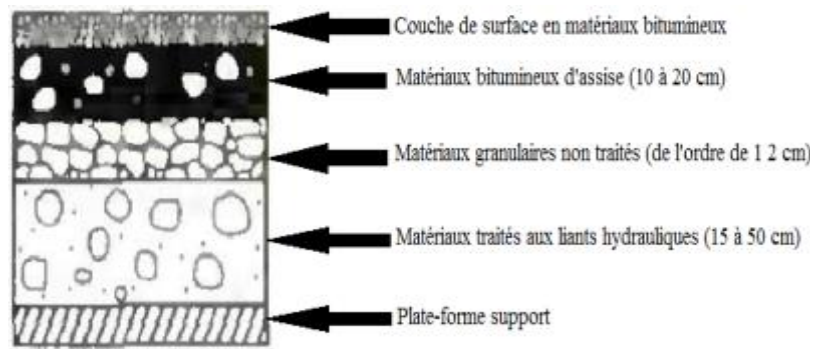
Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1/2 (LCPC, 1998).



**Figure I.8 :** Les couches d'une chaussée mixte (LCPC, 1998)

#### I.6.5 Chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche en grave non traitée (d'environ 12cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm (LCPC, 1998).

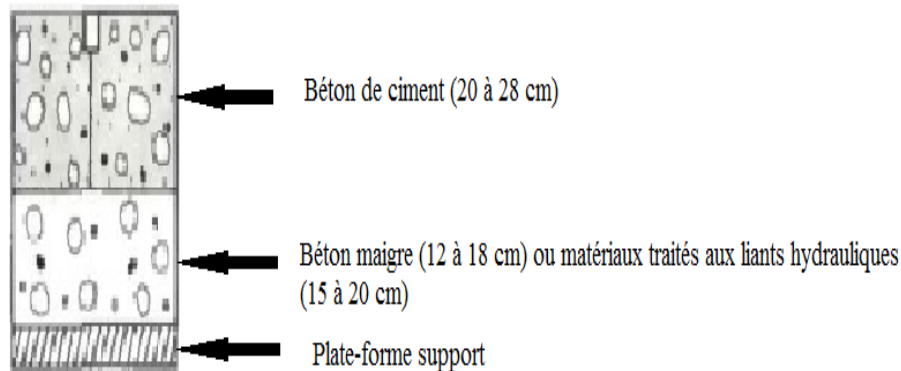


**Figure I.9 :** Les couches d'une chaussée à structure inverse (LCPC, 1998)

### I.6.6 Chaussées en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 20 à 28cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux.

La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec, dans ce cas, interposition fréquente d'une couche bitumineuse. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints (LCPC, 1998).



**Figure I.10 :** Les couches d'une chaussée en béton de ciment (LCPC, 1998)

## **I.7 Principes généraux de construction d'une route**

En se référant à Zabat (2013).

Les principes généraux dont s'inspirera le projeteur sont les suivants :

### **I.7.1 Influences naturelles**

- Le tracé général d'une route se rapprochera des grands axes naturels ou coupures naturelles (vallées, cours d'eau) et des axes construits (voies ferrées, canaux) ;
- La géologie et l'hydrographie joueront un grand rôle dans le cout de construction (qualité des terrains à excaver, présence et position des nappes phréatiques, approvisionnement en matériaux de construction) ;
- Les conditions climatiques seront prises en considération en vue d'une exploitation sure et économique (ensoleillement, humidité, enneigement).

### **I.7.2 Influences techniques et économiques**

- L'équilibre déblai-remblai (les mouvements des terres) sera recherché, mais il a moins d'importance que (Mécanisation des chantiers, sélection des matériaux) ;
- Les ouvrages d'art doivent s'adapter au tracé général adopté et non pas l'inverse, mais l'estimation de leurs couts peut influencer le choix du tracé à l'origine ou amener une modification locale du tracé ;
- En secteur accidenté, trouver un compromis rationnel entre un mauvais tracé sans ouvrages d'art et un tracé élégant composé en majeure partie de ponts et tunnels, très couteux ;
- L'évaluation du cout de construction sera donc prise en considération très tôt dans l'étude, mais se souvenir qu'une solution techniquement insuffisante ne peut pas se justifier par un faible cout.

### **I.7.3 Sécurité d'exploitation et confort**

- Évaluer les risques d'inondation, de chutes de pierres et d'avalanches et les prévenir ou en tenir en compte (digues, galeries de protection) ;
- Tracé le plus voisin de l'horizontale et plus tendu possible (faibles déclivités et longues courbes de grands rayons).

## **I.8 Les matériaux routiers**

La construction d'une route exige la mise en œuvre de quantité considérable de matériaux de qualité (Aussedat et al, 2003) ; (Corté et Hervé, 2004) ; (Aulnois, 1951) et (Arrambide et Duriez, 1959).

### **I.8.1 Les matériaux traités aux liants**

Un liant est un produit qui sert à agglomérer des particules solides sous forme de poudre ou de granulats. On distingue deux types :

#### **I.8.1.1 Les matériaux traités aux liants hydrauliques**

Les liants hydrauliques s'hydratent au contact de l'eau et donnent naissance à des espèces cristallines non solubles qui rassemblent et maintiennent les éléments granulaires, c'est la prise hydraulique.

Une augmentation de la cohésion du sol qui dépendra de la nature des matériaux, du type de liant, de la quantité de liant et de la compacité du sol

#### **❖ Les différents types de liant hydrauliques**

**Les ciments :** mélange d'argiles et de calcaire chauffés à haute température dans une cimenterie.

**La chaux :** s'obtient par calcination du calcaire à une température dépassant 900°C pour donner de la chaux vive.

**Les laitiers de haut-fourneau :** scories en fusion provenant du traitement des minerais de fer dans les haut-fourneaux ( $T^{\circ}$  1 400 à 1 600° C).

**Les cendres volantes :** résidus de la combustion dans les centrales thermiques de charbon ou de lignite pulvérisés.

**Les pouzzolanes :** scories de certains types d'éruption volcanique.

#### **❖ Matériaux traités :**

- Graves-ciment (GC) et sables-ciment (SC) ;
- Graves-laitier (GL) et sables-laitier (SL) ;
- Graveleux latéritique : matériau routier, les latérites peuvent être considérées comme roche sédimentaires ou roche métamorphique ;
- Banco-coquillage : est un matériau constitué d'un sable fin coquillé de sable limoneux mélangé avec des coquillages ;



**Figure I.11** : graveleux latéritique



**Figure I.12** : banco-coquillage

### I.8.1.2 Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

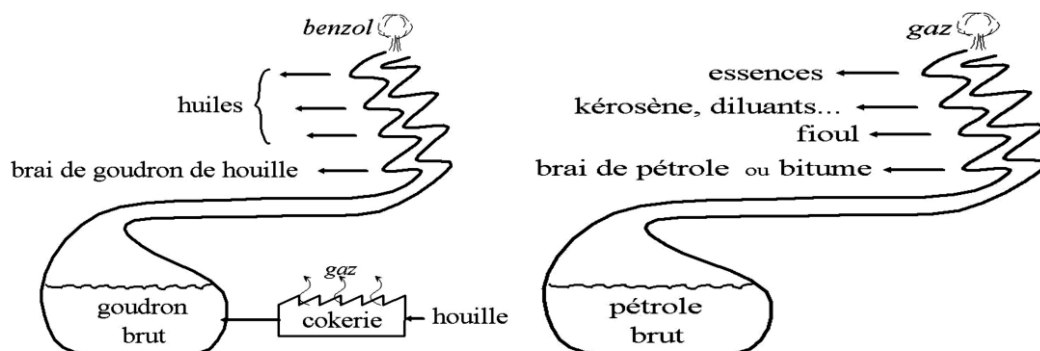
Mélange de granulats et de liant hydrocarbonés (produit noir) est un liant organique constitué d'hydrocarbures, c'est-à-dire essentiellement à base de carbone d'hydrogène, auxquels s'ajoutent l'oxygène le soufre, l'azote, en faibles quantités, comme le bitume et émulsion.

#### a- Les produits noirs d'origine naturelle

- Le bitume naturel : est issu de la polymérisation du pétrole au contact d'argiles. Un bitume naturel contient entre 50 et 60 % de bitume pur.
- L'asphalte : est une roche poreuse argilo-calcaire contenant 6 à 25 % de bitume pur. Il existe aussi des calcaires asphaltiques et des schistes bitumineux contenant 8 à 10 % de bitume pur.

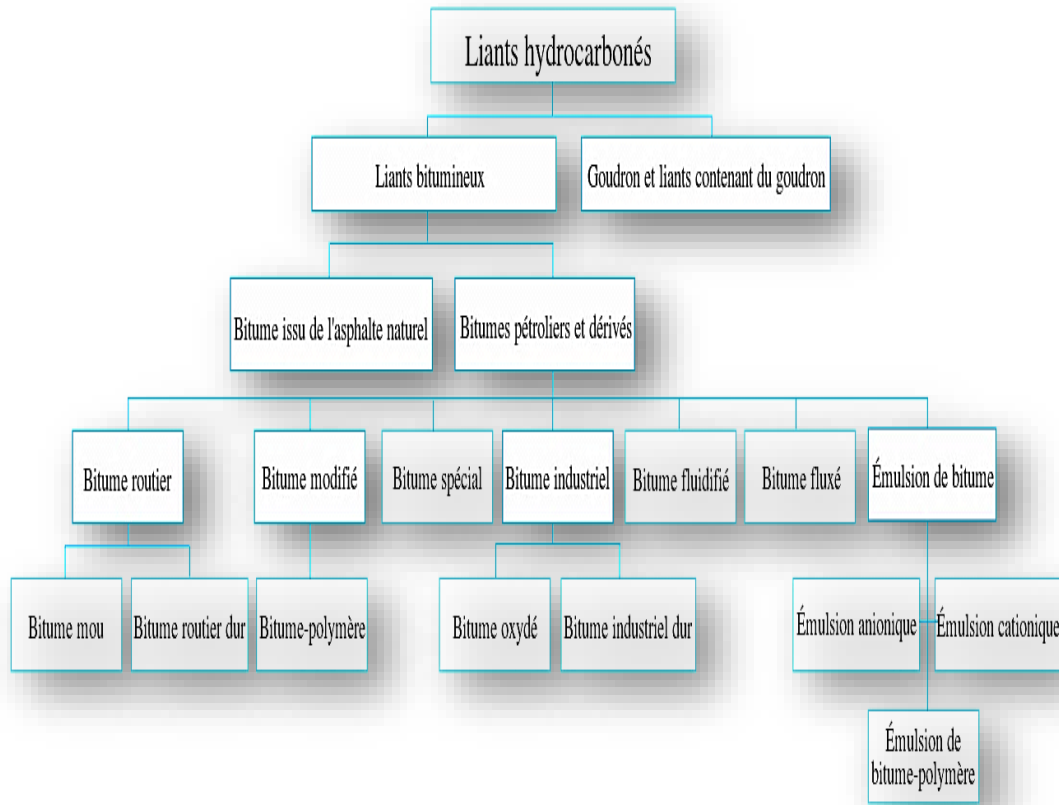
#### b- Les produits noirs d'origine artificielle

Bitumes et " goudrons " sont des liants hydrocarbonés. Ils sont issus de la distillation du goudron brut ou du pétrole brut.



**Figure I.13** : Schéma de distillation du goudron brut et pétrole brut.

Le bitume est le produit le plus lourd issu de la distillation du pétrole. Selon l'origine du pétrole et le mode d'obtention, on obtient 20 à 30 % en masse de bitume artificiel. En général, les bitumes durs sont fluidifiés (obtention d'un " cut-back " par ajout d'un diluant en raffinerie) ou fluxés (ajout d'huile de houille).



**Figure I.14 :** Terminologie en matière de liants hydrocarbonés (<https://fr.scribd.com>)

❖ **Matériaux traités :**

- Grave-bitume (GB)
- Graves-émulsion
- Sables-bitume (SB)



**Figure I.15 :** Grave-bitume, TMF groupe.fr.



**Figure I.16 :** Sables-bitume, Office national de l'énergie (2006).



**Figure I.17 :** Graves-émulsion

## I.8.2 Les matériaux non traités

### ➤ Les graves non traitées

Une grave non traitée est un mélange à granulométrie continue de cailloux, gravier et sable avec généralement une certaine proportion de particules fines.



**Figure I.18 :** Grave 0/10 ; 0/31.5



**Figure I.19 :** Grave 0/80

### ➤ Les graviers non traités

Un gravier non traité est un granulat de roche concassée et se présente sous la forme d'un matériau de type d/D.



**Figure I.20 :** Gravier 4/6 ; 6/10 ; 10/14.



**Figure I.21 :** Gravier 20/31.5 drainant.

**Remarque :** Les matériaux non traités et les matériaux traités au liant (hydraulique et hydrocarboné) sont généralement utilisés en couches d'assises.

### I.8.3 Les matériaux de finition (utilisés en couche de surface)

#### ➤ Les enduits superficiels

Un enduit superficiel est un film de liant répandu sur la surface revêtir, sur lequel une couche de granulats est répandue et cylindrée. On peut utiliser des bitumes purs, des bitumes fluxés ou fluidifiés, des émulsions avec une teneur en bitume pur variant entre 50 et 69% ou des bitumes modifiés.



Figure I.22 : la mise en œuvre d'enduit superficiel

#### ➤ Les enrobés hydrocarbonés

Un enrobé bitumineux ou béton bitumineux est un mélange de graviers, de sable et de liant hydrocarboné appliqué en une ou plusieurs couches pour constituer la couche de roulement des routes, la piste des aéroports et d'autres zones de circulation.



Figure I.23 : Formulation d'enrobé

Les bétons bitumineux se classent en fonction de leur granulométries et leur épaisseur et reposent toujours sur une couche de base en matériaux hydrocarbonés, ou traités au liant hydraulique, ou sur une couche de liaison en enrobés pour les structures minces

- Béton bitumineux ultra mince (BBUM) : épaisseur de couche de 2cm ;
- Béton bitumineux très mince (BBTM) : épaisseur de couche de 2.5cm ;
- Béton bitumineux mince (BBM) : épaisseur de couche de 3 à 5 cm ;
- Béton bitumineux semi-grenu (BBSG) : épaisseur de couche de 5 à 9 cm ;
- Béton bitumineux drainant (BBDr): utilisé en zone pluvieuse.



**Figure I.24** : Le BBSG et BBDr

### ➤ Le sable enrobé

Le sable enrobé de granularité en général 0/5 est un mélange de sable bien gradué et de bitume, utilisé en couche de roulement Son épaisseur de mise en œuvre est de 3 à 4 cm et le liant généralement utilisé est un bitume pur.

## **I.9 Les dégradations des chaussées**

Un réseau routier présente une grande diversité de combinaisons de types de structures et de types de matériaux dont la composition, la mise en œuvre et leur âge influenceront sur le comportement de la chaussée. En se basant sur les études de Lacoffe (2014) et Towada (2016), nous avons résumé les types de dégradation des chaussées et les paramètres influençant l'apparition de ces dégradations, dans ce qui suit :

### **I.9.1 Paramètres influençant l'apparition et l'évolution des dégradations**

**a) Charge de trafic** : le passage d'un véhicule engendre des contraintes normales et de cisaillement dans toutes les directions des couches de la chaussée ; la couche d'assise subit essentiellement le phénomène de fatigue causé par les cycles de traction/compression dans la direction parallèle à l'axe de roulement, à chaque passage de roue, la chaussée subit donc

un chargement du type « contraction - extension - contraction ». C'est la répétition de ces sollicitations qui est à l'origine de la fatigue de la chaussée (à sa base et dans la direction longitudinale) (Jacques, 2003).

**b) Sollicitations climatiques:** la variation de température a deux effets mécaniques principaux outre le vieillissement du matériau :

- Changement de la rigidité du matériau dû au caractère thermo susceptible du mélange bitumineux et plus particulièrement du liant hydrocarboné ;
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des (dilatations-contractions) thermiques qui peut provoquer et faire se propager des fissures avec les cycles thermiques.
- La présence des nappes phréatiques au-dessous des sols et l'infiltration de la pluie au travers la chaussée qui se transforme en glace (au gel) qui fait gonfler la chaussée. Au dégel, cet excès d'eau fait chuter considérablement la portance du sol support et la chaussée devient particulièrement fragile.

**c) Situation géométrique**

- Déclivité ;
- Largeur des voies ;
- Courbure

### **I.9.2 Type de dégradation**

Il existe plusieurs types de dégradation des chaussées dont il faut tenir compte à des conditions nécessaires :

- Identification des différents types de dégradations couramment observées sur un réseau ;
- Identification des origines et causes probables ;
- Maîtrise de leur évolution sous l'effet simultané du trafic et du climat ;
- Conception et mise en œuvre des techniques adaptées de remise en état.

#### **I.9.2.1 Les déformations**

Il existe deux genres de déformation suivant leur forme ou leur localisation :

**a) L'orniérage :** déformation permanente longitudinale en creux, présente dans les bandes de roulement. A cela s'ajoute la perte de matériau qui est un phénomène classique sur les routes en terre. Il résulte de l'usure de la couche de roulement sous l'effet du trafic par perte des éléments fins en poussière.

- **Cause probable**

- Sous dimensionnement de la chaussée ;
- Compactage insuffisant ;
- Humidité importante dans les couches ;
- Inférieures de la chaussée ;
- Absence ou insuffisance de drainage.

- **Remèdes**

- Reprofilage avec apport de matériaux.



**Figure I.25 :** Les orniérages.

**b) L'affaissement :** déformation permanente de type enfoncement prononcé et souvent assez étendue. Il se localise soit en rive de la chaussée, soit en pleine voie.

- **Cause probable**

- Portance insuffisante du sol support ;
- Mauvais drainage ;
- Tassement du matériau ayant servi à boucher un nid de poule.

- **Remèdes**

- Cantonnage mensuel ;
- Bouchage des trous.



**Figure I.26 :** Les affaissements.

c) **Tôle ondulée** : La tôle ondulée est une déformation permanente linéaire de type ondulation, régulière et rapprochée, perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

- **Cause probable**

- Une cohésion insuffisante du matériau de surface ;
- La vitesse élevée des véhicules sur la route ;
- L'agressivité du trafic ;
- Un défaut de plasticité du matériau utilisé pour la couche de roulement.

- **Remèdes**

- Reprofilage léger en remblai ou en déblai.



**Figure I.27** : Tôle ondulée.

### I.9.2.2 Les fissures

On peut distinguer plusieurs types de fissures : longitudinales, transversales, fissures de rive, fissures en carrelage, fissures de gel.

a) **Fissures longitudinales**: Famille de dégradations de surface caractérisée par une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée. Fissure sensiblement parallèle à l'axe de la chaussée.

- **Cause probable**

- Joint de construction mal exécuté le long de la travée adjacente
- Ségrégation de l'enrobé à la pose ;
- Vieillissement du revêtement.



**Figure I.28** : Fissures longitudinales.

**b) Fissures transversales :** Fissure sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée isolée ou périodique, d'espacement variable, intéressant tout ou partie de la largeur de la chaussée.

• **Cause probable**

- Retrait thermique ;
- Vieillissement et fragilisation du bitume ;
- Remontée de fissures après des travaux de resurfaçage ;
- Joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé)
- Diminution de la section du revêtement.



**Figure I.29 :** Fissures transversales.

**c) Fissures de rive :** Rupture en ligne droite ou en arc de cercle, le long de l'accotement ou de la bordure, ou décollement du revêtement le long de la bordure.

• **Cause probable**

- Manque de support latéral (ex : accotement étroit et pente de talus abrupte).
- Discontinuité dans la structure (ex: élargissement).
- Apport latéral d'eau de ruissellement dans la structure de la chaussée (milieu urbain).
- Assèchement du sol support (milieu urbain).



**Figure I.30 :** Fissures de rives.

**d) Fissures en carrelage:** Ensemble de fissures longitudinales et transversales entrelacées ou maillées formant une série de polygones.

• **Causes probables**

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



**Figure I.31 :** Fissures en carrelage.

**e) Fissures de gel :** Rupture du revêtement générant une fissure active sous l'effet du gel, soit rectiligne et localisée au centre de la voie ou de la chaussée, soit d'apparence lézardée sans localisation précise sur la chaussée.

• **Causes probables**

- Infrastructure gélive et soulèvements différentiels.
- Comportement gélif différentiel (ex. : transition aux coupes de roc).
- Remblai instable.
- Drainage inadéquat.



**Figure I.32 :** fissures de gel

### I.9.2.3 Les arrachements et les remontées

Il s'agit des désordres affectant en général la couche de roulement.

a) **Nid-de-poule** : est une cavité circulaire qui se creuse dans la chaussée et résulte du départ de matériaux ; pour les routes en terre, le nid-de-poule est considéré comme dégradation structurelle, car il se propage rapidement dans le corps de chaussée.

- **Causes probables**

- Faiblesse ponctuelle de la fondation ;
- Épaisseur insuffisante du revêtement ;
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd.

**Remarque** : Le nid-de-poule est la manifestation finale d'une combinaison de différents problèmes.



**Figure I.33** : Nid-de-poule

b) **Pelade** : arrachement de la couche de roulement par plaque.

- **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.34** : Pelade.

c) **Ressuage** : Remontée du bitume a la surface de la chaussée recouvrant tout ou partie des granulats.

- **Causes probables**

- Surdosage du bitume ;
- Effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic ;
- Excès de liant d'accrochage ;
- Formulation d'enrobé inadaptée aux sollicitations.



**Figure I.35** : Ressuage

d) **Ravinement** : Saignées ou ravines de plus ou moins grandes dimensions, longitudinales ou transversales.

- **Causes probables**

- Érosion de la surface de roulement par les eaux de ruissellement.



**Figure I.36:** Le ravinement

### **I.10 Conclusion**

Les chaussées supportent le trafic des véhicules chaque jour et de tout type, ainsi elles s'usent continuellement dans le temps. L'évolution des matériaux utilisés et la connaissance de leur comportement permis une optimisation dans la conception des structures de chaussées, cette optimisation apporte d'une façon croissante l'utilisation des quantités de matériaux qui sont souvent d'origine naturelle. Ces ressources restent parfois incapables de satisfaire les besoin d'exploitation. Cependant, il est indispensable de trouver d'autres sources de matériaux à savoir les matériaux de recyclage. Dans cette étude, les granulats naturels généralement utilisés dans le domaine du génie civil (en particulier dans le domaine routier), sont remplacés partiellement par des débris de verre et des déchets plastiques (matériaux de recyclage). Dans le chapitre suivant seront présentées les caractéristiques des matériaux traités dans cette étude.

## **CHAPITRE II**

### **GENERALITE SUR LES MATERIAUX UTILISES ET LE RECYCLAGE DES DECHETS**

#### **II.1 introduction**

L'histoire des matériaux de construction, comme celle de la métallurgie, de la verrerie et des matériaux céramiques. Son apparition précoce et son développement sont liés aux ressources offertes par la géologie, notamment aux matières premières nécessaires à ces premières manifestations de l'industrie humaine, qui doivent être largement disponibles, peu onéreuses, faciles à exploiter et à transporter. Ces matières premières consistent principalement en matériaux dits de (carrière) : pierres et granulats, sables, calcaires, argiles, gypses.....etc.

L'accroissement constant du besoin de ces matériaux routiers a suscité l'orientation vers l'introduction des matériaux recyclables (verre, plastique,...), une nouvelle technique visant à garder toujours le développement du réseau routier en expansion.

Dans ce chapitre nous allons présenter particulièrement les matériaux naturels et industriels utilisés dans notre étude, à savoir : le calcaire, le verre et le plastique.

#### **II.2 Le calcaire**

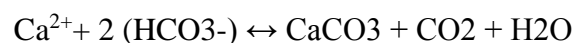
##### **II.2.1 Définition**

Les calcaires sont des roches sédimentaires, inégalement résistants, plus ou moins perméables. Ils sont composés d'au moins 70% de calcite et peuvent contenir de la silice, de l'argile et de la matière organique, ainsi que d'autres minéraux dont les plus courants la dolomite.

Le calcaire est reconnaissable par sa teinte blanche et généralement la présence des fossiles (Derville, 1931).

##### **II.2.2 La formation du calcaire**

Le carbonate de calcium se forme dans les milieux aquatiques et résulte de la précipitation d'ions dissous. Cette précipitation suit la réaction suivante :



Cette est illustrée clairement sur la figure II.1

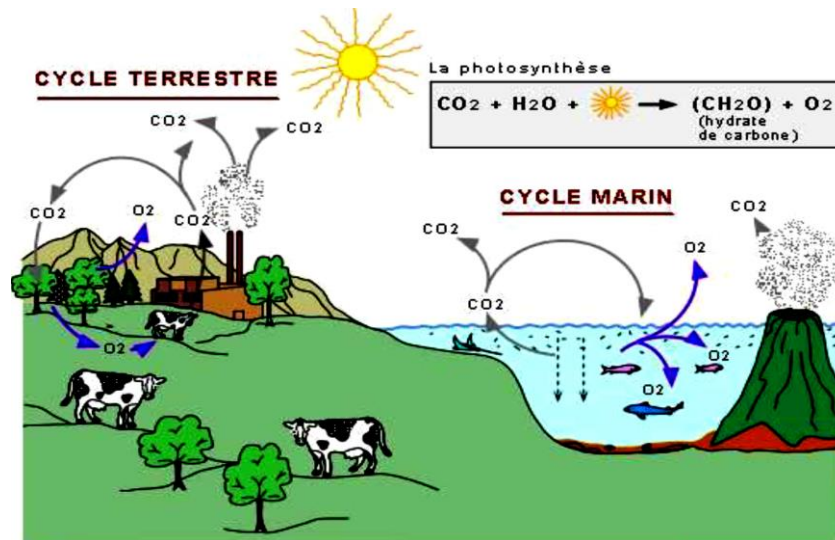


Figure II.1 : Cycle du carbone (Jeandel et Baman, 2011).

Selon André Vatan (1967), il existe plusieurs modes de formation des roches calcaires :

- **Par précipitation (calcaire chimique)**

- La lente sédimentation ou l'accumulation des éléments microscopique obtenus par précipitation et leur consolidation par la diagenèse ;
- Le brusque dégazage d'une eau souterraine arrivant à l'air libre (grotte, source) ou soumise au prélèvement par des végétaux du  $CO_2$ , peut provoquer une précipitation localisée produisant selon les circonstances, des travertins ou des stalactites et stalagmites.

- **Par action des êtres vivant (calcaire biogène)**

- Ils peuvent résulter d'une forte accumulation de coquille ou de carapaces calcaire (intactes ou en débris), comme la craie, le tuffeau, ou être bio construits.

- **Par érosion (calcaire détritique):**

- Par exemple les brèches calcaires ou ophalcalcite.

### II.2.3 La classification du calcaire

Les géologues ont créé des classifications fondées surtout sur la structure des roches carbonatées, ce qui nécessite souvent l'emploi du microscope, ou au moins d'une forte loupe.

Selon Slansky (1992), cette classification se résume comme suit :

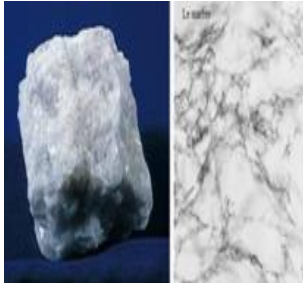
- **Selon les proportions de calcite et de dolomite**
  - Calcaire pur (100% à 95% de calcite, 5% dolomite maximum) ;
  - Calcaire magnésien (5 à 10% de dolomite) ;
  - Calcaire dolomitique (10 à 50% de dolomite).
- **Selon les proportions de calcaire et d'argile**
  - Calcaire marneux (5 à 35%d'argile) ;
  - Marne (35 à 65%d'argile).
- **Selon les milieux de dépôt**
  - Calcaire marin (pélagique anéritique) ;
  - Calcaire continentale (calcaire lacustre, fluviatiles, croutes calcaire de certains sol).
- **Selon les structures et les textures**
  - Calcaire massif ou lité ;
  - Calcaire oolitique, pisolitique, graveleux, noduleux, siliceux.
- **Selon l'importance des fossiles ou de leur débris**
  - Calcaire construit ou calcaire récifal ;
  - Calcaire lumachellique et coquiller ;
  - Calcaire bio détritique et bioclastique ;
  - Calcaire a ammonites.
- **Selon la présence de matériel terrigène**
  - Calcaire sableux ;
  - Calcaire siliteux ;
  - Calcaire argileux.

#### **II.2.4 Les différentes transformations du calcaire**

Selon Lannoy (1977) et Salomon (2006) :

- Le calcaire métamorphisé donne du marbre;

- Le calcaire mélangé avec l'argile donne de la marne;
- Le calcaire mélangé à de la serpentine est une ophicalcite.



**Figure II.2:** Le marbre.



**Figure II.3:** La marne.



**Figure II.4:** L'ophicalcite.

- Lorsque le calcaire est chauffé aux environ de 900°C dans des fours de calcination, il prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface appelées chaux vive;



**Figure II.5 :** La chaux vive.

- L'érosion marine des affleurements de calcaire donne des rejets en creux et des aiguilles ;
- La dissolution des calcaires solides et massifs forme des surfaces aux modelés les lapiazs ;
- Les massifs calcaires, sous l'effet de l'action de l'eau, vont acquérir un modelé dit karstique.



**Figure II.6 :** Les principales figures du karst.

### **II.2.5 Utilité du calcaire**

Les calcaires peuvent être soit adaptés, soit utilisables dans les divers usages auxquels ils sont destinés. D'après Slansky (1992), les roches calcaires sont utilisées comme :

- Matériau en sculpture ;
- Roche à bâtir utilisée dans la construction ;
- Matériau d'empierrement de la voirie ;
- Sable et granulat dans la fabrication des bétons ;
- Charge minérale pulvérulentes dans divers matériaux (plastiques, peinture, colles...);
- Fondant dans la fusion du verre et dans la fusion des métaux ferreux ;
- Amendement calcique agricole pour lutter contre l'acidification du sol ;
- Matière première entrant dans la fabrication du ciment.

### **II.2.6 Les caractéristiques physiques et les aptitudes mécaniques des calcaires**

Un matériau est une substance solide, destinée à un emploi donné, présentant un certain caractère de permanence.

#### **II.2.6.1 Les caractéristiques physiques**

- La densité apparente : détermine la résistance à l'écrasement, elle varie entre 2 et 2.8 une bonne pierre de calcaire devra avoir une densité apparente au moins égale à 2.5 ;
- Le coefficient de taille : Il est initialement prévu pour apprécier la difficulté de taille du matériau et estimer le temps nécessaire au travail. Les professionnels de la pierre classent les matériaux selon une échelle de dureté, en leur attribuant un coefficient de taille de 1 à 14, de la plus tendre à la plus froide ;
- Porosité : La porosité est conditionnée par l'indice de taille et la densité du matériau. Plus l'indice de taille est élevé, moins la roche est poreuse ;
- La gélivité : conséquence de la perméabilité et de la capillarité de la roche ; dépend de la taille des pores (Beauchamp, 2003).

### II.2.6.2 Les aptitudes mécaniques

- La résistance à l'écrasement : est conditionnée par la densité du matériau, elle consiste à mesurer la charge de compression nécessaire à provoquer la déformation, la fracturation, l'éclatement ou l'écrasement d'un échantillon ;

**Tableau II.1** : pression nécessaire pour provoquer la rupture par compression de quelques roches (Keller, 2000).

Roches	Résistance à la compression (MPa)
Granit	100-280
Grès	40-110
Calcaire	50-60
Quartzite	150-600
marbre	100-125

- La largeur de la rayure : elle permet de déterminer la dureté superficielle du matériau, sa résistance à l'usure, à l'érosion et aux chocs ;
- La vitesse de propagation du son : elle est utilisée pour déterminer la qualité d'un matériau, plus les compétences techniques du matériau sont élevées, plus la propagation du son est rapide. Elle dépend des propriétés élastiques de la roche ainsi que de son état (lié à la porosité, à la présence de fissures...) (Dercourt et Paquet, 1995).

## II.3 Le verre

### II.3.1 Définition

Le verre est un corps solide, non cristallin (amorphe), homogène, provenant du figeage progressif de certaines substances après fusion. Le verre est l'un des matériaux les plus utiles car il possède de nombreuses qualités. Il est facile à modeler, transparent et peut prendre de nombreuses formes.

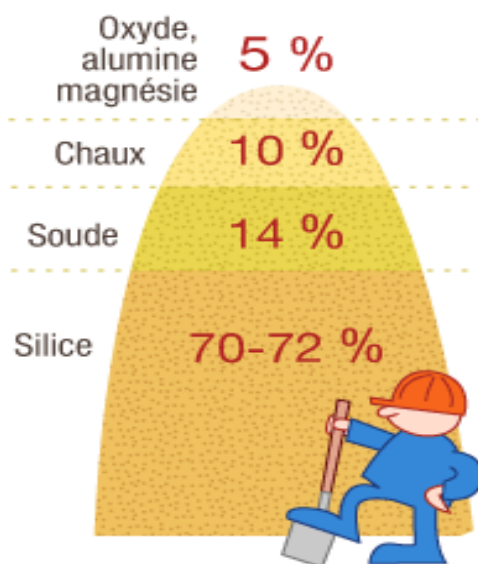
### II.3.2 Composition et fabrication du verre

Selon Pajeau (2007), les principales matières premières se classent en trois catégories :

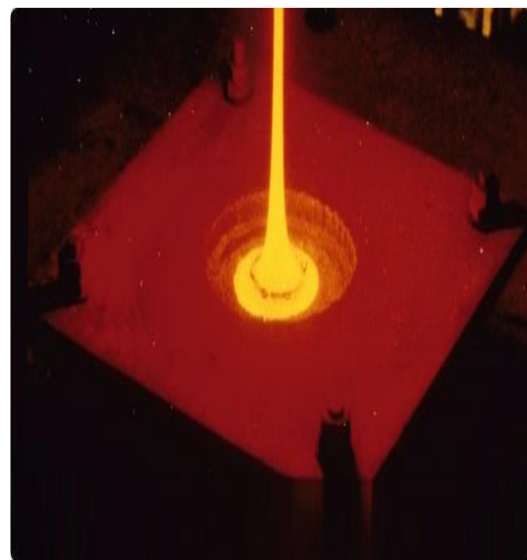
- **Le vitrifiant** : c'est un élément de bases qui crée la structure vitreuse ; l'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou silice, élément majoritaire, amené par les sables de carrières ou de rivières (le quartz).

- **Le fondant** : permet de fondre le vitrifiant à une température acceptable ; l'oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), le fondant, appelé aussi « soude », nécessaire pour abaisser de plusieurs centaines de degrés la température de fusion de la silice est apporté par les sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). En effet, la silice fond à une température de  $1700^\circ\text{C}$ , une température supérieure que celle utilisée dans l'industrie (température maximale en industrie est de  $1500^\circ\text{C}$ ). Ainsi, le mélange silice et fondant donne une température de fusion aux alentours de  $1400^\circ\text{C}$ .
- **Le stabilisant** : permet d'empêcher la détérioration dans le temps de verre ; L'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) ou « la chaux vive », le stabilisant, apporté par le calcaire permet au verre constitué de ne pas s'altérer dans le temps.

Les figures II.6 et II.7, montrent la composition de base et la fonte du verre respectivement.



**Figure II.7** : Le composant de base du verre (Deluzarche ,2019)



**Figure II.8** : Fusion de la silice mélangée au fondant :  $1400^\circ\text{C}$  (Picard)

De par sa composition, ce type de verre est appelé (silico-sodo-calcique). La plupart des produits verriers utilisés dans la construction sont des (silico-sodo- calciques), à l'exception de certains produits particuliers (verres borosilicates, vitrocéramiques).

\* La composition du verre (silico-sodo-calcique) est donnée au tableau II.2

**Tableau II.2 :** Composition du verre silico-sodo-calcique (NBN EN 673,1998) (NBN S 23-002,1989).

AVANT FUSION		APRÈS FUSION	
sable (SiO <sub>2</sub> )	58 %	SiO <sub>2</sub>	69 à 74 %
feldspath (SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O, Na <sub>2</sub> O)	3 %	Na <sub>2</sub> O	12 à 16 %
calcaire (CaO)	4 %	CaO	5 à 12 %
dolomie (CaO, MgO)	17 %	MgO	0 à 6 %
soude (Na <sub>2</sub> O)	18 %	Divers	0 à 3 %

\* Les principales propriétés du verre (silico-sodo-calcique) sont présentées dans le tableau suivant:

**Tableau II.3 :** Propriétés du verre silico-sodo-calcique (NBN EN 673,1998) (NBN S 23-002,1989).

PROPRIÉTÉ	VALEUR
Masse volumique $\rho$ à 18 °C (*)	2500 kg/m <sup>3</sup>
Module de Young E (*)	70 000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de Poisson $\nu$ (*)	0,2
Dureté Mohs (*)	6
Température de fusion (***)	≈ 1500 °C
Température de ramollissement (***)	≈ 600 °C
Coefficient de dilatation linéaire $\alpha$ (*)	9.10 <sup>-6</sup> m/(m.K)
Conductivité thermique $\lambda$ (*)	1 W/(m.K)
Capacité thermique massique "c" (*)	700 J/(kg.K)
Résistance à la rupture par flexion : - verre recuit (**) - verre durci (**) - verre trempé thermiquement (**)	41,2 N/mm <sup>2</sup> (****) 196,0 N/mm <sup>2</sup>
Valeur considérée pour les calculs de flexion : - verre recuit (**) - verre durci (**) - verre trempé thermiquement (**)	16,5 N/mm <sup>2</sup> (****) 49,0 N/mm <sup>2</sup>
Résistance à la compression (***)	1000 N/mm <sup>2</sup>
Coefficient de transmission thermique (verre simple de 4 mm) (*)	5,8 W/(m <sup>2</sup> .K)
Indice de réfraction "n" par rapport à l'air (*)	1,5
Transmission lumineuse (verre simple de 4 mm) (***)	0,90
Facteur solaire (verre simple de 4 mm) (***)	0,87
Émissivité normale d'un verre sans couche ou avec couche sans influence sur l'émissivité (*)	0,88

### II.3.3 Les différents types de produits verriers

Parmi les produits verriers, on distingue :

- **Les produits de base**

C'est-à-dire les produits verriers silico-sodo-calciques obtenus à la sortie du four, sans traitement ultérieur.



**Figure II.9 :** Exemple des verres de base (<http://www.archiexpo.fr>)  
(<http://www.miroiteriegbm.com>).

- **Les produits de base spéciaux**

C'est-à-dire les produits verriers (obtenus à la sortie du four sans traitement ultérieur) dont la composition diffère de celle du verre silico-sodo-calcique.



**Figure II.10 :** Exemple des verres de base spéciaux  
(<https://www.objetconnecte.net>).

- **Les produits transformés**

C'est-à-dire les produits obtenus par transformation, après fabrication, des produits de base ou produits de base spéciaux, aboutissant à de nouveaux produits aux qualités différentes.



**Figure II.11** : Exemple des verres transformés  
 (<http://www.origer.lu/index.php/fr>) (<https://mcp-menuiserie.com>)  
 (<https://www.objetconnecte.net>).

**Tableau II.4** : Les différents produits verriers (NBN EN 572,1995),  
 (NBN EN 1748-1,1997), (NBN EN 1748-2,1997).

PRODUITS DE BASE	PRODUITS DE BASE SPÉCIAUX	PRODUITS TRANSFORMÉS
Float	Verre borosilicate	Verre trempé thermiquement
Verre imprimé	Vitrocéramiques	Verre durci
Verre armé	Verre à haute teneur en plomb	Verre trempé chimiquement
Verre profilé		Verre feuilleté
Verre étiré		Verre à couches
Verre moulé		Double vitrage
Verre soufflé		Verre bombé
		Miroir
		Verres de décoration
		Vitrages chromogènes

### II.3.4 La durabilité du verre

C'est un matériau noble, transparent ou coloré, de formes variées. La durée de vie quasiment infinie du verre est due par la composition de ses matières premières naturelles. Le verre est un matériau excellent pour l'environnement. Les performances et la gamme d'applications des produits verriers ne cessent d'évoluer. Employés dans la construction durable, ils font partie des investissements les plus rentables.

Le cycle débute par l'extraction des matières premières, suivie des étapes de production, de distribution et d'utilisation. Il se termine par la fin de vie du produit : réutilisation, recyclage, valorisation énergétique ou élimination. Notamment dans le secteur de la construction, le verre, recyclable sans perte de qualité, à 100% et à l'infini. Il représente le parfait modèle de l'économie circulaire en boucle fermée, le recyclage d'une tonne de verre permet par exemple

d'économiser 850 kg de sable, d'économiser une quantité importante d'énergie et d'éviter l'émission de 670 kg de CO<sub>2</sub> (Asbl, 2013).

La durabilité du produit ne peut donc être mesurée rigoureusement que via l'analyse de son cycle de vie complet. Selon que le produit est éliminé ou réinjecté dans un nouveau cycle.

La méthodologie des analyses de cycle de vie est réglementée par la série de normes internationales ISO 14000 (No.78/2007), et concernant les produits de construction par la norme européenne (EN 15804,2014).

Plusieurs indicateurs y sont normalisés afin de quantifier les consommations d'énergie, l'épuisement des ressources, les consommations d'eau, les changements climatiques, l'acidification atmosphérique. Les fiches de déclaration environnementales (EPD) ont été développées à cet effet et présentent de façon standardisée selon la norme internationale (ISO14025, 2006), des données vérifiables, cohérentes et comparables, basées sur les analyses de cycle de vie des produits.

## **II.4 Le plastique**

### **II.4.1 Définition**

Le plastique est une polymérisation, généralement d'un hydrocarbure ; on utilise aussi le mot hydrocarbure pour faire référence, en particulier, au pétrole et au gaz naturel.

C'est une matière synthétique constituée de macromolécules et qui peut être moulée ou modelée.

- Un hydrocarbure (HC) est un composé organique contenant exclusivement des atomes de carbone (C) et d'hydrogène(H).
- La polymérisation désigne le procédé par lequel des molécules de bas poids moléculaires (monomères) réagissent entre elles pour donner des molécules de poids moléculaires plus grands (polymères).
- Les polymères sont des matériaux composés de très longues chaînes (macromolécules), elles-mêmes formées de molécules élémentaires (monomères) assemblées entre elles. Ces chaînes sont principalement constituées d'atomes de carbone sur lesquels sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou l'oxygène. D'autres éléments, notamment le chlore, l'azote ou le fluor, peuvent encore intervenir dans la composition de la chaîne.

## II.4.2 Les types de plastique

On considère généralement trois types de familles des plastiques

### II.4.2.1 Les thermoplastiques

Sous l'effet de la chaleur, les chaînes macromoléculaires linéaires glissent les unes par rapport aux autres. Le polymère se ramollit, peut se déformer et être mis en forme ; après refroidissement, la forme donnée est figée (Alie, 1980).

Dans cette catégorie on peut trouver les polymères suivants :

- Le polycarbonate PC (verre organique) ;
- Les polyamides PA (Nylon) ;
- Les styréniques PS, PSE ;
- Les polyoléfines PE, PP ;
- Les vinyliques PVC.



**Figure II.12 :** Exemple des thermoplastiques (Alie, 1980).

### II.4.2.2 Les thermodurcissables

A l'inverse des thermoplastiques, la mobilité thermique est réduite, plus la température est élevée, plus les chaînes tridimensionnelles se figent ; les liaisons ou nœuds se renforcent. L'opération est irréversible ; le polymère se rigidifie dès la première transformation jusqu'à se dégrader si la température continue d'augmenter. Les thermodurcissables sont des polymères (alvéolés) (Engelsman, Spalding et Peters, 2012).

Dans cette catégorie on peut trouver les polymères suivants :

- Les phénoplastes (Bakélite) ;
- Les polyépoxydes (Araldite) ;
- Les polyuréthanes PU ;
- Les silicones.



**Figure II.13 :** Exemple des thermodurcissables (Engelsman, Spalding et Peters, 2012).

#### II.4.2.3 Les élastomères

Les élastomères sont très résistants et présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Ils sont obtenus à partir de polymères linéaires ; des liaisons pontales (nœuds de réticulation) doivent être introduites entre les chaînes, conférant ainsi aux matériaux une structure tridimensionnelle qui assure la réversibilité de la déformation mécanique. Les nœuds de réticulation sont introduits par une réaction chimique appelée vulcanisation après la mise en forme du matériau (Engelsman, Spalding et Peters, 2012).

Dans cette catégorie on peut trouver les polymères suivants :

- Le polyisoprène NR (caoutchouc naturel) ;
- Le polyisoprène de synthèse IR ;
- Le polychloroprène (Néoprène) ;
- Les polysiloxanes (silicones).



**Figure II.14 :** Exemple des élastomères (Engelsman, Spalding et Peters, 2012).

#### II.4.3 Les propriétés des plastiques

Le développement de l'utilisation des matières plastiques dans tous les secteurs d'activités s'explique par le fait que les polymères sont, par leurs propriétés, en parfaite adéquation avec les applications envisagées ; chaque polymère ayant des propriétés qui lui sont propres. Les matières plastiques ont su se substituer à d'autres matériaux car :

- Leur densité est faible (légèreté) ;
- Leur coût est peu élevé ;
- Leurs performances sont notables surtout si elles sont ramenées à leur unité de masse;
- Leur facilité de mise en œuvre permet des cadences élevées et des géométries complexes.

## **II.5 Le recyclage**

### **II.5.1 Définition**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets (industriels ou ménagers) de produits arrivés en fin de vie, qui permet de réintroduire certains de leurs matériaux dans la production de nouveaux produits.

On peut dire aussi, toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en produits, matières ou substances aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins.

### **II.5.2 Les principes de gestion des déchets**

Le recyclage contribue à diminuer les quantités de déchets stockés en décharges ou incinérés, il est cependant contré par l'augmentation de la production des déchets, il existe trois principes de gestion des déchets (produit en fin de vie) qui en découlent visant à:

- **Réduire** : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet;
- **Réutiliser** : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent;
- **Recycler** : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet (Ouamane, 2017).

### **II.5.3 Origine de la production des déchets**

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- **Biologiques** : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- **Chimiques** : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;

- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet ;
- Économiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- Écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- Accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

#### **II.5.4 Procédés du recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.
- Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer.
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

#### **II.5.5 Les différentes filières du recyclage**

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

**Le verre** : le verre a la particularité d'être recyclable à l'infini, le processus ne modifie pas ses caractéristiques et il est sans danger pour la santé. Son recyclage permet d'économiser environ 100 Kg de fuel pour une tonne de verre.

**Le papier carton** : le vieux papier est transformé en pâte à papier pour en faire des journaux, des emballages, des papiers hygiéniques..., la fabrication de 90 000 tonnes de pâte recyclée nécessite 105 000 tonnes de papier récupéré, soit suffisamment pour sauver 420 000 tonnes de bois de forêt.

**L'aluminium et le fer** : ces deux matières premières sont récupérées après recyclage des boîtes de conserve usagées et des emballages en tôle d'acier....

**L'électronique** : la récupération et la valorisation des déchets de type téléviseurs ou ordinateurs est très importante, de par cette filière on obtient des matières premières telles que

le fer, l'aluminium et le cuivre, mais aussi des métaux plus nobles comme l'argent, l'or, le nickel et le platine.

**Les métaux** : cette filière récolte les métaux en vrac dans les déchets, elle englobe les métaux ferreux qui proviennent des objets métalliques de fin de vie, et les métaux non ferreux tel que le zinc et le plomb.

**Déchets verts et bois** : Ce sont les matières ou résidus organiques d'origine végétale, ces déchets sont générés par plusieurs activités telle que le jardinage ou encore l'entretien des espaces verts, ils sont alors dans ce cas transformé en composte ou incinérés. En plus de ces déchets de légumes, les déchets ménagers de type épluchures de fruits et légumes permettent de produire du biogaz, puisqu'elles se composent de la matière première nécessaire à cette production 'la biomasse'. Le bois quant à lui est valorisé en énergie renouvelable tel que l'électricité et la chaleur.

**Gravats** : issue de la démolition des constructions, cette filière englobe les déchets de béton, des déblais graveleux et d'enrobés bitumineux. Après triage, les déchets sont concassés, lavés puis séparés pour en fabriquer des granulats recyclés. Cette opération permet de préserver la matière première des carrières.

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

**Déchets spéciaux** : Selon l'OFEV (l'Office fédéral de l'environnement), « la part des déchets spéciaux, dans l'ensemble des déchets, est d'environ 6% ». Ce sont les déchets de compositions chimiques présentant un danger pour la santé publique et l'environnement, il existe 3 familles de déchets spéciaux:

- Les déchets domestiques dangereux : piles, solvants, pneus...
- Les appareils électroniques : appareil photo, téléphones, électroménagers...
- Les déchets industriels toxiques et d'activités de soins : mâchefer, produits phytosanitaires, déchets hospitaliers.

Ces déchets sont entreposés dans des sites désinfectés et protégés ou ils subiront plusieurs traitements pour en réduire la toxicité et les risques de contamination.

**Les PET (plastique de bouteilles transparentes)** : après recyclage le PET est réutilisé comme matière secondaire, avec ces derniers on fabrique de nouveau des emballages divers et des vêtements en laine polaire.

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



**Figure II.15** : Les différentes filières du recyclage (Zegane, 2018).

Remarque : on va s'intéresser plus sur la valorisation des déchets plastique et débris de verre, car notre étude est basée sur l'impact de l'utilisation de ces deux matériaux sur le comportement mécanique et physique du sol dans le domaine routier.

## **II.6 Le recyclage du plastique**

Le recyclage des plastiques est un moyen de protection de l'environnement, et ce par la réduction de déchets. Etant un dérivé du pétrole la réduction du plastique et ses déchets représentent un intérêt environnemental et économique importants.

Le plastique est caractérisé par une protection physique et chimique telles que l'imperméabilité, la résistance chimique aux solvants ; il est aussi connu pour sa résistance au choc.

### II.6.1 Les étapes de recyclage du plastique

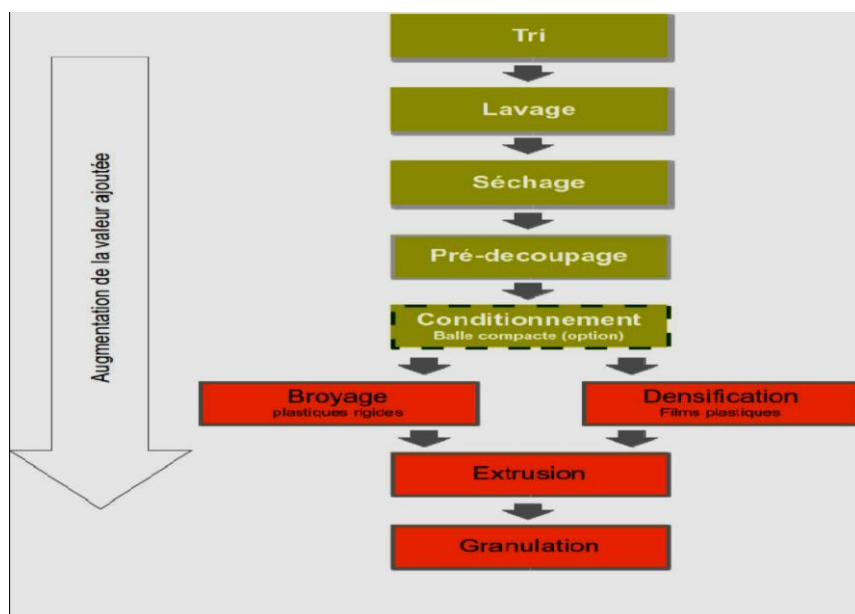
Le recyclage se fait en plusieurs étapes : tri, lavage, séchage, broyage, extrusion, granulation.

Les unités de régénération peuvent être plus ou moins avancées dans leur processus de régénération et produire un sous-produit recyclé plus ou moins élaboré. Une unité de régénération n'est pas obligée d'avoir en charge toutes les étapes de production, on peut trouver un acteur pour chaque type d'opération.

On distingue deux grandes phases dans le processus de régénération :

**a) Tri, lavage, séchage :** cette étape consiste à présenter un déchet plastique non-souillé et trié par type et qualité de résine pour les opérations de broyage, granulation, extrusion. Ces opérations peuvent être réalisées sans machine.

**b) Broyage, extrusion, granulation :** cette étape va apporter une grande valeur ajoutée en transformant le déchet plastique en sous-produit commercialisable auprès de l'industrie plastique. Pour cela il est nécessaire de s'équiper en machine, dont la consommation électrique n'est pas négligeable, surtout pour l'extrusion. La régénération du plastique permet de traiter tous les thermoplastiques avec le même équipement et selon le même procédé, seuls les paramètres de réglage des différentes machines changeront en fonction du plastique traité (température, vitesse de rotation de l'extrudeuse,...).



**Figure II.16 :** Schéma du processus standard de régénération (sciences-physiques.ac-Montpellier.fr).

Le fait que notre société consomme en permanence de grandes quantités de plastiques et que ces produits et matériaux finissent en déchets plastiques, parfois même après une très courte durée de vie, comme c'est le cas pour les matériaux d'emballage qui doivent être traités afin d'éviter leur propagation dans la nature, nous a incités à envisager toutes sortes de possibilités pour leur recyclage.

### **II.6.2 Le recyclage des plastiques dans les mélanges bitumineux**

Nous citons les pistes d'action suivantes, qui ont chacune été entamées avec plus ou moins de succès :

- Application en tant que matériaux légers pour des remblais. En raison de la faible densité des plastiques par rapport aux granulats minéraux et au sol, il peut être intéressant d'utiliser des blocs de déchets de plastique compactés comme matériaux légers pour des remblais, par exemple comme mur de soutènement derrière des palplanches ou bien ancré, cette méthode nécessite peu de prétraitement des déchets plastiques mais apporte également peu de valeur ajoutée ; le matériau ressemble toujours à des déchets plastiques (Daudon, 1992).
- Recyclage comme matière première pour des tubes en plastique, du mobilier urbain en plastique (poteaux, signalisation, etc.) ou même des structures de route entières, par exemple Plastic Road, un concept de structure routière composée d'éléments modulaires en plastique (recyclé), Cette méthode nécessite un prétraitement intensif des déchets plastiques, généralement aussi la sélection de certains types de plastiques ou seulement des mono matériaux, mais elle est de meilleure qualité car les déchets plastiques sont recyclés et transformés en grains ou en pellets qui servent de matière première pour la production de nouveaux plastiques (De Bock et al., 2019) ;
- Utilisation dans des mélanges bitumineux: différentes pistes sont envisagées, allant d'un additif pour le liant ou d'un remplacement partiel du liant au remplacement partiel des granulats.

### **II.6.3 Les déchets plastique dans l'enrobé**

Le recyclage de déchets plastiques dans la construction des routes, et en particulier dans les revêtements bitumineux à chaud, pourrait être réalisé selon deux différents procédés, appelés «procédé par voie humide» d'une part et «procédé par voie sèche» d'autre part (Chin et Damen, 2019).

- Le procédé par voie humide : dans ce procédé, le déchet plastique solide est mélangé mécaniquement et intimement au bitume. Ce procédé de modification du bitume avec des plastiques recyclés est réalisé en usine chez le fabricant de «bitume modifié». Ce mélange de déchet plastique et de bitume, fabriqué en usine via le procédé par voie humide, peut donc être considéré comme un bitume «prêt à l'emploi» modifié avec des déchets plastiques
- Le procédé par voie sèche : dans ce procédé, lors de la fabrication du revêtement bitumineux à chaud, le déchet plastique solide est ajouté directement dans le malaxeur de la centrale d'enrobage, avec les autres composants du mélange bitumineux (liant routier, granulats, sables, filler, etc.).

#### **II.6.4 Production de bitume modifié avec des déchets plastiques recyclés**

Le bitume utilisé comme liant dans l'enrobé peut être modifié en le mélangeant intensément avec un modificateur de type polymère. La compatibilité entre le polymère et le bitume permet de créer une matrice polymère (Kalantar et al, 2012).

#### **II.7 Le recyclage de verre**

Le recyclage du verre réduit la pollution associée de l'air de 20 % et la pollution de l'eau de 50 %.

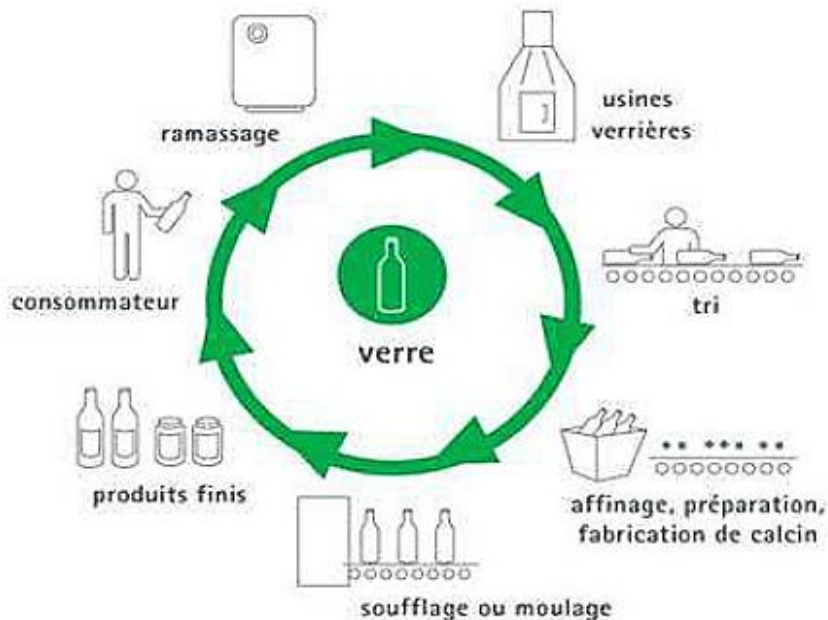
Le verre est l'un des matériaux les plus utilisés dans la construction. Ce matériau est réputé pour ses nombreuses qualités, notamment son rôle isolant et décoratif ; le verre crée une surface qui reste très propre et qui ne se salit pas rapidement, ce qui constitue un avantage formidable sur le long terme.

##### **II.7.1 Le cycle de recyclage du verre**

Lorsque le verre est recyclé, il va être dans un premier temps trié par le consommateur, puis entreposé dans des bacs ou bennes prévus à cet effet. Le verre est ensuite collecté, puis acheminé dans un centre de tri.

Un tri mécanique permet de retirer tous les éléments métalliques. Ensuite un tri optique (grâce à un rayon infrarouge) va permettre de retirer tous les éléments non transparents, comme la céramique qui n'est pas recyclable. Enfin un souffleur va retirer tous les éléments légers tels que les bouchons ou les étiquettes.

Une fois le tri effectué, le verre va être broyé pour former du calcin, la principale matière première utilisée par les verriers. Fondu puis soufflé pour former de nouveaux emballages, le calcin obtenu après broyage.



**Figure II.17 :** Cycle du recyclage du verre (sciences-physiques.ac-Montpellier.fr).

### II.7.2 Utilisation des débris de verre dans le ciment Portland

Le verre, comme d'autres matériaux, sont utilisés dans la fabrication du ciment Portland.

Les verres de récupération sont ainsi utilisés comme constituant principal pour le clinker, un adjuvant pour le ciment, ou même comme granulats pour le béton.

L'utilisation du verre dans le ciment Portland en est encore à l'état expérimental. Ces débris de verre sont préalablement lavés avant de passer dans une meule à verre. Le résultat de ce meulage est une poudre qui passe le tamis de 600  $\mu\text{m}$ . L'examen aux rayons X montre qu'il s'agit d'une poudre amorphe.

D'après une étude récente (Dyer et Dhir, 2001) sur le comportement des débris de verre dans le ciment Portland, les résidus de verre affichaient la composition chimique décrite dans le tableau II.5 :

**Tableau II.5 :** Composition chimique des débris de verre utilisés dans le ciment Portland (Dyer et Dhir, 2001).

Composition	Débris de verre, masse en %			%
	Blanche	Verte	Brun	
CaO	6.43	10.26	10	64.9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.41	2.81	3.2	5
SiO <sub>2</sub>	70.39	72.05	70.01	21.1
K <sub>2</sub> O	0.23	0.52	0.82	0.6
Na <sub>2</sub> O	16.66	14.31	15.35	0.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32	0	0	2.7
MnO	0.04	0.04	0.04	0.01
MgO	2.59	0.9	1.146	1.6
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.11	0.11	0.2
Cr	0.02	0	0	0.03
SO <sub>3</sub>	0,19	0,07	0,06	3,3

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

### II.7.3 Utilisation des débris de verre dans les enrobés bitumineux

Un grand nombre d'expériences ont été menées visant l'utilisation des résidus de verre comme granulat dans les enrobés bitumineux.

Ce type d'enrobé est appelé Glasphalt. Entre 1969 et 1988, environ 45 localités aux États-Unis et au Canada ont utilisé avec succès le Glasphalt sur des sites tels que les routes locales, les aires de stationnement ainsi que les routes à grande vitesse (autoroutes).

Le département des transports du Connecticut (Conn DOT), a réalisé une étude de mise en œuvre technique ainsi qu'une analyse économique de l'utilisation des débris de verre dans les enrobés bitumineux. Cette étude a permis d'identifier certains comportements et particularités liés à l'utilisation du verre dans les enrobés bitumineux, à savoir :

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

#### **II.7.4 Utilisation des débris de verre dans la structure des chaussées**

Plusieurs études et/ou projets ont été menés visant l'utilisation des débris de verre dans la construction des chaussées. Certains de ces projets visaient l'incorporation d'un pourcentage de résidus de verre dans les granulats conventionnels de chaussées, alors que d'autres visaient l'utilisation à 100 % du verre brisé dans certaines parties de la structure des chaussées.

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

Le projet fut réalisé dans la ville de Devine et il consista en l'utilisation d'un pourcentage de résidus de verre brisé mélangé avec les granulats pour la construction d'une route de 1,2 kilomètre.

Ils ont conclu que l'usage des débris de verre comme matériaux de construction ne cause aucun problème particulier, tant pour le producteur que pour l'entrepreneur (Rogel et Engelke, 1997).

Ainsi, les débris de verre se mélangent parfaitement aux granulats et se comportent comme un matériau normal, ce mélange nécessite moins d'eau afin d'obtenir une densité acceptable. Les équipements de construction ainsi que les véhicules n'avaient pas eu à subir de dommages causés par l'utilisation des débris de verre comme matériau de construction en couche de base.

#### **II.8 Le recyclage du verre en Algérie**

L'Algérie produit environ 13 millions de tonnes de déchets ménagers par an, soit une moyenne de 0,8 kilogramme par habitant par jour.

“Les matières plastiques représentent 18% de ces détritrus, les textiles 12,62%, le papier carton 9,75% et les métaux 2,84%” a précisé (Hamidi, 2021), chargée des études et de synthèse au Conseil national économique, social et environnemental (CNESE), lors d'un séminaire organisé le 3 juin 2021, à l'École supérieure de l'hôtellerie et restauration, à Aïn Benian (Alger).

35 à 40% des déchets ménagers et assimilés, seulement, sont enfouis dans les centres

d'enfouissement techniques (CET) et les décharges contrôlées, 55% à 65% sont entreposés dans des décharges sauvages.

La part des déchets recyclés en général compte moins de 7% et le compostage est estimé à moins de 1%. La gestion des déchets, relève madame (Hamidi,2021), “continue à peser fortement sur le budget de l'État”, évoquant, également, des contraintes économiques, sanitaires, environnementales, sociales avec des besoins d'investissement sans cesse croissants en matière d'infrastructure. 67,4 milliards de dinars ont été consentis entre 2002 et 2016, dont 53% pour la construction de CET et de décharges contrôlées. L'Algérie dispose, entre autres, de 228 CET et de décharges contrôlées des déchets ménagers et assimilés et actifs et de 23 centres de tri (Rabhi, 2021).

## **II.9 Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à présenter les caractéristiques des matériaux utilisés (calcaire, plastique et verre), ainsi que le recyclage des déchets.

Les prochains chapitres seront consacrés à identifier au laboratoire les matériaux utilisés, et à étudier leur comportement mécanique en tant que mélange de granulats de calcaire et de déchets plastique et des débris de verre sous différents types de sollicitations pour une meilleure utilisation dans la construction routière.

## CHAPITRE III

### ESSAIS D'IDENTIFICATION

#### III.1 Introduction

Identifier un matériau, consiste classiquement à exécuter une série d'essais, qui sont généralement simples permettant de les classer et d'apprécier leur état. Ces essais, permettent par la suite l'interprétation correcte du comportement des matériaux sous les différentes sollicitations mécaniques auxquelles ils seront soumis.

Dans ce chapitre, sont présentés et identifiés les différents matériaux naturel et industriel utilisés (calcaire, débris de verres et déchets plastiques).

#### III.2 Essais réalisés et les matériaux utilisés

Les matériaux étudiés sont soumis à plusieurs essais permettant de déterminer leurs caractéristiques à savoir :

- Teneur en eau (w) ;
- Masse volumique des grains solides ;
- Masse volumique sèche ;
- Masse volumique humide ;
- Indice des vides (e) ;
- Porosité (n);
- Degré de saturation (Sr) ;
- Limites d'Atterberg ;
- Valeur de bleu de méthylène VBS.

##### III.2.1 Matériaux industriels (plastique et verre)

Les déchets plastiques et débris de verres utilisés dans cette étude proviennent de l'entreprise unipersonnelle à responsabilité limitée (EURL ALUVERPLAS) de sous-traitance et recyclage des déchets (verre, plastique, aluminium, PET, pneu) ; elle est située dans la zone d'activité de THALA ATMANE de la wilaya de Tizi-Ouzou.



**Figure III.1 :** Situation géographique de l'EURL ALUVERPLAS.

### ➤ Le plastique

Les déchets plastiques utilisés se constituent d'un mélange de PET, PEHD, PVC broyés à l'état brut.

**Tableau III.1 :** Récapitulatif de la composition et utilisation des différents types de plastiques ([http://fr.wikipedia.org/wiki/code\\_d%27identification\\_des\\_r%C3%A9sins](http://fr.wikipedia.org/wiki/code_d%27identification_des_r%C3%A9sins)).

Type de plastique	Composition chimique	Utilisation
PET	Poly téréphtalate d'éthylène	Bouteilles d'eau, jus, sodas...
PEHD	Polyéthylènes à hautes densités	Flacons, les emballages semi-rigides...
PVC	Polychlorures de vinyle	Canalisations (tubes), revêtement de sol, bouteilles de détergents

### • Quelques propriétés du plastique utilisé

Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des différents plastiques utilisés dans cette étude ont été présentées par (Fontanille et Gnanou, 2014) et récapitulées dans le tableau III.2.

**Tableau III.2 :** Caractéristiques physiques et mécaniques des polymères utilisés.

Type	PEHD	PVC	PET/PS
Légèreté	Très bon	Assez bon	Bon
Dureté	Médiocre à assez bon	Assez bon	Assez bon a bon
Teneur en choc	Très bon	Faible à très bon	Médiocre
Résistance au froid	Bon	Médiocre	Bon
Résistance à la chaleur	Assez bon	Faible	Assez bon
Résistance au solvant organique	Très bon	Faible à bon	Faible à bon
Module d'élasticité E	0.8-12	2.4	3.2
Densité	0.95	1.38	1.05

### ➤ Le verre

Les déchets de verres utilisés proviennent du concassage des bouteilles d'emballages collectées au niveau des bords des routes, mélangés avec le verre ramené de l'EURL ALUVERPLAS qui se constituent de plusieurs types de verre.

#### • Quelques propriétés du verre utilisé

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

Densité = 2,49 à 2,52 g/cm<sup>3</sup> ;

Masse volumique sèche obtenue du Proctor standard = 1590 à 1720 kg/m<sup>3</sup> ;

Masse volumique sèche obtenue du Proctor modifié = 1750 à 1890 kg/m<sup>3</sup> ;

Porosité = 0.03 % ;

Absorption d'eau = 1.34 % ;

Angle de friction =  $\phi$  = avec 100 % de verre brisé = 51,2° ;

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.

Dans le cas du matériau verre, d'autres essais peuvent donner plus de détails sur sa composition. Sauf que, nos laboratoires ne disposent pas des moyens appropriés pour les réaliser.



**Figure III.2 :** Les déchets plastiques et les débris de verre concassés.

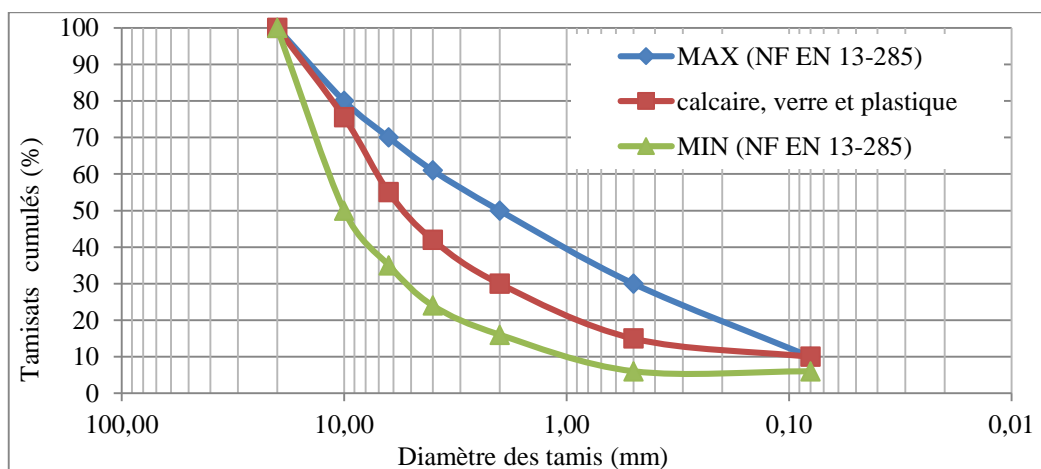
### III.2.2 Matériau naturel (calcaire)

Le calcaire utilisé est prélevé au niveau de la wilaya de Tizi-Ouzou.

L'ensemble des essais d'identification et des essais mécaniques est réalisé au niveau du laboratoire de mécanique des sols de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).

- **Concassage et tamisage du calcaire**

Avant de procéder à la préparation des échantillons, le calcaire prélevé sous forme de blocs rocheux est soumis à plusieurs opérations au laboratoire, à savoir : un concassage mécanique, un séchage à l'étuve, et puis un tamisage, de telle sorte à former une courbe granulométrique de classe 0/20 mm, délimitée par un fuseau bien précis relatif aux corps de chaussée prescrit par la norme (NF EN 13-285,2018).



**Figure III.3 :** Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme (NF EN 13-285,2018).



**Figure III.4 :** Matériau calcaire après concassage et tamisage

### III.3 Essais d'identification

#### III.3.1 La teneur en eau naturelle (NF P94-050)

C'est la caractéristique la plus facile à déterminer. Elle se détermine par deux pesées. Une première pesée du matériau calcaire à l'état initial (naturel) donne la masse  $M_h$  de l'échantillon humide et une deuxième pesée après passage à l'étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 24 heures (évaporation de l'eau libre et de l'eau capillaire), donne la masse sèche de l'échantillon  $M_s$  (NF P94-050, 1995).

On détermine alors la teneur en eau du calcaire par l'équation suivante :

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad \text{avec : } M_w = M_h - M_s$$

**Avec :**

$M_w$  : Masse de l'eau ;

$M_s$  : Masse du matériau sec ;

$M_h$  : Masse du matériau humide ;

W : teneur en eau.

**Tableau III.3 :** Teneur en eau de matériau étudiée

Sol	Teneur en eau w (%)
Matériau calcaire	1.01

- **Interprétation des résultats**

Selon les résultats obtenus, le calcaire utilisé présente une teneur en eau naturelle très faible. Ceci est dû au fait que c'est un matériau rocheux, prélevé en période sèche.

### III.3.2 La masse volumique des sols

#### III.3.2.1 La masse volumique sèche $\rho_d$ par pesée hydrostatique (NF P 94-064)

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

L'essai consiste à peser les échantillons de sols à l'air libre, puis à établir une deuxième pesée après paraffinage, et enfin, repeser le tout plongé dans l'eau (NF P 94-064, 1993).

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

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

**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 = 0,88 g/cm<sup>3</sup>.

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



**Figure III.5 :** Etape de la pesée hydrostatique




- **Présentation des résultats**

**Tableau III.4 :** Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.

Paramètre	1er essai	2éme essai	3éme essai	Moyenne
Mr(g)	43,3	48	38,3	43,2
Mrp(g)	44	48,2	38,5	43,56
M'rp(g)	22,6	29,4	23,6	25,5

La masse volumique sèche après calcul est :  $\rho_d = 2.4 \text{ g/cm}^3$ .

- La classification donnée par la norme (NF P 94-064,1993) :

- $\rho_d < 1.6$        Faible
- $1.6 < \rho_d < 1.8$        Moyenne
- $\rho_d > 1.8$        Dense

Selon la classification de la densité donnée par la norme (NF P 94-064), on constate que le calcaire étudié est dense.

### III.3.2.2 Masse volumique humide $\rho_h$ (NF P 94 – 053)

Après la détermination de la masse volumique sèche ( $\rho_d$ ) et la teneur en eau naturelle (w) on peut déduire la masse volumique humide  $\rho_h$  par la loi suivante :(NF P 94 – 053,1991)

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

\* Application numérique :  $\rho_h = 2.4 (1+0.0101)$

La masse volumique humide après calcul est :  $\rho_h = 2.42 \text{ g/cm}^3$ .

### III.3.2.3 Masse volumique des grains solides des sols $\rho_s$ par la méthode du pycnomètre (NF P 94-054)

La masse volumique  $\rho_s$  s'intéresse uniquement aux grains solides (sans vide), elle sert à déduire les caractéristiques du sol (indice des vides e, degré de saturation Sr). Une masse connue de l'échantillon dont les éléments de dimension inférieure à 2 mm séchée (par passage à l'étuve à 105°C) est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. Les bulles d'air libérées par réchauffage ; après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les particules solides (NF P 94-054, 1991). On peut calculer la densité des particules solides à l'aide de la formule suivante :

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

**Avec :**

$M_1$  : Masse du pycnomètre vide + bouchon ;

$M_2$ : Masse du pycnomètre + particule solide + bouchon ;

$M_3$ : Masse du pycnomètre + particule solide + eau + bouchon ;

$M_4$ : Masse du pycnomètre + eau + bouchon ;

$\rho_w$ : Masse volumique de l'eau égale à 1 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).



**Figure III.6 :** mode opératoire de l'essai au pycnomètre.

- **Présentation des résultats**

**Tableau III.5 :** Les résultats de la masse volumique des particules solides.

$M_1$	206.5 g
$M_2$	256.5 g
$M_3$	798.2 g
$M_4$	768.3 g
$\rho_s$	2.48 $\text{g}/\text{cm}^3$

### III.3.3 L'indice des vides et la porosité

#### III.3.3.1 L'indice des vides

Les sollicitations auxquelles sont soumis les sols produisent des variations de volume des vides  $V_v$  qui entraînent des variations du volume apparent  $V$ . Aussi préfère-t-on souvent rapporter le volume des vides non pas au volume apparent de l'échantillon mais au volume des particules solides, lequel peut être considéré comme invariant (Olivier, 1991).

On définit alors l'indice des vides par la relation suivante :

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

Après calcul on obtient un indice des vides égal à :  $e = 0.033$ .

#### III.3.3.2 La porosité

Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au volume total ; elle permet de connaître l'importance des vides c'est-à-dire, de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré (Olivier, 1991).

Elle peut s'exprimer en pourcentage ou sans dimension

$$n = \frac{V_v}{V} \quad \text{ou} \quad n = \frac{e}{e+1}$$

Après calcul on obtient une porosité égale à :  $n = 0.031$

- **Interprétation des résultats**

Selon les deux paramètres calculés, l'indice des vides  $e = 0.033$  et la porosité  $n = 0.031$  sont très faibles, ce qui signifie que le matériau étudié est compact (calcaire dense).

### III.3.4 Le degré de saturation

Il est défini comme le rapport du volume de l'eau au volume des vides ; il indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau.

Il s'exprime en pour-cent, peut varier de 0% à 100%.

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

Après calcul on obtient :  $S_r = 0.75 = 75\%$

**Tableau III.6 :** Interprétations des degrés de saturations établies par (Terzaghi, 1999).

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

• **Interprétation des résultats**

La valeur du degré de saturation de notre sol est comprise entre 51 et 75 %. Conformément au tableau précédent d'appréciation de TERZAGHI, notre calcaire est mouillé.

**III.3.5 Limite d'Atterberg (NF P 94-051)**

**III.3.5.1 Généralité**

Ces limites sont Déterminées selon la norme française (NF P94-051), cette norme destinée à la détermination de deux limites d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle et limite de plasticité du rouleau) ; les deux limites d'Atterberg s'appliquent aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400µm.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau caractéristiques des sols fins permettant entre autre d'établir leur classification et d'évaluer leur consistance. Ces valeurs de teneurs en eau permettent de caractériser également les différents états des sols.

- **L'état liquide :** le sol a une consistance très faible, il a l'aspect d'un fluide, il tend à se niveler suivant une surface horizontale. Les particules glissent facilement les unes sur les autres
- **L'état plastique :** le sol a une consistance plus importante, il tend plus à se niveler soumis à de faibles contraintes il se déforme largement sans se rompre. Il garde sa déformation après suppression des contraintes. Les particules ont mis en commun leurs couches adsorbées ; lorsqu'il y a déformation, les particules restent attachées les unes aux autres sans s'éloigner.
- **L'état solide (avec retrait) :** le sol retrouve sa forme initiale après suppression des contraintes (petites déformation élastiques).

- **L'état solide (sans retrait)** : les particules arrivent au contact en quelque points en chassant l'eau adsorbée ; le sol ne change plus de volume quand sa teneur en eau diminue.

(NF P 94-051, 1993)

### III.3.5.2 La détermination des limites d'Atterberg

L'essai s'effectue en deux phases :

- recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés, c'est la limite de liquidité ;
- recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure, c'est la limite de plasticité.

#### • Appareillage

- La réalisation de cet essai nécessite :
- Une balance de précision ;
- Appareillage de Casagrande avec accessoires (coupelles, outil de rainure) ;
- Spatules ;
- Etuve ;
- Tamis de 400  $\mu\text{m}$  de maille ;
- Tares.

#### • Détermination de limite de liquidité (WL)

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



**Figure III.7** : Détermination de la limite de liquidité WL.

- **Détermination de la limite de plasticité**

On forme une boulette à partir de la pâte préparée, puis on roule la boulette sur plaque lisse, à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3mm de diamètre.



**Figure III.8 :** Détermination de la limite de liquidité  $W_p$

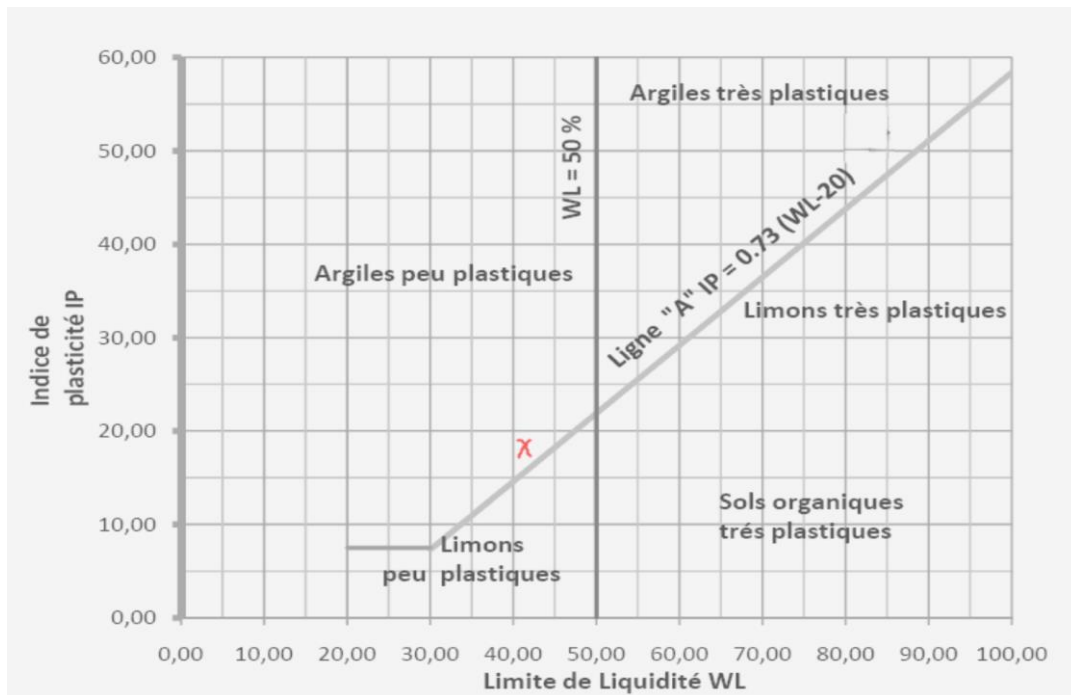
- **Détermination de l'indice de plasticité  $I_p$**

L'indice de plasticité est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols il s'exprime par la relation :  $I_p = W_l - W_p$

L'indice  $I_p$  définit l'étendue du domaine de plasticité, domaine pendant lequel on peut travailler le sol. Il a une grande importance dans tous les problèmes de géotechnique routière il est préférable qu'il soit le plus grand possible.

**Tableau III.7:** Les seuils d'argilosité selon  $I_p$  retenus par le GTR 1992.

L'indice de plasticité	Degré d'argilosité
$0 < I_p < 12$	Faiblement argileux
$12 < I_p < 25$	Moyennement argileux
$25 < I_p < 40$	argileux
$I_p > 40$	Très argileux



**Figure III.9 :** Diagramme de Casagrande (Patrice et al, 2000).

#### • Présentation et interprétation des résultats

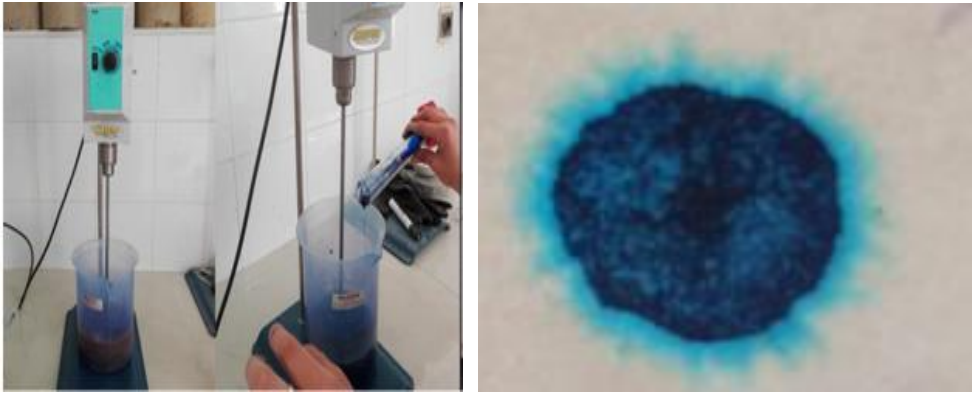
Nous avons remarqué que le matériau calcaire a des fines plutôt sableuses et granulaires et ne présente pratiquement aucune cohésion entre les grains même en présence d'eau. Donc, il n'existe pas de domaine plastique pour ce matériau.

#### III.3.6 Valeur de bleu de méthylène VBS (NF P 94-068)

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol, son application est récent.

Ce paramètre noté VBS, représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surface externe et interne des particules argileuse contenues dans la fraction du sol considéré, c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparait dans l'auréole (NF P 94-068,1998).



**Figure III.10 :** Mise en suspension des particules dans l'eau distillée, ajout du bleu de méthylène et prise de la tâche.

**Tableau III.8 :** Classe de sol en fonction du VBS (NF P 94-068,1998).

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

- **Présentation des résultats**

Le VBS est égal à :

$$\text{VBS} = \left(\frac{B}{M_0}\right) \cdot 100$$

Avec:

$M_0$  : Masse sèche de la prise d'essais ;  $M_0 = 50\text{g}$  ;

$B$  : La masse du bleu de méthylène se détermine à l'aide de l'équation suivante :  $B = V \cdot 0.01$ .

**Tableau III.9** : Récapitulatif des résultats de l'essai VBS

Paramètre	Valeur
Masse sèche de la prise d'essai après calcul	50g
Volume de la solution de bleu de méthylène	4cm <sup>3</sup>
Masse de bleu de méthylène B	0.04g
Valeur au bleu VBS	0.08

- **Interprétation des résultats**

Nous avons obtenu après calcul un VBS égal à 0.08, selon la norme (NF P 94-068), le VBS trouvé est inférieure à 0.1 ce qui signifie que le calcaire étudié est un sol insensible ou peu sensible à l'eau.

#### III.4 Préparation des échantillons (mélanges de calcaire et de déchets plastiques et verre)

Initialement, nous avons concassé et tamisé le calcaire de telle sorte à obtenir une granulométrie permettant la reconstitution des échantillons selon la classe granulaire (0/20) délimitée par le fuseau granulométrique destiné aux matériaux routiers (Figure III.3). Ensuite, nous avons reconstitué les mélanges par des ajouts de déchets plastiques et de verre ; avec des proportions égales.

**Remarque** : la faible densité du plastique comparativement au verre et au calcaire ne permettait pas d'inclure des quantités trop importantes, en effet ce dernier risquant d'occuper un volume trop important dans les mélanges, de ce fait les proportions sélectionnées pour les différents échantillons en fonction de la masse totale seront donc de :

- Un échantillon de calcaire seule.
- Un échantillon de calcaire + 5 % de déchets plastiques (2.5%) et de débris de verre (2.5%) ;
- Un échantillon de calcaire + 7 % de déchets plastiques (3.5%) et de débris de verres (3.5%) ;
- Un échantillon de calcaire + 10 % de déchets plastiques (5%) et de débris de verres (5%) ;

**III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'origine, l'identification ainsi que la préparation des échantillons reconstitués de granulats de calcaire et de déchets de verre et de plastiques, ce qui permettra par la suite une meilleure interprétation des résultats d'essais mécaniques réalisés. Seront entamés dans le prochain chapitre la première série d'essais mécaniques à savoir, les essais de compactage Proctor et les essais de portance CBR, permettant d'étudier l'aptitude au compactage ainsi que la portance des mélanges présentés.

## **CHAPITRE IV**

### **COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES**

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

La nature ne nous fournit pas toujours le terrain idéal pour la construction d'un ouvrage, dans la plupart des cas, le sol est meuble et présente des caractéristiques mécaniques insuffisantes.

Les méthodes d'améliorations des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformation. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains. Parmi ces techniques, figurent l'addition de produits chimiques dans le sol, l'utilisation de remblais de surcharges, et le compactage qui est la méthode la plus économique et la plus utilisée.

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

#### **IV.2 Définition du compactage**

Compacter un matériau, c'est réduire le volume des vides de ce matériau et réorganiser la structure des grains de manière à obtenir un assemblage plus stable. Cette opération qui s'appelle le compactage peut être obtenue par des sollicitations statiques (compactage statique), dynamiques (compactage dynamique), ou par vibrations (compactage in situ). L'opération de compactage conduit à une diminution des vides remplis d'air sans expulsion d'eau. C'est la différence fondamentale entre le compactage et la consolidation (Degoutte, 2002).

#### **IV.3 Objectif du compactage**

L'action du compactage se traduit par un rapprochement des grains du sol et une expulsion d'air (tassement). Le volume des grains diminue, la masse reste identique, donc la masse volumique apparente augmente, ainsi que la portance et le tassement.

Les principaux objectifs du compactage sont :

- Supprimer les déformations ultérieures (tassements de remblais, tassements différentiels, ornières, déformations de chaussée) ;

- Augmenter les caractéristiques mécaniques (portance et module de déformation, résistance à la compression et au poinçonnement, résistance au cisaillement) ;
- Assurer l'imperméabilité (traficabilité).

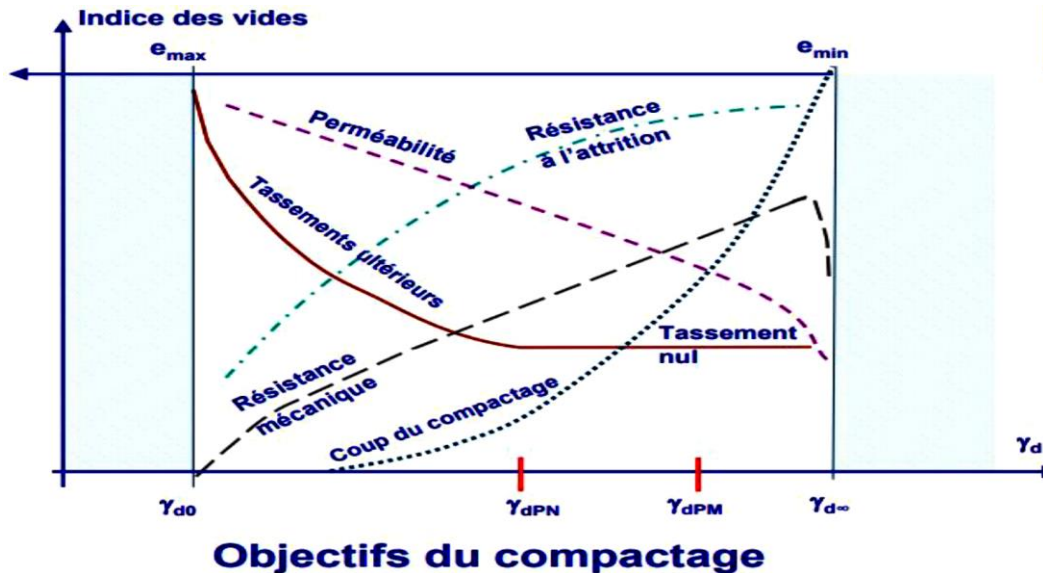


Figure IV.1: Objectifs de compactage des sols (<https://docplayer.fr/46208090>).

#### IV.4 Facteurs susceptibles d'améliorer le compactage

L'ingénieur américain Proctor (1933), qui a mis au point l'essai de compactage a montré que le compactage dépend spécialement des paramètres suivants :

##### IV.4.1 Influence de la teneur en eau et du poids volumique

Pour une énergie de compactage donnée, on peut tracer les variations du poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) en fonction de la teneur en eau  $w$ . La courbe obtenue appelée courbe de compactage ou diagramme de Proctor est une courbe en cloche qui représente un point haut que l'on appelle l'optimum Proctor. Cette valeur correspond à la densité maximale ainsi qu'à la teneur en eau optimum nécessaire. Si le sol est sec, plusieurs frottements apparaissent lors de l'opération. Inversement, si le sol est trop humide, une partie importante de l'énergie de compactage est absorbée par l'eau connue pour son incompressibilité, et donc sera mal répartie entre les grains (Laurent et al, 2016).

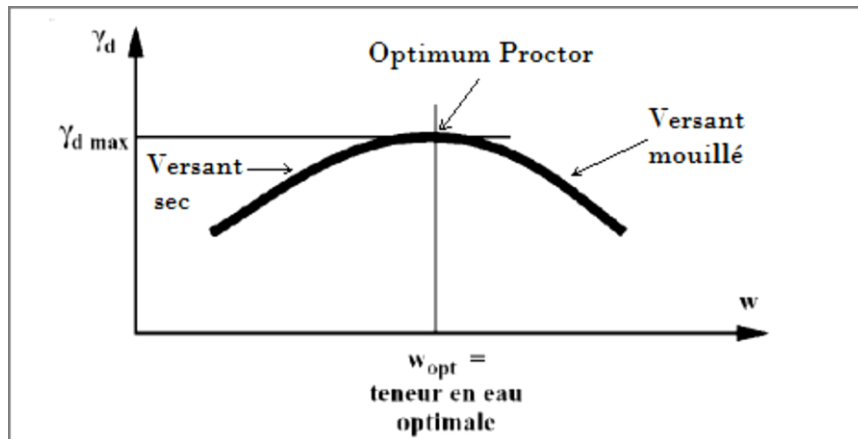


Figure IV.2 : allure d'une courbe de compactage (<https://docplayer.fr/46208090>).

#### IV.4.2 Influence de l'énergie de compactage

L'énergie de compactage est une énergie mécanique transmise à un volume de sol pour y réduire son indice des vides. Au laboratoire, cette énergie est produite par une masse (dame Proctor) dont l'intensité est caractérisée par la masse, la hauteur de chute et le nombre de coups. Sur chantier, cette énergie est engendrée par pression statique et vibrations, pétrissage statique ou impacts, selon le type de compacteur.

L'énergie de compactage a une influence très nette sur les courbes Proctor. Pour un sol donné, la densité sèche optimum croît avec l'énergie de compactage, tandis que la teneur en eau à l'optimum diminue. La ligne rejoignant les optimums s'appelle la ligne de l'optimum (Laurent et al, 2016).

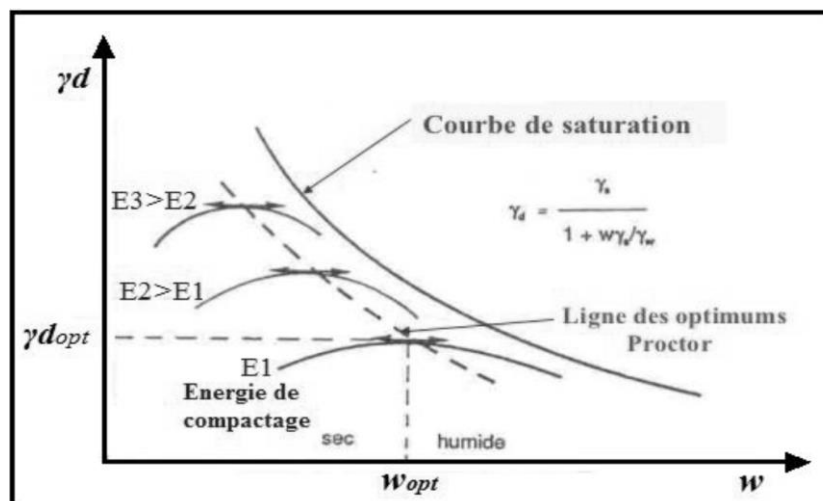
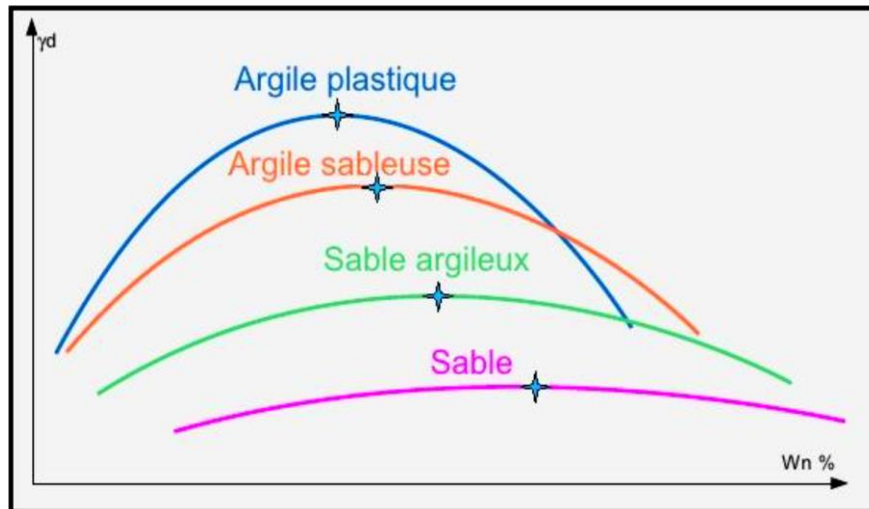


Figure IV.3 : Influence de l'énergie de compactage sur l'optimum Proctor (<https://docplayer.fr/46208090>).

### IV.4.3 Influence de la nature du sol

Un sol (fins) 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 (grenu) 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 (Laurent et al, 2016).



**Figure IV.4 :** Influence de la nature du sol sur la courbe Proctor (<https://docplayer.fr/46208090>).

#### Remarques

- Si la teneur en eau est trop élevée, l'eau absorbe l'énergie de compactage, et si la teneur en eau est trop faible, l'eau ne peut pas lubrifier les grains de sol.
- Si l'énergie de compactage augmente, le poids volumique optimal augmente et la teneur en eau optimale diminue.
- Les courbes de compactage sont plus aplaties pour les sols grenus peu sensibles à l'eau. Ces courbes admettent pour enveloppe une courbe appelée courbe de saturation, qui correspond à l'état saturé du sol.

### IV.5 Matériaux et méthodes de compactage

Les méthodes appliquées pour la reconstitution d'échantillons de sol consistent, soit à réaliser des essais de compactage au laboratoire sur des éprouvettes dans un moule Proctor, soit à les compacter statiquement (presse) à un état de compacité et de teneur en eau donné.

### **IV.5.1 Compactage statique**

Le compactage statique est effectué par l'introduction du matériau, préalablement mélangé avec une teneur en eau donnée, dans un moule œdométrique, puis le placer entre deux pistons mobiles ou l'un fixe et l'autre mobile. A l'aide d'une contrainte appliquée, ou un déplacement imposée, le compactage se fait à vitesse constante, en haut en bas pour avoir une meilleure compacité. L'intérêt majeur de ce procédé est d'obtenir des éprouvettes représentatives et homogènes (Robert et al ,1991).

### **IV.5.2 Compactage dynamique**

Pour simuler la procédure de compactage à adopter pour obtenir un certain niveau de compacité dans le chantier, plusieurs protocoles d'essais au laboratoire ont été développés depuis de nombreuses années ; ils diffèrent par le niveau d'énergie appliqué à l'échantillon de sol. Le principe de base reste le même ; il consiste à transmettre une série des chocs de forte énergie à la surface d'un sol initialement compressible et de faible portance afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques. L'essai Proctor, permet de déterminer l'évolution de la masse volumique du sol sec en fonction de la teneur en eau (Robert et al ,1991).

## **IV.6 L'essai Proctor**

### **IV.6.1 Définition et but de l'essai Proctor**

L'essai Proctor est un essai qui permet de déterminer la densité maximale du sol et des granulats analysés. Il est fréquemment utilisé en ingénierie géotechnique et en laboratoire d'analyse de sol. Il est ainsi appelé « Proctor » en référence à l'ingénieur Ralph R. Proctor (1933) qui au début des années 1930 a trouvé une solution pour déterminer la densité maximum des sols. Il trouva que dans un environnement contrôlé (pour un volume contrôlé), le sol pouvait être compacté jusqu'à un point où il n'y aurait plus d'air présent dans le sol.

### **IV.6.2 Principe de l'essai Proctor**

L'essai Proctor, consiste à compacter dans un moule normalisé, avec une énergie de compactage normalisée (dame de masse normalisée tombant d'une hauteur constante), un échantillon du matériau à différentes valeurs de teneur en eau pour en déduire :

- La teneur en eau maximale ;
- La densité sèche maximale correspondante.

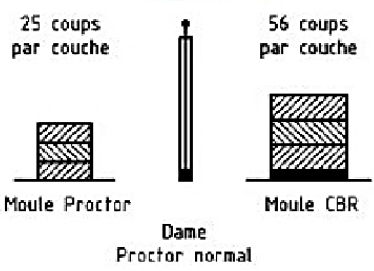
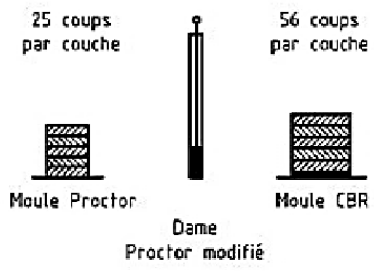
Plus clairement le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau a plusieurs teneur en eau et à le compacter selon un procédé et une énergie de compactage conventionnelles

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir d'essai dit :

- **Essai Proctor normal** : Le compactage n'est que moyennement poussé avec une énergie de compactage faible ; il est généralement utilisé pour les études de remblai en terre (barrage et digue), (NF P 94-093, 2014).
- **Essai Proctor modifié** : Le compactage est beaucoup plus intense, il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec des engins de compactage puissants ; c'est ordinairement par l'essai Proctor modifié que l'on détermine les caractéristiques de compactage (teneur en eau optimale, densité sèche maximale) des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes (NF P 94-093, 2014).

Le compactage a alors pour but de limiter les tassements.

**Tableau IV.1** : Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (NF P 94-093, 2014).

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      Moule CBR</p> <p>Dame Proctor normal</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      Moule CBR</p> <p>Dame Proctor modifié</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	

**Remarque :** Dans cette étude, nous avons réalisé les essais de compactage selon le processus du Proctor modifié, tel que prescrit par la norme (NF P 94 – 093).

#### IV.7 L'essai Proctor modifié (NF P 94-093)

##### IV.7.1 but de l'essai

L'essai Proctor modifié a pour but de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau tel que la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale, selon l'énergie de compactage appliqué à l'éprouvette (NF P 94-093, 2014).

##### IV.7.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter cinq échantillons d'un même matériau d'une manière définie et répétitive en faisant varier la teneur en eau. La mesure régulière de la teneur en eau et de la masse volumique sèche du matériau, une fois reportée sur un graphique, permet d'obtenir une courbe Proctor. L'optimum est alors déterminé par le point maximal de la courbe qui donne la teneur en eau optimale pour une masse volumique maximum (NF P 94-093, 2014).

##### IV.7.3 Matériels utilisés

Pour cet essai nous aurons besoin :

- D'un moule Proctor modifié ;
- Une dame Proctor modifié ;
- Un bac ;
- Truelles pour le malaxage ;
- Une règle à araser ;
- Une balance ;
- Une étuve.



**Figure IV.5 :** Matériels utilisés pour l'essai Proctor.

#### IV.7.4 Exécution des essais réalisés

- Une série d'essai Proctor modifié a été réalisée sur des échantillons de calcaire avec différentes proportions de déchets plastiques et de débris de verres, à savoir :
  - Calcaire seul.
  - Mélange de calcaire + 5% (2,5% déchets plastique + 2,5% débris de verre) ;
  - Mélange de calcaire + 7% (3,5% déchets plastique + 3,5% débris de verre);
  - Mélange de calcaire + 10% (5% déchets plastique + 5% débris de verre).
- Pour l'exécution de ces essais :
  - On prend 4.5kg du mélange (granulats routiers + déchets plastiques + débris de verre) préalablement préparé qu'on verse dans un bac.
  - On ajoute une certaine quantité d'eau proportionnelle au poids du mélange (les teneurs en eau doivent évoluer de 1.5 à 2%).
  - À l'aide de la truelle on malaxe bien le mélange.
  - On remplit le moule Proctor modifié normalisé en 05 couches puis après avoir versé chaque couche on compacte à l'aide de la dame Proctor modifié en 56 coups, en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter ; on procède de la même manière après la mise en place des autres couches.
  - Une fois le moule rempli, on arase la face supérieure avec une règle à araser, on comble les vides laissés à la surface.
  - A la balance, on évalue les masses des prélèvements puis on les fait passer à l'étuve au moins pendant 24h pour en déterminer les teneurs en eau.



**Figure IV.6 :** Exécution de l'essai Proctor.

### IV.7.5 Présentation des résultats

Pour chaque éprouvette compactée, il convient de calculer :

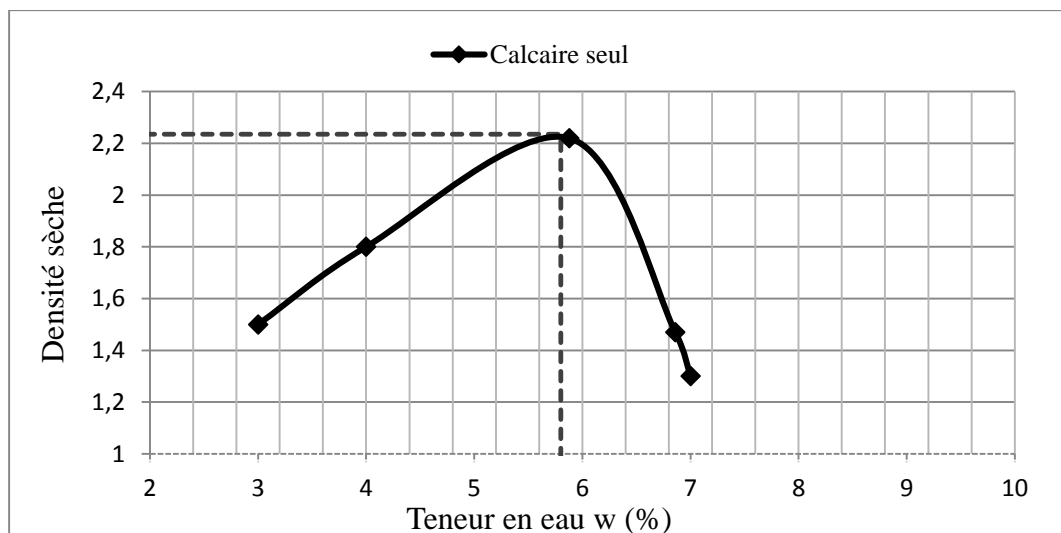
- La teneur en eau ;
- La densité sèche.

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

#### ➤ Échantillon de calcaire seul

**Tableau IV.2** : Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire seul.

<b>Teneur en eau w (%)</b>	3	4	5.88	6.86	7
<b>Densité sèche</b>	1.5	1.8	2.22	1.47	1.3

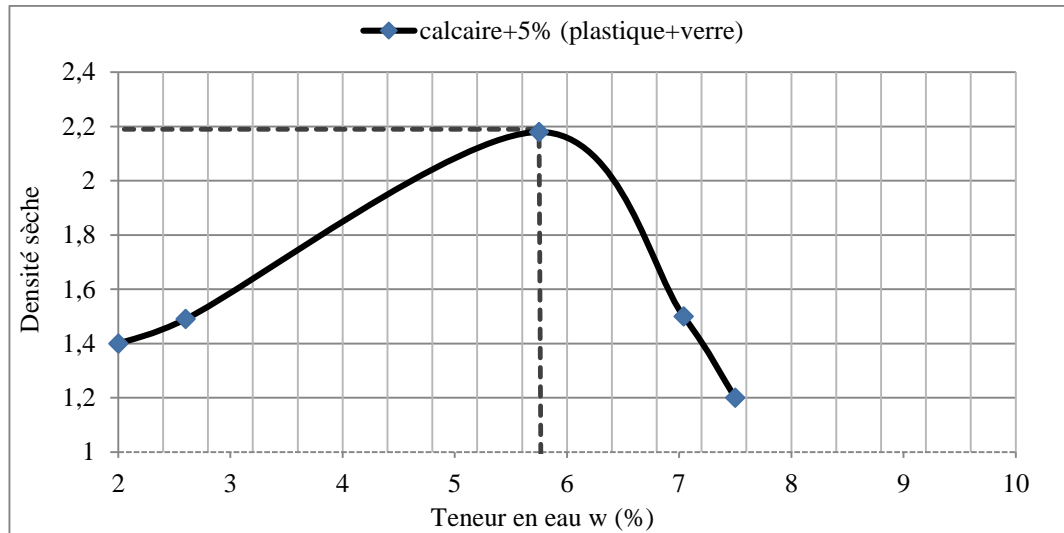


**Figure IV.7** : Courbe Proctor du calcaire seul.

#### ➤ Echantillon calcaire + 5% de (déchets plastiques + débris de verre)

**Tableau IV.3** : Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 5% de (déchets plastiques + débris de verre).

<b>Teneur en eau w (%)</b>	2	2.6	5.75	7.04	7.5
<b>Densité sèche</b>	1.4	1.49	2.18	1.5	1.2

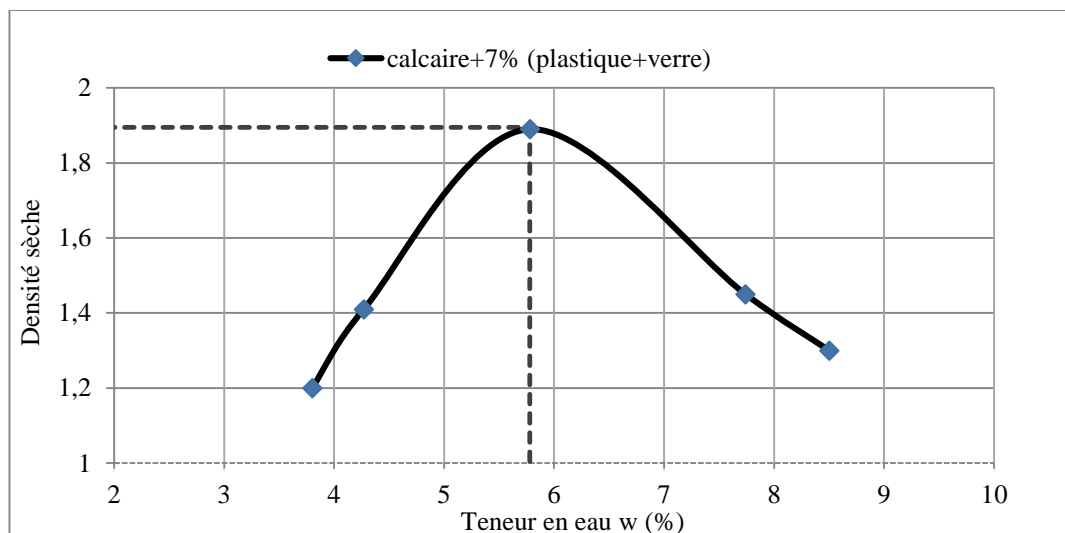


**Figure IV.8 :** Courbe Proctor du calcaire + 5% de (déchets plastiques + débris de verre).

➤ **Echantillon calcaire + 7% de (déchets plastiques + débris de verre)**

**Tableau IV.4 :** Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 7% de (déchets plastiques + débris de verre).

<b>Teneur en eau w (%)</b>	3.8	4.27	5.78	7.74	8.5
<b>Densité sèche</b>	1.2	1.41	1.89	1.45	1.3

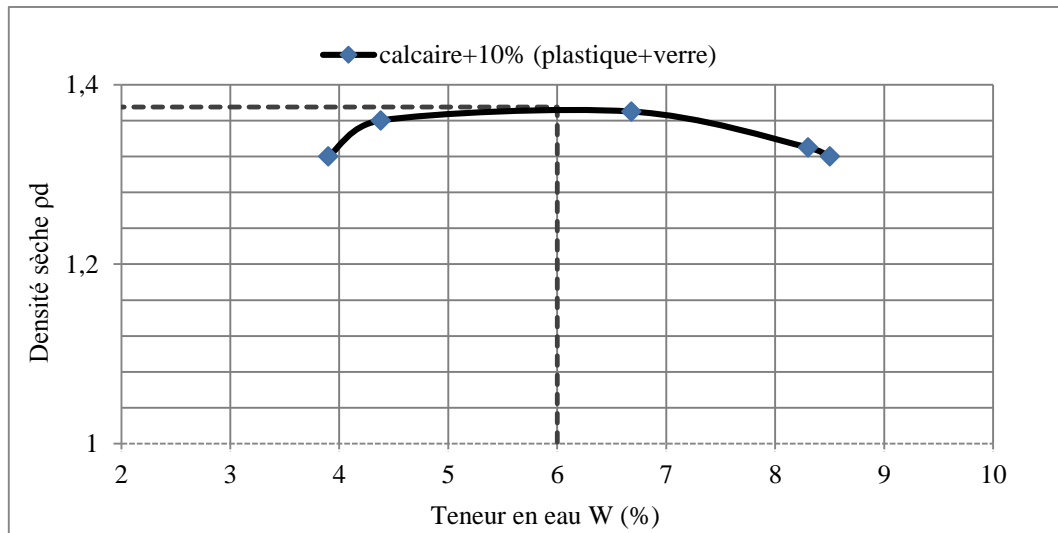


**Figure IV.9 :** Courbe Proctor du calcaire + 7% de (déchets plastiques + débris de verre).

➤ **Echantillon calcaire + 10% de (déchets plastiques + débris de verre)**

**Tableau IV.5 :** Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 10% de (déchets plastiques + débris de verre).

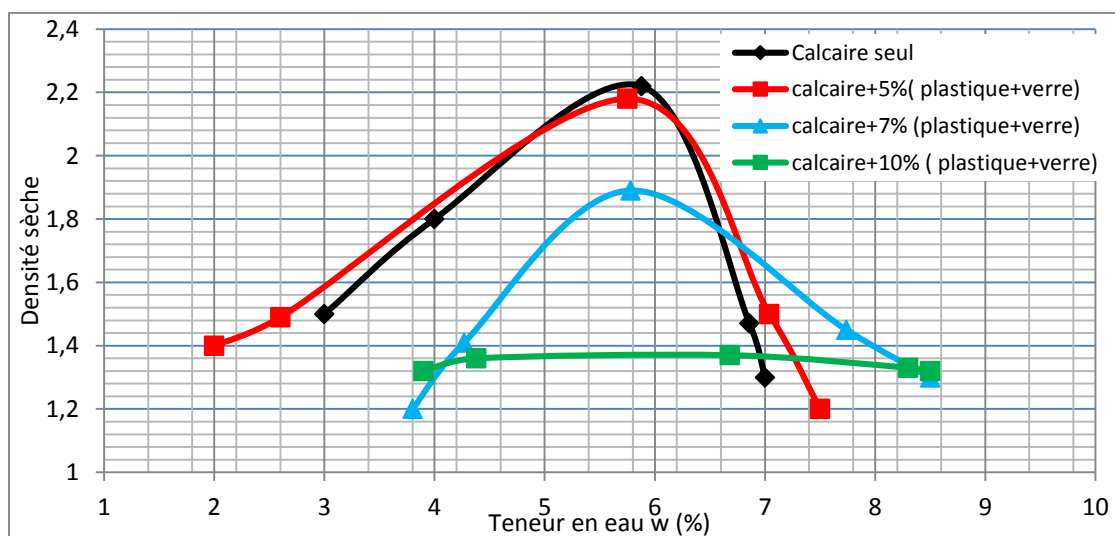
<b>Teneur en eau w (%)</b>	3.9	4.38	6.68	8.3	8.5
<b>Densité sèche</b>	1.32	1.36	1.37	1.33	1.32



**Figure IV.10 :** Courbe Proctor du calcaire + 10% de (déchets plastiques + débris de verre).

**IV.7.6 Interprétation des résultats**

**a) Superposition des courbes Proctor des différents échantillons**



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

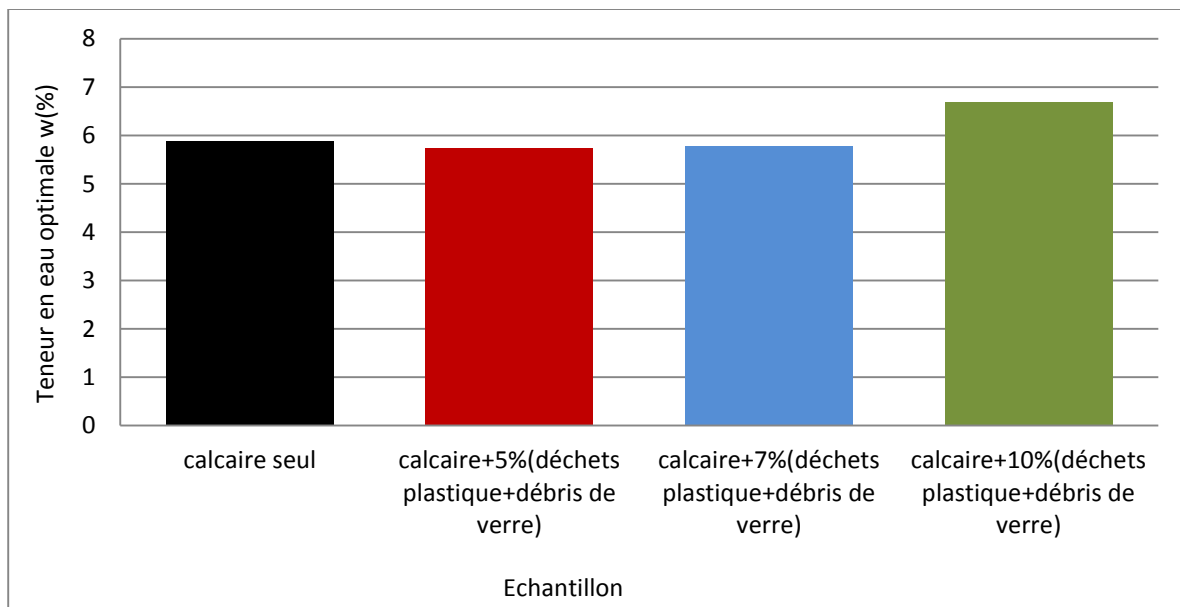
D'après la figure IV.11, nous constatons que les courbes Proctor obtenues deviennent de plus en plus moins bombées en fonction de l'ajout du plastique et du verre. Ceci permet de dire que les mélanges compactés deviennent moins sensibles à l'eau en augmentant leurs teneurs en plastique et en verre. En effet, ces déchets et débris sont des matériaux non absorbants à l'eau ainsi, plus leur quantité est importante dans l'échantillon, plus ce dernier devient moins influencé par l'eau. Ceci apparait clairement sur la courbe du mélange (calcaire + 10% du verre et plastique).

Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales obtenues sont résumées dans le tableau IV.6 et présentées sur les figures IV.12 et IV.13 :

**Tableau IV.6 :** Evolution des teneurs en eau et des masses volumiques sèches pour les différents mélanges.

Échantillons	Teneur en eau optimales $W_{opt}$ (%)	Densités sèches maximales
Calcaire seul	5.88	2.22
Calcaire+5%(plastique+verre)	5.75	2.18
Calcaire+7%(plastique+verre)	5.78	1.89
Calcaire+10%(plastique+verre)	6.68	1.375

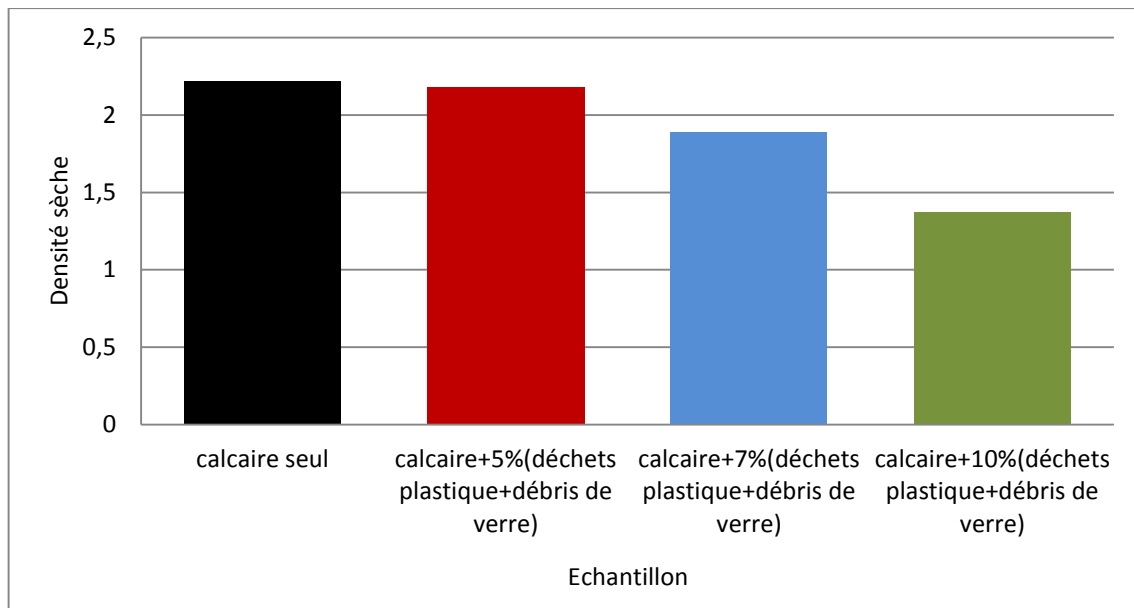
#### b) Évolution de la teneur en eau fonction de la teneur en (plastique + verre)



**Figure IV.12 :** Evolution de la teneur en eau des différents mélanges.

D'après la figure IV.12, la teneur en eau optimale obtenue au compactage du calcaire seul est de 5.88 %, l'ajout du mélange (verre + plastique) a influencé cette dernière. En effet, elle diminue avec l'ajout de 5% et 7% d'ajouts. Ceci peut se traduire par une économie d'eau précieuse. Au-delà de 7% d'ajout, la teneur en eau optimale commence à augmenter pour atteindre 6,68% à 10 % d'ajouts.

**c) Evolution des densités sèches en fonction de la teneur en (plastique + verre)**



**Figure IV.13 :** Evolution de la densité sèche des différents mélanges.

D'après la figure IV.13, on peut constater que le compactage des différents mélanges du calcaire+ (déchet plastique et débris de verre) montre des densités sèches qui diminuent de plus en plus avec l'augmentation d'ajout. En effet, elles passent de 2,22 pour le calcaire seul à 1,37 pour le mélange à 10% d'ajouts. D'une part, l'aspect feuilleté des déchets plastiques et du verre, occupant des proportions de plus en plus importantes dans les échantillons provoquent une désorganisation de la structure granulaire des mélanges, empêchant ainsi un réarrangement des grains optimal, ce qui produit plus de vide dans les échantillons et contribue à rendre leur structure de moins en moins dense. D'autre part, le plastique joue un rôle d'amortisseur, il absorbe (amorti) une partie de l'énergie de compactage ce qui réduit la transmission de l'énergie de compactage initiale (totale) aux grains compactés.

Du point de vue compactage, on peut qualifier les mélanges étudiés à des teneurs en plastique et en verre ne dépassant pas 7% comme matériaux acceptables et intéressants pour une utilisation dans les corps de chaussées de faible à moyen trafic. Ils développent des densités

sèches pouvant satisfaire les exigences des matériaux de chaussées utilisés dans la pratique par différentes entreprises présentant généralement, des densités variant de 1.8 à 2.6 selon la nature et l'intensité du trafic supporté par la chaussée. Par contre, un excès d'ajout (cas du mélange à 10% d'ajout), peut déstabiliser la structure des mélanges et la rendre moins dense (densités < 1,80) au compactage.

## **IV.8 Essai de portance Californien (California Bearing Ratio) (CBR) (NF P 94-078)**

### **IV.8.1 Définition et but de l'essai**

L'essai de portance CBR a été développé en 1929 par les ingénieurs T.E Stanton et O.J. Porter du département des routes de Californie. Il permet de réaliser la caractérisation mécanique des sols naturels et de sols compactés dans des remblais et des couches de forme, de fondations et de sous-fondations de routes et aéroports. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau. Il nous permet de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement.

Cet essai est utilisé partout dans le monde pour déterminer l'épaisseur des couches de fondation, établir une classification des sols et permettre d'étudier la traficabilité. Il nous donne un des paramètres indispensables dans les essais géotechniques précédant la construction.

### **IV.8.2 Principe de l'essai**

Les essais CBR sont effectués sur des échantillons compactés avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor (NF P 94-078, 1997)

Les essais C.B.R permettent, la détermination de :

- \* **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 teneur en eau dans lequel il est susceptible d'évoluer. Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux.
- \* **l'indice C.B.R. immédiat:** mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté généralement à l'énergie Proctor modifiée à sa teneur en eau à l'optimum Proctor. Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau.

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

L'indice recherché, est un nombre sans dimension, exprimé en pourcentage, définit le rapport entre les efforts de poinçonnement produisant un enfoncement donné dans le mélange étudié ; la capacité de portance du sol est d'autant meilleure que l'indice est plus élevé.

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

$$I (2.5) = \frac{\text{Effort de pénétration à 2.5mm d'enfoncement(KN)} \times 100}{13.35}$$

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

- Le gonflement linéaire relatif  $G$  dans le cas du CBR immersion est calculé par :

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

Avec :

- $\Delta h$  est le gonflement mesuré en (mm) ;
- $H$  : hauteur initiale de l'éprouvette.

### IV.8.3 Matériels utilisés

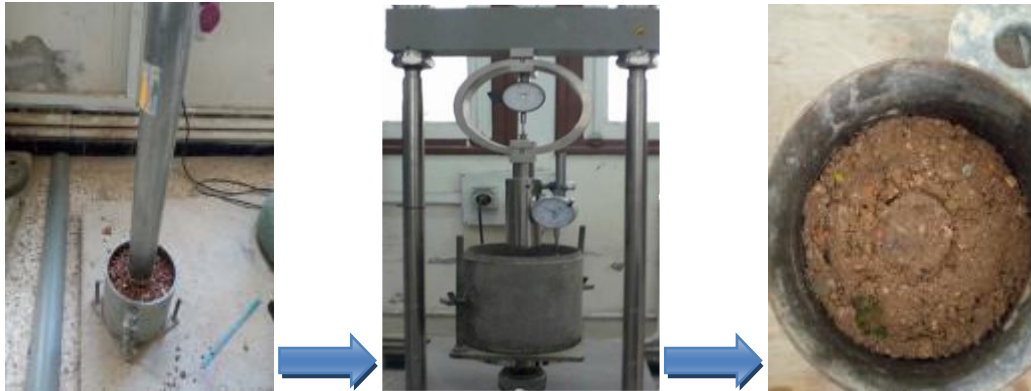
- Pour le compactage des éprouvettes à l'essai Proctor modifié :
  - Moule CBR ;
  - Disque d'espacement ;
  - Accessoires de compactage Proctor (dame Proctor modifié, règles à araser) ;
  - Surcharges annulaires (simule la charge due au trafic).
- La mise en immersion :
  - Bac suffisamment profond pour immerger 100 % des éprouvettes ;
  - Disque de gonflement perforé et papier filtre ;
  - Compateur de mesure du gonflement.
- Pour le poinçonnement
  - Presse de poinçonnement CBR.



**Figure IV.14 :** Matériels utilisés pour l'essai CBR.

#### IV.8.4 Exécution des essais réalisés

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



**Figure IV.15 :** Exécution de l'essai CBR avant immersion.

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

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



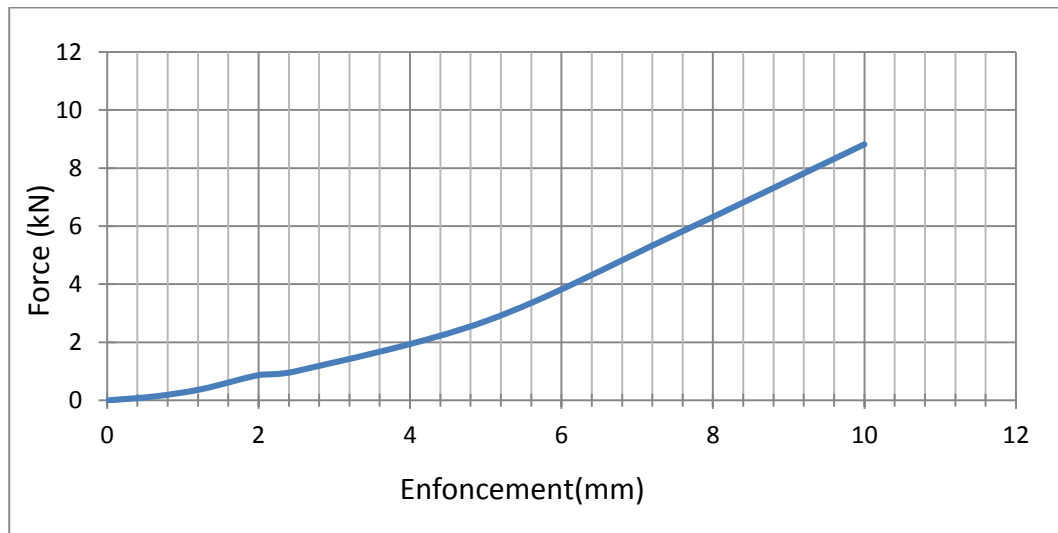
**Figure IV.16** : Exécution de l'essai CBR après immersion.

#### IV.8.5 Expression des résultats

Les essais CBR avant et après immersion, sont réalisés au laboratoire selon la norme française (NF P94-078), deux types d'échantillons ont été préparés, à savoir :

- Calcaire seul
- Calcaire+7% de mélange verre et plastique (échantillon ayant présenté un meilleur résultat de l'essai Proctor)

#### • Calcaire seul



**Figure IV.17** : Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immédiat

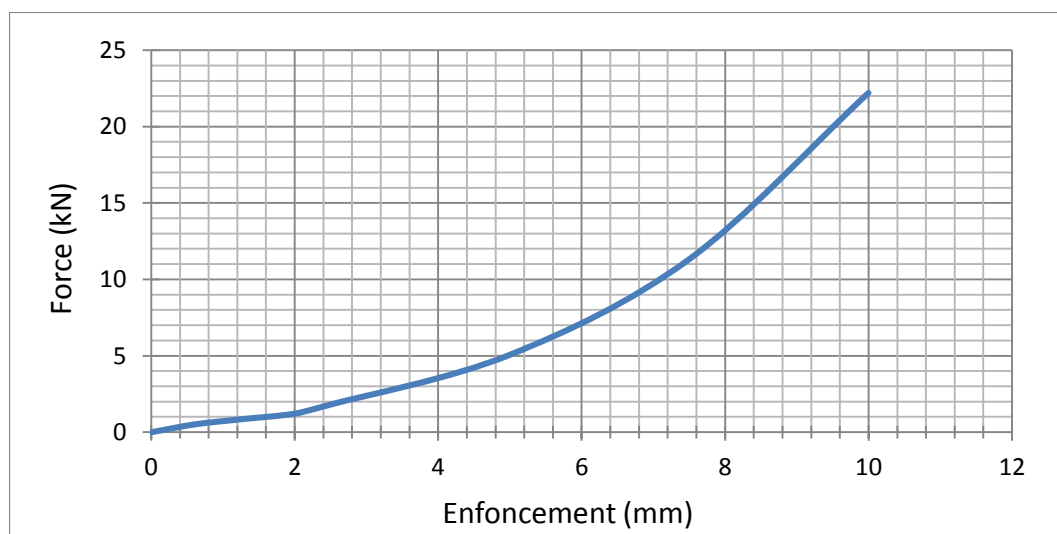


**Figure IV.18** : Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR après immersion

**Tableau IV.7** : Résultats d'essai CBR pour le calcaire seul

Echantillon	Gonflement relatifs G (%)	Indice CBR immédiat(%)			Indice CBR après immersion(%)		
		I (2.5)	I(5)	CBR <sub>imm</sub>	I(2.5)	I(5)	CBR
Calcaire seul	0						
		7.558	13.646	13.646	5.497	12.844	12.844

- Calcaire + 7% (déchets plastique et débris de verre)



**Figure IV.19** : Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immédiat



Figure IV.20 : Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR après immersion

Tableau IV.8 : Résultats d'essai CBR pour le calcaire + 7% (déchets plastique et débris de verre)

Echantillon	Gonflement relatifs G (%)	Indice CBR immédiat(%)			Indice CBR après immersion(%)		
		I (2.5)	I(5)	CBR <sub>imm</sub>	I(2.5)	I(5)	CBR
calcaire + 7% (déchets plastique et débris de verre)	≈ 0	13.57	25.32	25.32	8.933	22.362	22.362

IV.8.6 Interprétation des résultats

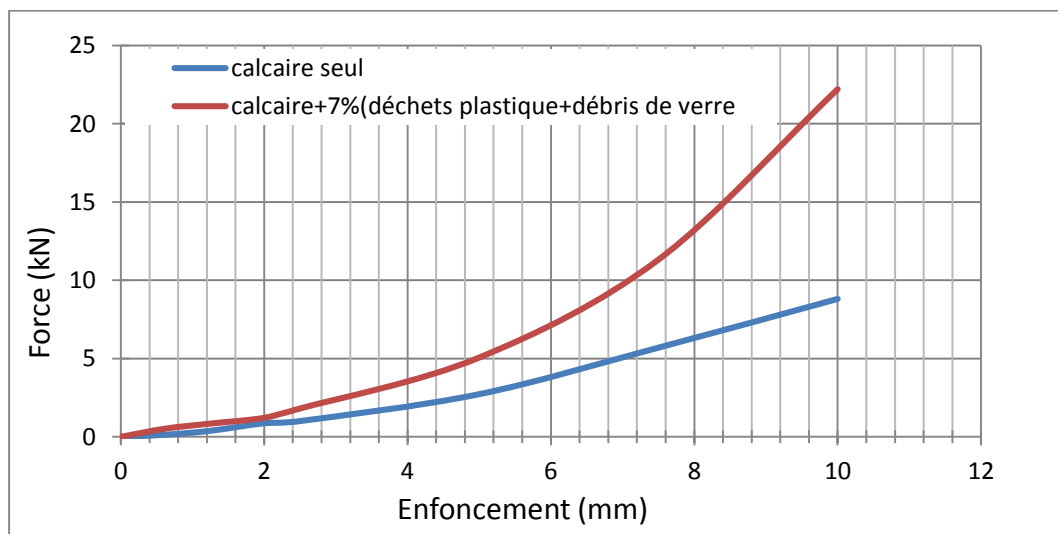
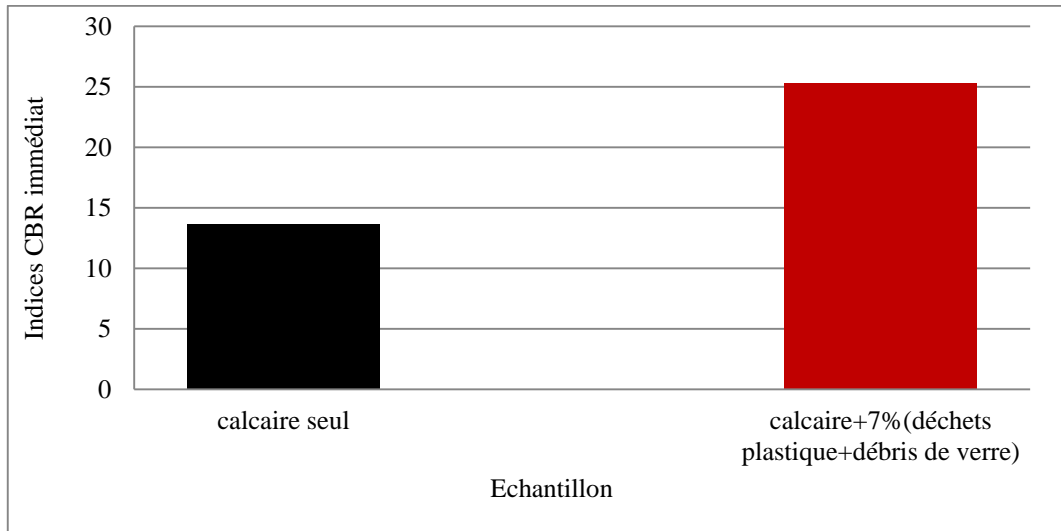
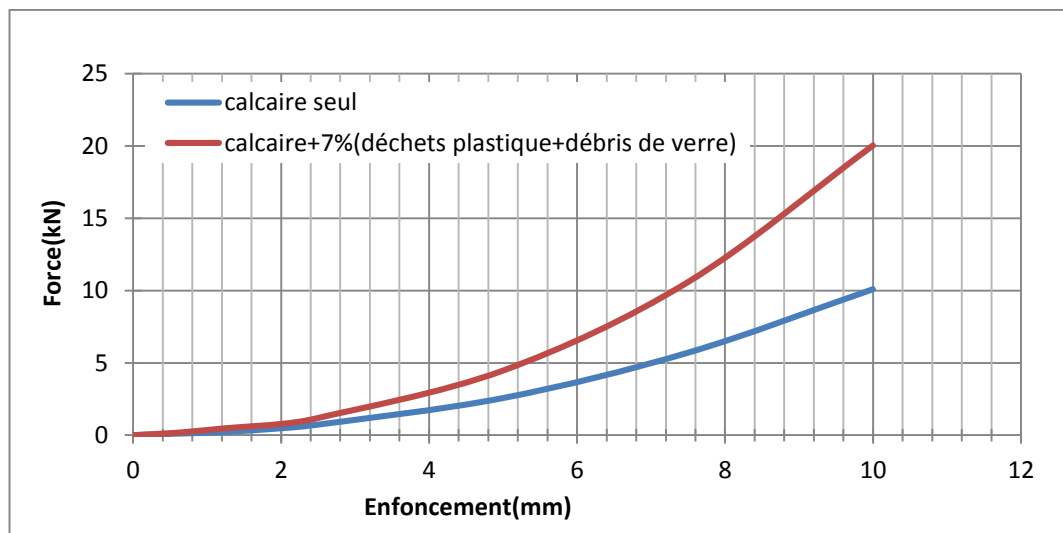


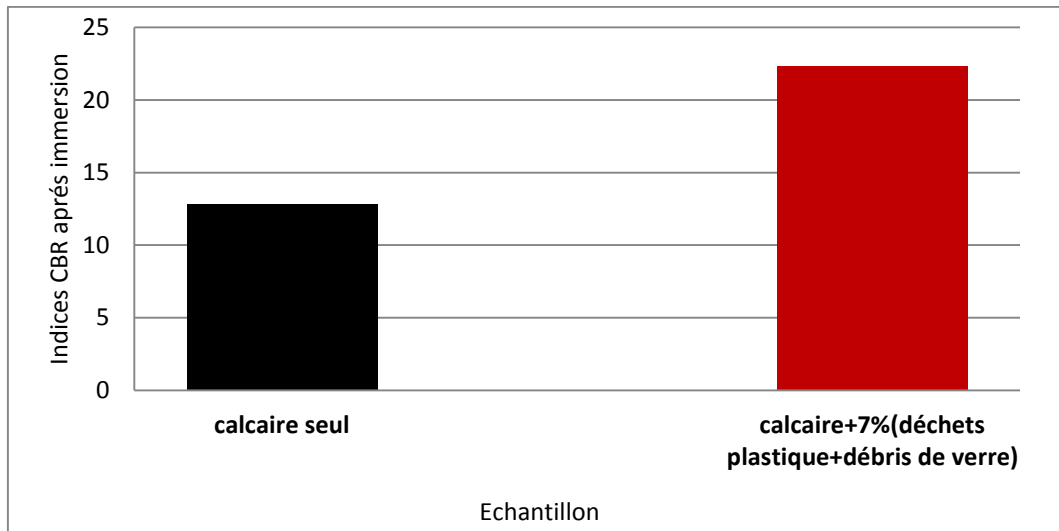
Figure IV.21 : Courbe enfoncement-forces de l'essai CBR immédiat



**Figure IV.22 :** Evolution des indices CBR immédiat en fonction de la teneur en (Plastiques+verre)

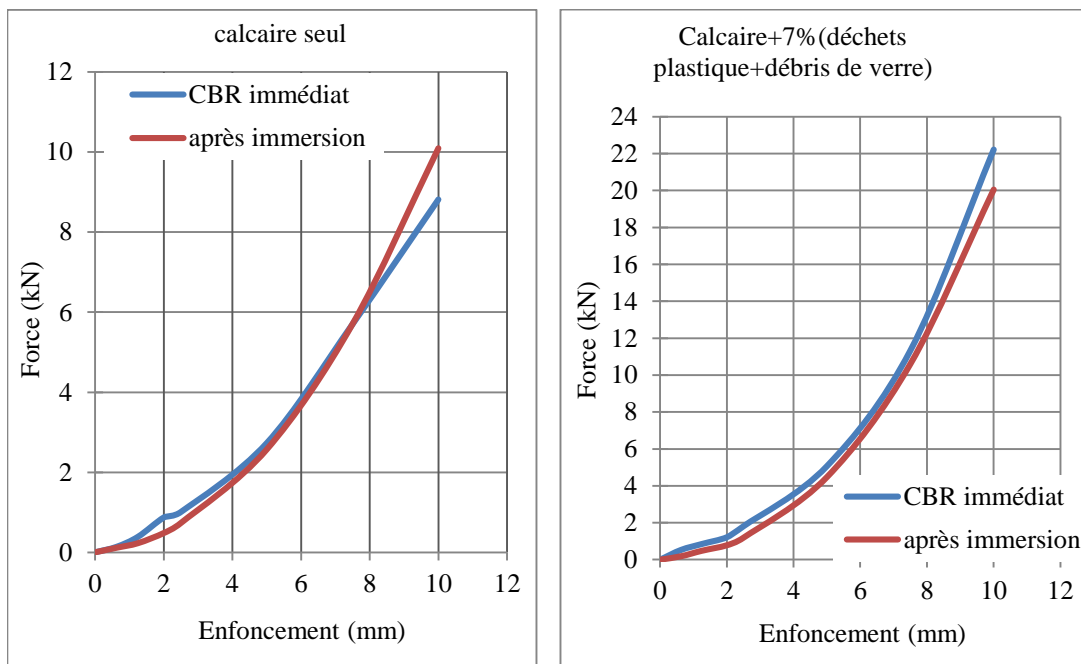


**Figure IV.23 :** Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR après immersion

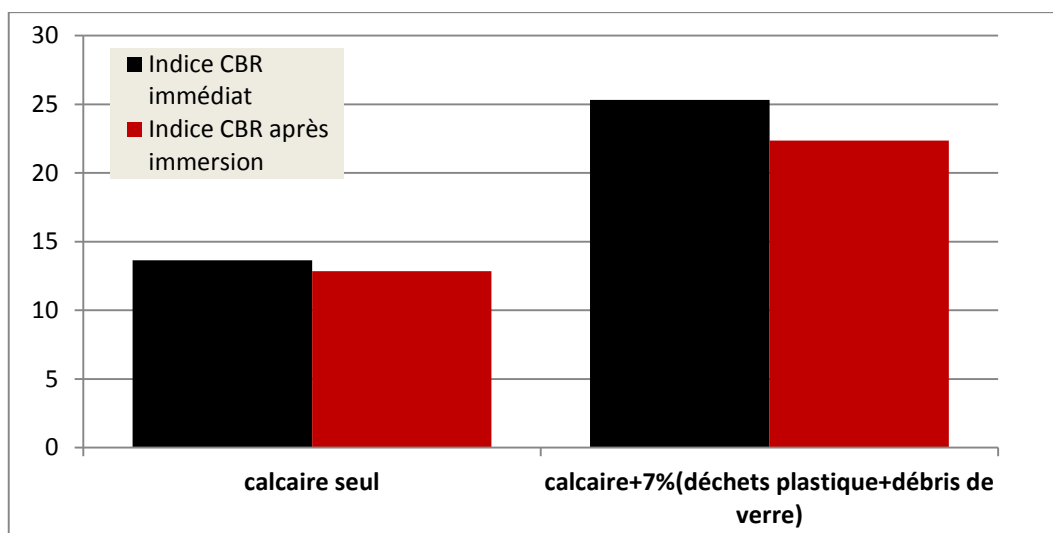


**Figure IV.24 :** Evolution des indices CBR après immersion en fonction de la teneur en (plastiques+verre)

Les résultats des essais CBR présentés sur les figures (IV.22 et IV.24) montrent que l’ajout de 7% du mélange (déchet plastique + débris de verre), apporte une amélioration notable à la portance des mélanges avant et après immersion. En effet, l’indice CBR du calcaire seul passe de 13,64 et 12,84 respectivement avant et après immersion à 25,32 et 22,36 pour les mélanges à 7% d’ajouts de plastiques et du verre. On peut dire que la structure des mélanges présente une meilleure résistance au poinçonnement (Pratiquement doublée).



**Figure IV.25 :** courbes comparatives des indices CBR immédiat et après immersion des différents mélanges.



**Figure IV.26 :** Evolution des indices CBR immédiat et après immersion des différents échantillons

A titre de comparaison, les résultats présentés sur les figures IV.25 et IV.26 permettent de constater que la portance des échantillons étudiés diminue après immersion (présence d'eau), ce qui est souvent évident dans le cas des sols et des roches naturelles. Cela s'explique par l'altérabilité du calcaire au contact de l'eau. Toutefois, la diminution de la portance des échantillons en mélanges après immersion n'est pas vraiment importante (environ 3%). On peut dire ainsi que les échantillons étudiés du point de vue portance, peuvent présenter une certaine stabilité face aux variations climatiques (état sec et état humide).

En termes de gonflement, les mélanges étudiés peuvent être classés non gonflants. En effet, les indices de gonflement relatifs  $G$  pour tous les mélanges sont pratiquement nuls. Ceci est un avantage précieux pour un matériau routier, dont il n'est toléré que de faibles gonflements.

**Tableau IV.9 :** Classes de portance aux essais CBR (CEBTP, 1984).

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

En se référant aux classes de portances présentées dans le tableau IV.9, nous pouvons classer le calcaire étudié comme matériau de portance moyenne (S3).

L'ajout des déchets plastiques et débris de verres à l'état sec et en présence d'eau à bien amélioré la portance du calcaire, passant d'une portance moyenne à une portance élevée (S4).

De telles caractéristiques leurs permettent de répondre largement aux exigences des normes en vigueur, pour une utilisation dans le corps de chaussées.

#### **IV.9 Conclusion**

L'objectif de ce chapitre était de voir l'impact de l'ajout du plastique et du verre sur l'aptitude au compactage et la portance des matériaux étudiés.

En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés mélange de calcaire et (déchets plastique + débris de verre) ont présenté dans certains cas des comportements très intéressants. Les densités sèches développées sont souvent supérieures à 1,8 à des teneurs en eau acceptables. Leur portance et leur stabilité au gonflement sont également très intéressantes même dans le cas des plus mauvaises conditions hygrométriques. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont ainsi très satisfaisantes et vérifient les conditions exigées par les normes. Leur utilisation en couches de chaussées est fortement envisageable notamment dans le cas des chaussées de faibles à moyen trafic.

Toutefois, connaître le comportement des mélanges présentés, sous d'autres types de sollicitations est plus qu'indispensable pour confirmer et préciser leur utilisation. Ce qui fera l'objet des prochains chapitres.

## CHAPITRE V

### ESSAIS ROUTIERS

#### V.1 Introduction

La classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, s'appuie sur des critères représentatifs des problèmes posés par la construction et le comportement des ouvrages. Certaines caractéristiques mécaniques des granulats déterminées précédemment par les différents essais mécaniques cités restent insuffisantes ; des paramètres plus significatifs des problèmes posés par l'emploi des matériaux dans la construction des remblais et des couches de forme ont été introduits tels que les coefficients Los Angeles (LA), micro-Deval en présence d'eau (MDE), coefficients de fragmentabilité (FR) et dégradabilité (DG) pour apprécier le caractère évolutif des matériaux sous sollicitations mécaniques et climatiques depuis l'extraction jusqu'à la mise en service.

#### V.2 Essai Micro Deval (NF P 18-571)

##### V.2.1 Définition et but de l'essai

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 (NF P18-571, 2011).



**Figure V.1 :** Machine d'essai Micro-Deval.

### V.2.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produits dans la machine Micro-Deval par les frottements réciproques et les chocs modérés des granulats. (NF P18-571, 2011).

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires (4- 6.3 mm ; 6.3-10 mm ; 10-14 mm ; 10-25 mm ; 16-31.5 mm et 25-50 mm) de la granularité du matériau, tel qu'il sera mis en œuvre. Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm une charge abrasive est utilisée.

### V.2.3 Exécution de l'essai

- Laver le matériau et le sécher totalement à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;
- Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie. La masse (M) de l'échantillon nécessaire pour l'essai est de 500 g pour les granulats (4 - 14 mm) et de 10 kg pour les granulats (15 - 50 mm) ;
- Mettre dans le cylindre 500g de notre matériau de fraction (6.3-10) ;
- Ajouter les poids de la charge abrasive selon le type de classe granulaire ;

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

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

- Complete avec 2,5 litres d'eau ;
- Régler la machine à 1200 tours ;
- A la fin de l'essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac. Laver soigneusement l'intérieur du cylindre, en recueillant l'eau et les particules dans le bac.
- Emboiter les tamis de 8mm et de 1,6mm, laver et tamiser manuellement l'ensemble (matériau + eau + billes en acier) sur les deux tamis dans un bac. La charge abrasive sera retenue sur le tamis de 8mm avec peut être une partie du matériau ; une autre partie du matériau sera retenue sur le tamis de 1,6mm et le reste (tamisât du tamis 1.6mm) sera recueilli dans le bac. Retirer la charge abrasive du matériau sur le tamis 8mm. Sécher le refus au tamis 1,6 mm à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante ;

- Peser soigneusement ce refus de masse ( $M'$ ).



**Figure V.2 :** Mode opératoire de l'essai micro Deval.

- Calcule de coefficient MDE par la loi suivante :

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

**Avec :**

**MDE:** coefficient Micro-Deval;

**M :** Masse sèche totale de l'échantillon soumis à l'essai,  $M= 500\text{g}$  ;

**M' :** Masse sèche du refus au tamis de 1.6mm.

#### **V.2.4 Présentation des résultats**

Nous avons réalisé deux essais Micro-Deval à savoir :

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verre).

##### ➤ **Calcaire seul**

$$\text{MDE} = \frac{500-402.915}{500} \times 100$$

**Tableau V.2 :** Calcul de coefficient Micro-Deval de calcaire seul.

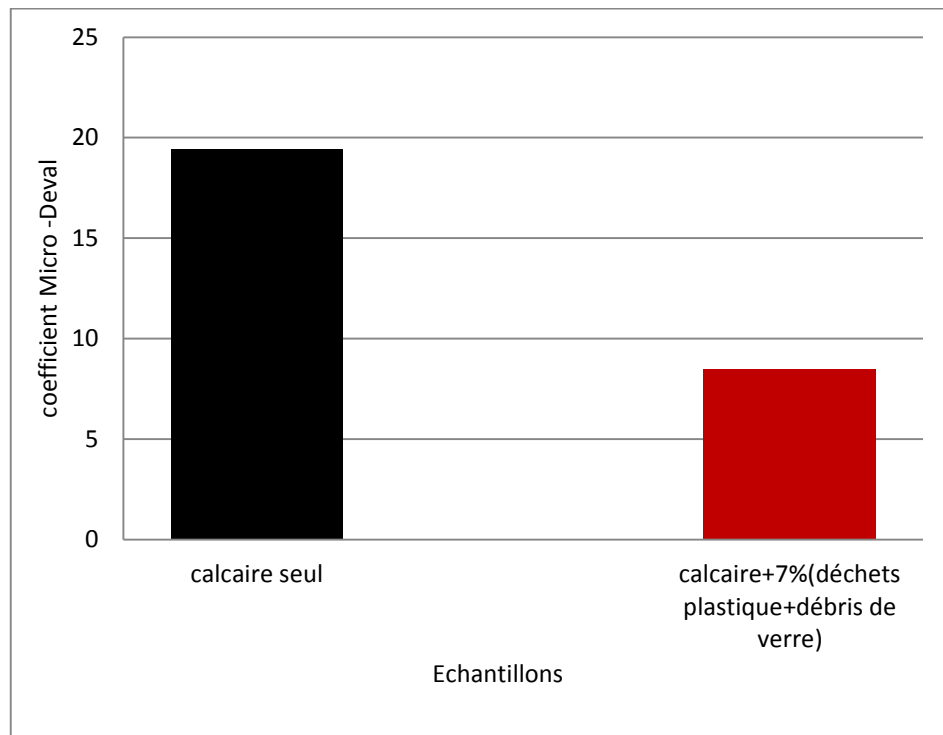
<b>M(g)</b>	<b>M' (g)</b>	<b>MDE (%)</b>
500	402.915	19.41

➤ **Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verre)**

$$\text{MDE} = \frac{500 - 457.5}{500} \times 100$$

**Tableau V.3 :** Calcul de coefficient Micro-Devalde calcaire+7% (déchet plastique+débris de verre)

M(g)	M'(g)	MDE(%)
500	457.5	8.5



**Figure V.3 :** Evolution du coefficient MDE des différents échantillons.

**Tableau V.4 :** Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval (NF P18-571, 2011).

Coefficient MDE	Valeur
<10	Très bon à bon
10 à 20	Bon à moyen
20 à 35	Moyen à faible
>35	médiocre

### V.2.5 Interprétation des résultats

D'après les résultats des essais Micro-Deval présentés dans les tableaux V.2 et V.3, et récapitulés sur la figure V.3 ; on constate que l'échantillon de calcaire seul a présenté un coefficient MDE de 19.41% entre 10 à 20 (voir tableau V.4), ce qui signifie que nous sommes en présence d'un matériau d'une moyenne à bonne résistance à l'usure.

Avec l'ajout des déchets plastiques et des débris de verres, une certaine amélioration du coefficient MDE est constatée. En effet, le coefficient MDE diminue de 19.41% pour le calcaire seul à 8.5% (< 10%) pour le calcaire plus l'ajout de 7% de (déchet plastiques + débris de verres). Ceci peut être dû, à la structure lisse (moins de frottement) et résistante en présence d'eau (non sensible à l'eau) des débris de verre et de déchets plastiques. Ces derniers en particuliers peuvent même réduire le frottement et amortir les contacts entre les grains des différents matériaux.

On peut conclure ainsi, que l'ajout des déchets plastiques et des débris de verre a amélioré la résistance à l'usure du mélange. Ce dernier passe d'une moyenne à une très bonne résistance à l'usure.

### V.3 Essai Los Angeles (NF P18-573)

#### V.3.1 Définition et but de l'essai

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 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 (NF P18-573, 2010).



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

### V.3.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles.

La granularité initiale du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes granulaires suivantes (4 - 6,3mm ; 6,3 - 10mm ; 10 - 14mm ; 10 - 15mm; 16 - 31,5mm et 15 - 50mm).

### V.3.3 Exécution de l'essai

- Mise en place de l'échantillon  $M = 5000g$  de notre matériau de fraction (6.3 -10) dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie voir tableau suivant :

**Tableau V.5** : 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	$3080 \pm 20$	$5000 \pm 2$
6.3 - 10		9	$3960 \pm 25$	$5000 \pm 2$
10 - 14		11	$4840 \pm 25$	$5000 \pm 2$
10 - 25	10 - 16	11	$4840 \pm 25$	3000
	16 - 25	11	$4840 \pm 25$	2000
16 - 31.5	16 - 25	12	$5280 \pm 25$	2000
	25 - 31.5	12	$5280 \pm 25$	3000
25 - 50	25 - 40	12	$5280 \pm 25$	3000
	40 - 50	12	$5280 \pm 25$	2000

- Replacer le couvercle et serrer les boulons de fixation ;
- Actionner la machine à 500 rotations, (sauf pour la classe 15-50 mm, c'est 2000rotations), à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min et 33 tr/min ; au cours de l'essai, le matériau subira des chocs de boulets en rotation ;
- Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat ;
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération. Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle, puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant ;
- Peser ce refus une fois séché, soit  $M'$  le résultat de la pesée.



**Figure V.5 :** Mode opératoire de l'essai Los Angeles.

- Calcule de coefficient LA par la loi suivante :

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

**Avec :**

**LA:** coefficient Los Angeles;

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

**M' :** Masse sèche du refus au tamis de 1.6mm.

### V.3.4 Présentation des résultats

Nous avons réalisé deux essais Los Angeles à savoir :

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verre).

#### ➤ Calcaire seul

$$LA = \frac{5000-3889.477}{5000} \times 100$$

**Tableau V.6 :** Calcul de coefficient Los Angeles de calcaire seul.

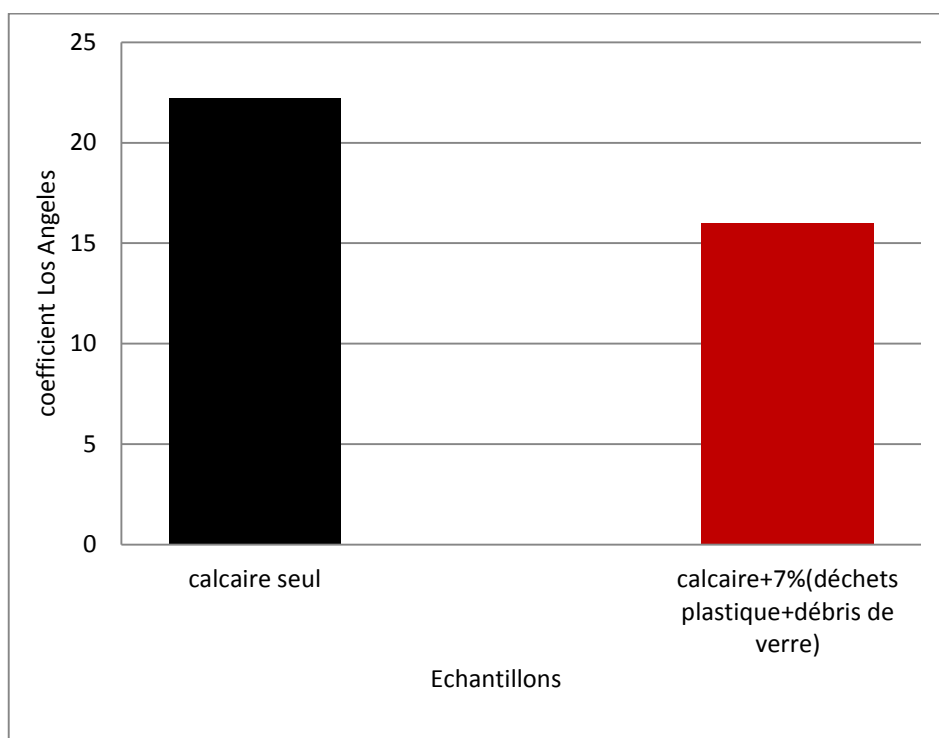
M(g)	M'(g)	LA(%)
5000	3889.477	22.21

➤ **Calcaire + 7 % (déchet plastique + débris de verre)**

$$LA = \frac{5000 - 4200}{5000} \times 100$$

**Tableau V.7 :** Calcul de coefficient Los Angeles de calcaire + 7% (déchet plastique + débris de verre)

M(g)	M'(g)	LA(%)
5000	4200	16



**Figure V.6 :** Evolution de coefficient LA des différents mélanges.

### V.3.5 Interprétation des résultats

Les résultats des essais Los Angeles présentés sur la figure V.6, permettent de constater une diminution du coefficient en fonction des ajouts. En effet, LA passe de 22.21% pour le calcaire seul à 16% après l'ajout de 7% de (déchets plastiques + débris de verres) ; sachant que plus le coefficient LA est faible, plus le granulats est résistant à la fragmentation par chocs. Cette amélioration peut être due à la présence des déchets plastiques qui ne sont pas vraiment influencés par les sollicitations (chocs, frottement) des essais réalisés et qui peuvent également amortir l'effet des chocs et des frottements entre les grains de calcaire.

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

### V.4.1 définition et but de l'essai

L'essai de fragmentabilité, exprimé par le coefficient de fragmentabilité (FR) permet de traduire l'évolution continue de la granularité de certains matériaux rocheux.

C'est l'un des paramètres d'identification retenu dans la classification des matériaux pour remblais et couches de forme d'infrastructures routières. Sa détermination est en particulier nécessaire pour préciser le classement des roches argileuses (marnes, argilites, schistes sédimentaires,...) et des roches siliceuses, magmatiques et métamorphiques altérées ou peu résistantes. L'essai a donc pour objectif, l'étude de la fragmentabilité d'un matériau (roches argileuses) sous sollicitations mécaniques (pilonnage) pour procéder à son classement par rapport aux valeurs de référence (NF P 94-066, 1992).

### V.4.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction de la dimension des grains en-dessous de laquelle se situe 10% de la masse d'un matériau constitué de grains retenus en totalité entre deux tamis de mailles de taille donnée soumis à un pilonnage conventionnel (NF P 94-066, 1992).

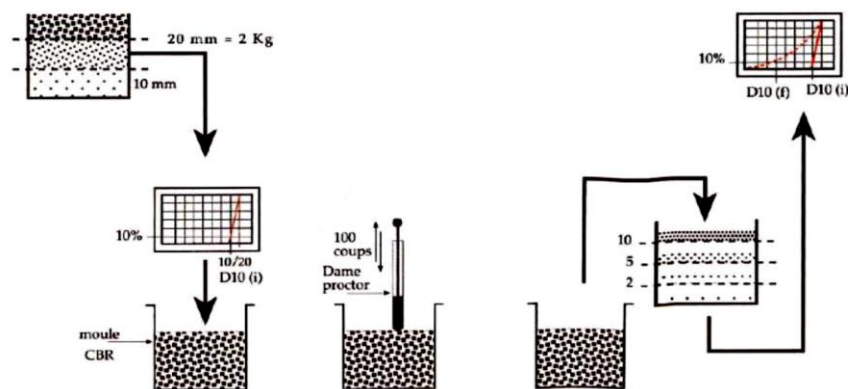


Figure V.7 : l'essai de fragmentabilité (SETRA, 1996)

### V.4.3 Exécution de l'essai

- Prendre un échantillon de 2 kg de classe granulatoire 10/20. La fraction du matériau est déduite par pesées des refus à travers plusieurs tamis (10,16 et 20mm) constituant cette classe ;
- Mélanger et réhomogénéiser l'échantillon puis l'introduire dans un moule CBR, pilonné en 100 coups de dame Proctor normal ;
- Une fois l'opération terminée, l'échantillon est récupéré et tamisé au tamis 1, 2, 5,10 et 16mm.

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

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

Avec :

**D<sub>10</sub>** : Diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât

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

**Tableau V.8** : Valeurs de références (NF P 94-066,1992).

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

#### V.4.4 Présentation des résultats

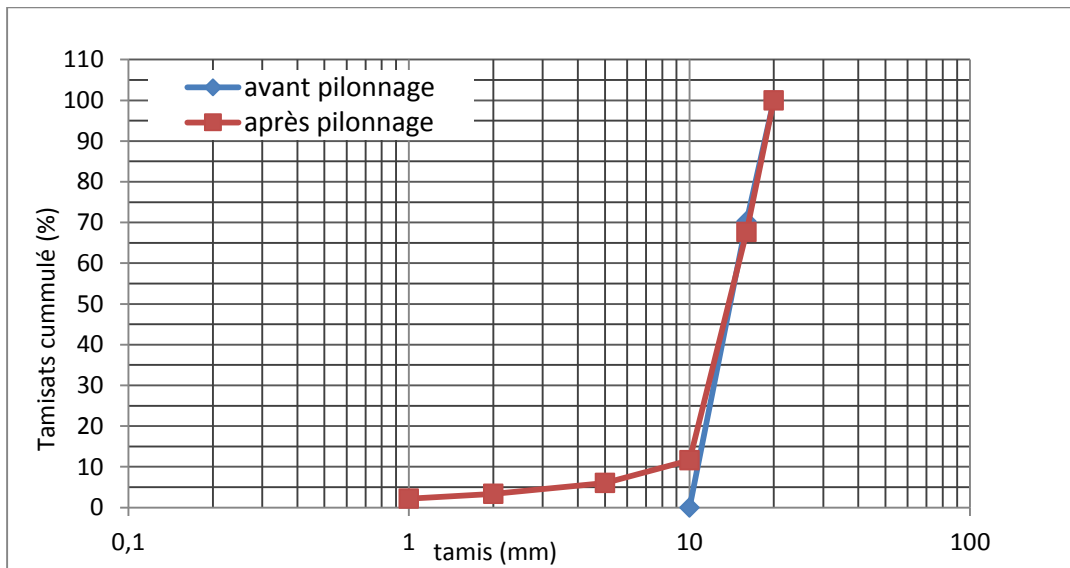
Nous avons réalisé les essais de fragmentabilité sur deux échantillons à savoir :

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verre).



**Figure V.8** : Les essais de fragmentabilité réalisés.

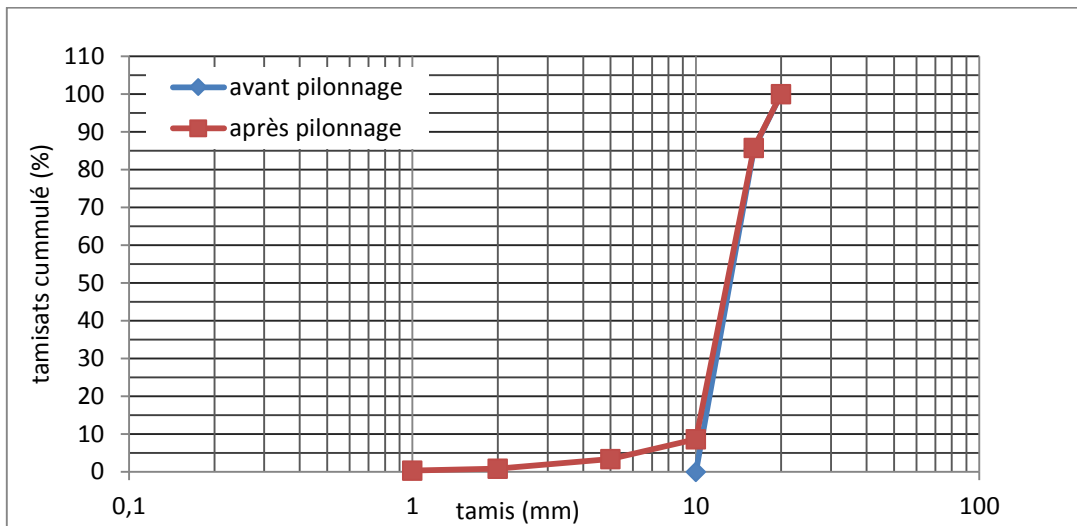
➤ **Calcaire seul**



**Figure V.9 :** Courbes granulométriques du calcaire seul.

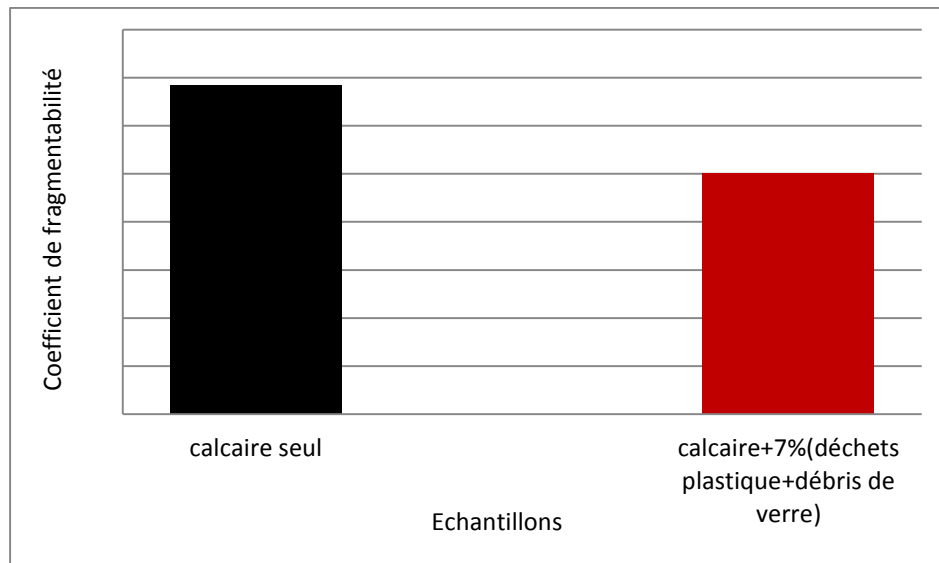
$$FR = \frac{11}{8} = 1.37$$

➤ **Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verres)**



**Figure V.10 :** Courbes granulométriques du calcaire+7%(déchets plastiques + débris de verres).

$$FR = \frac{11}{10} = 1,1$$



**Figure V.11** : Evolution de coefficient FR des différents mélanges.

#### V.4.5 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour les deux types d'échantillon sont très intéressants. En effet, les coefficients FR déterminés sont inférieurs à 7, ce qui indique que les matériaux étudiés se sont très peu fragmentés. Pour le calcaire seul on a obtenu un coefficient  $FR = 1.37$ , ce qui signifie qu'il a très bien supporté le pilonnage appliqué. Toutefois, l'ajout des déchets plastiques et des débris de verre a amélioré davantage leur résistance (voir figure V.11). En effet, FR passe de 1.37 à 1.1 dans le cas du calcaire mélangé avec 7% (plastique + verre). Cette amélioration peut être expliquée par la nature flexible du plastique qui amorti les coups de pilonnage et absorbe une partie des coups transmis aux grains du calcaire, ce qui réduit l'effet du pilonnage sur la structure globale de l'échantillon (mélange).

On peut dire ainsi, que l'utilisation des matériaux présentés en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations et éventuellement en couches de base) est fortement envisageable.

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

#### V.5.1 Définition et but de l'essai

Parmi les paramètres d'identification les plus significatifs des problèmes posés par l'emploi des matériaux dans la construction des chaussées, le coefficient de dégradabilité (DG) est un représentant actif du comportement de certains matériaux rocheux se traduisant par une évolution continue de leurs caractéristiques géotechniques (granularité, argilosité, plasticité,...) par rapport à celles observées immédiatement après leur extraction.

L'essai de dégradabilité permet de qualifier la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques, cet essai détermine l'évolution à long terme des grains (NF P 94-067,1992).

### V.5.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à déterminer la réduction du D10 d'un échantillon de granularité d/D donnée (Matériau constitue de grains qui sont en totalité retenus par le tamis de maille d et passent en totalité au travers du tamis de maille D) soumis à quatre cycles imbibition-séchage, conventionnels (NF P 94-067,1992).

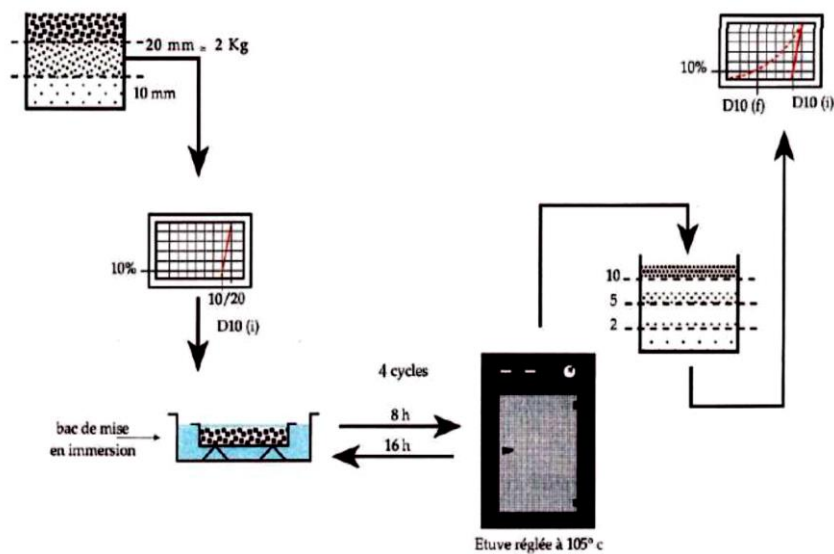


Figure V.12 : l'essai de dégradabilité (SETRA, 1996).

### V.5.3 Exécution de l'essai

- Prendre un échantillon de 2 kg de classe granulaire 10/20. La fraction du matériau est déduite par pesées des refus à travers plusieurs tamis (10,16 et 20mm) constituant cette classe ;
- Mélanger et réhomogénéiser l'échantillon puis l'introduire dans un bac, L'échantillon est alors soumis à une série de quatre cycles d'immersions et de séchages à l'étuve respectivement de 8 et 16 heures ;
- Une fois l'opération terminée, l'échantillon est récupéré et tamisé au tamis 1, 2, 5,10 et 16mm
- Le coefficient de dégradabilité DG sera déduit de la courbe comme suit :

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

**Avec :**

**D<sub>10</sub>** : Diamètre du tamis correspondant à 10% de tamisât

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

**Tableau V.9** : Valeurs de références (NF P 94-067).

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

#### V.5.4 Présentation des résultats

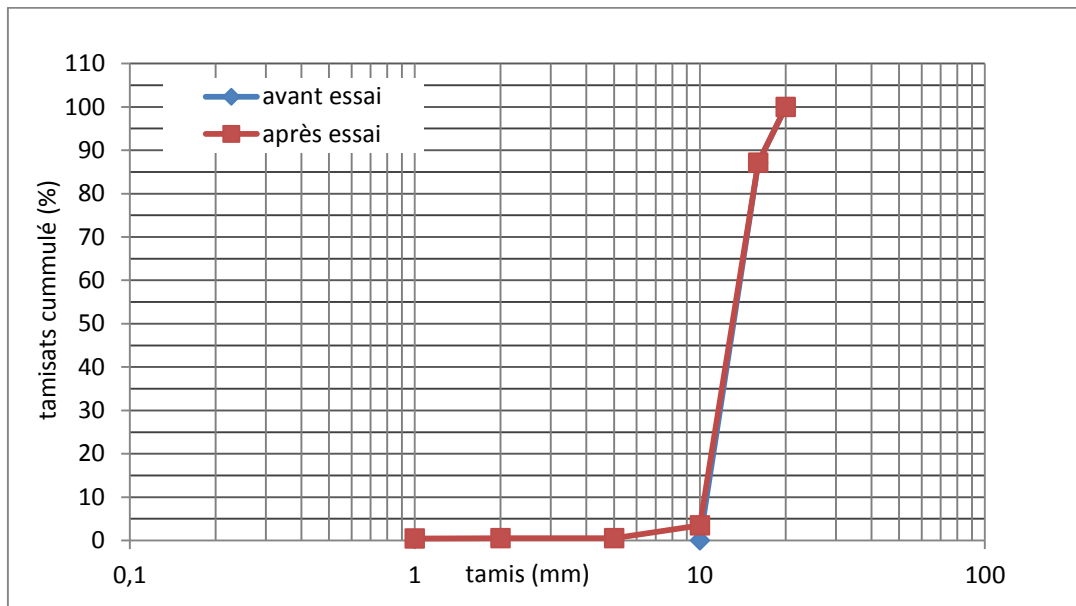
Nous avons réalisé les essais de dégradabilité sur deux échantillons à savoir :

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verre).



**Figure V.13** : Les essais de dégradabilité réalisés.

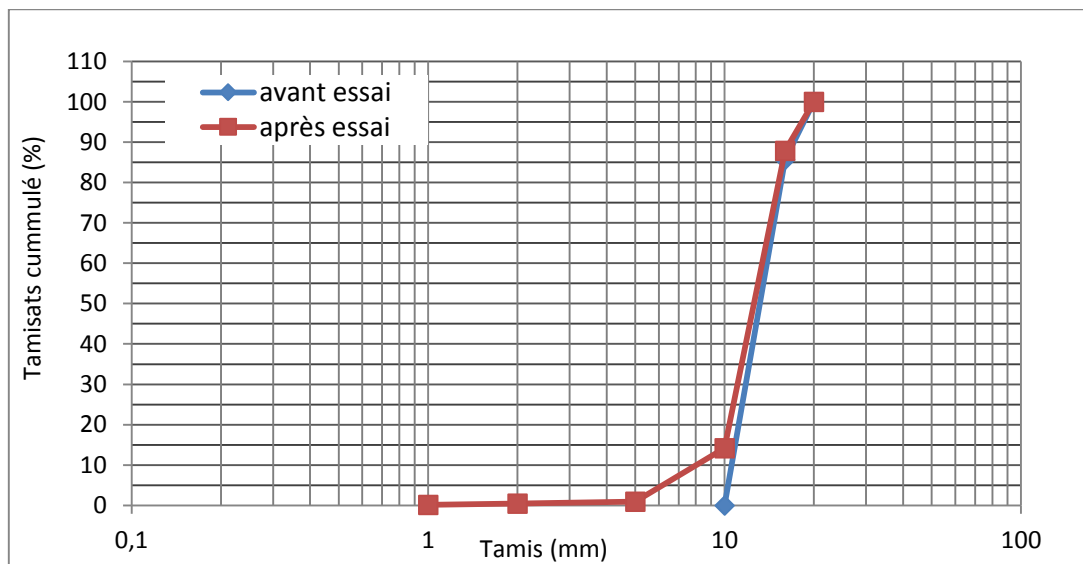
➤ **Calcaire seul**



**Figure V.14 :** Courbes granulométriques du calcaire seul.

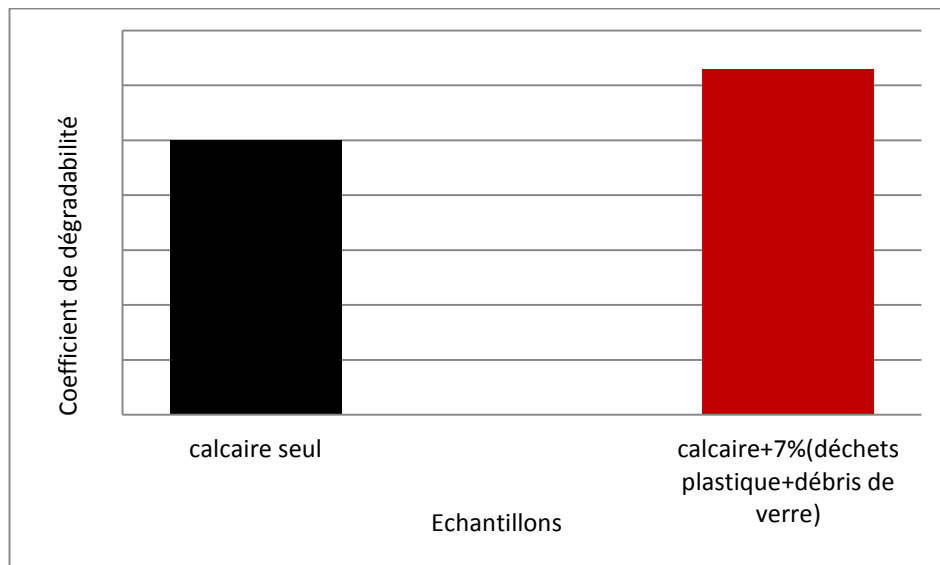
$$DG = \frac{12}{12} = 1$$

➤ **Calcaire + 7% (déchets plastiques + débris de verres)**



**Figure V.15 :** Courbes granulométriques du calcaire + 7 % (déchets plastiques + débris de verres)

$$DG = \frac{10.1}{8} = 1.26$$



**Figure V.16 :** Evolution du coefficient DG des différents mélanges.

### V.5.5 Interprétation des résultats

En se référant aux valeurs présentées dans le tableau V.9, nous déduisons que le calcaire étudié fait partie des matériaux rocheux peu dégradables, ( $DG = 1 < 5$ ) ; le calcaire seul a très bien supporté les cycles séchages / humidification appliqués.

L'ajout de déchets plastiques et de débris de verres a augmenté la dégradabilité de l'échantillon. En effet, le coefficient DG passe de 1 à 1.26 dans le cas du calcaire avec 7% de verre et de plastique. Sachant que le verre se comporte comme un matériau très peu dégradables sous sollicitations hydriques, et qu'il ne présente aucune variation dans la granularité après essai, donc on peut expliquer cette augmentation de DG par l'influence de la température élevé (+100°C) sur quelque types de plastiques utilisés. Ces derniers sont à prendre sérieusement en considération lors de la confection des échantillons afin d'améliorer le comportement des mélanges.

En fin, les matériaux étudiés sont considérés peu dégradables et leur utilisation en couches de chaussées, particulièrement en couches inférieures (couches de forme, couches de fondations) est fortement recommandée.

### V.6 Conclusion

Les essais routiers présentés dans ce chapitre ont permis d'évaluer la résistance des mélanges aux différentes sollicitations routières (chocs, usure, pilonnage, changement climatiques cycliques (température et humidité)).

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout de 7% de mélange (plastique et verre) joue un rôle protecteur et qu'il contribue sensiblement à l'amélioration de la résistance du calcaire face aux différentes sollicitations citées.

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

## CHAPITRE VI

### RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX ETUDIÉS

#### VI.1 Introduction

En géotechnique, on s'intéresse davantage à la résistance au cisaillement, car dans la majorité des situations, la rupture dans le sol est produite suite à des contraintes de cisaillement excessives. La rupture par cisaillement peut affecter les talus (digues, remblais, berges...), les fondations, ou encore les couches des chaussées suite au manœuvre d'accélération, de freinage ou de changement de direction des véhicules, notamment lourds.

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'évolution du comportement et des caractéristiques mécaniques des matériaux présentés face aux efforts de cisaillement.

#### VI.2 Le concept de cisaillement

Le concept de cisaillement est utilisé dans plusieurs domaines, nous citons dans ce qui suit les plus relatives au domaine de la construction.

- **En géologie** : un cisaillement est un décrochement qui implique un volume important de roche sur plusieurs plans ; un cisaillement ductile est la microstructure d'une roche déformée en profondeur, de type aplatissement-étirement ;

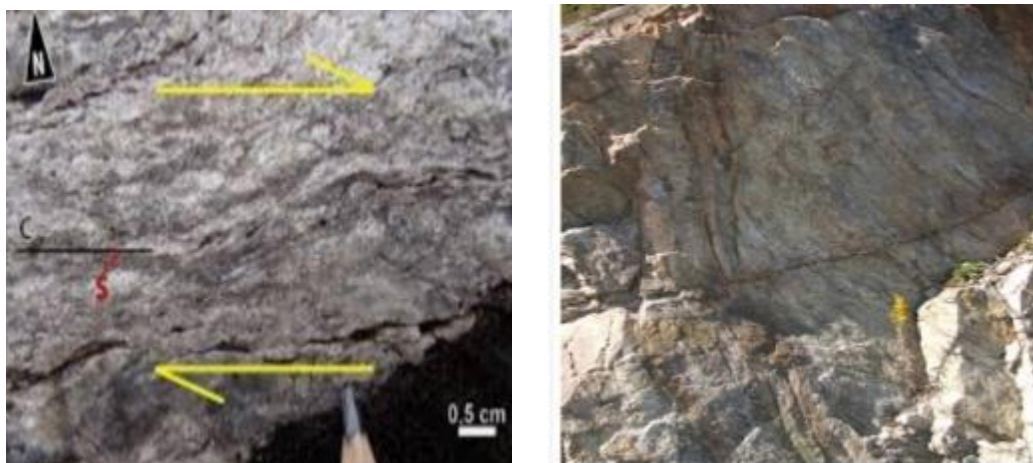


Figure VI.1 : Zone de cisaillement de roches (Nelly, 1988)

- **En science de l'ingénieur** : le cisaillement est un type de sollicitation mécanique et la déformation qui en résulte appliquée à un matériau ; voir (déformation élastique, théorie des poutres et effort tranchant, contrainte de cisaillement, module de cisaillement,...etc.).



**Figure VI.2 :** Exemple de dégradation par cisaillement d'une chaussée (zone de freinage-accelération).

### VI.3 Critère de rupture de Mohr-Coulomb

Les théories de la résistance des matériaux ont pour but de prévoir les conditions de rupture d'un matériau soumis à un système quelconque de contraintes, parmi les nombreuses théories sur la rupture qui ont été proposées, seule, celle formulée par Mohr (1887) a été utilisée dans le cas des sols.

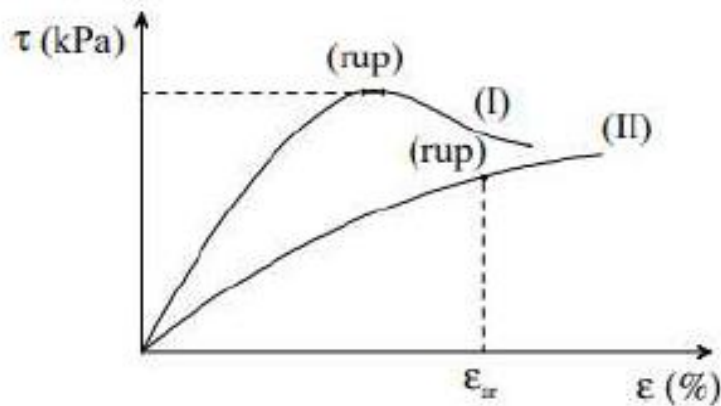
La théorie de Mohr est basée sur le postulat suivant : Il y a rupture dans un matériau lorsque la contrainte de cisaillement sur le plan suivant lequel la rupture est supposée se produira ne dépend que de la contrainte normale agissant sur ce plan (Parry, 1997).

### VI.4 paramètres de la résistance au cisaillement

#### VI.4.1 La courbe contrainte-déformation

La résistance au cisaillement est définie à partir d'essais réalisés en laboratoire ou in situ jusqu'à provoquer la rupture du sol. La rupture est mise en évidence à partir de courbes contrainte-déformation (force – déplacement) enregistrées lors de ces essais réalisés à vitesse de déplacement contrôlée, (voir figure VI.3).

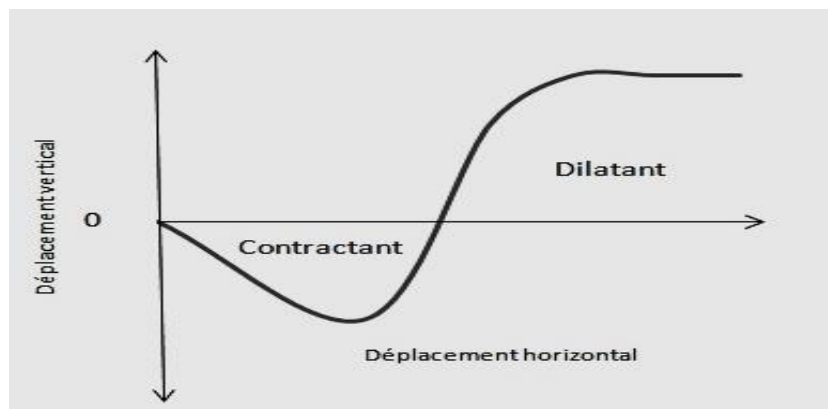
- Dans le cas de la courbe (I), la rupture correspond à la valeur maximale de la contrainte de cisaillement ( $\tau_{\max}$ ), tant que la valeur du déplacement (ou de la déformation) reste inférieure à une limite fixée, qui limite la plage des petites déformations dans le sol.
- Dans le cas de la courbe (II), la contrainte marquant la rupture sera définie à partir de la valeur du déplacement (ou de la déformation) limite qui marque la fin de la plage des petites déformations.



**Figure VI.3 :** Courbes de contraintes-déformations (LCPC, 1987).

#### VI.4.2 La courbe de variation du volume

Le phénomène de dilatance et contractance d'un sol décrit la variation de volume que l'on observe dans les matériaux granulaires lorsqu'ils sont soumis à un cisaillement. En effet, un matériau granulaire compacté tend à se dilater lorsqu'on le cisaille, cela vient de l'enchevêtrement des grains à l'état compacté, donc un matériau est dit dilatant si son volume augmente sous cisaillement croissant, contractant si son volume décroît lorsque le cisaillement augmente (Poulous, 1981).



**Figure VI.4 :** Courbe de variation de volume.

#### VI.4.3 La courbe intrinsèque

La courbe intrinsèque d'un matériau est l'enveloppe des cercles de Mohr correspondant à l'état de rupture pour des valeurs de contraintes variables. A l'intérieur de la courbe, le sol est stable, à l'extérieur, le sol est à l'état de rupture. Elle est caractérisée par son ordonné à l'origine ( $c$ ), et par son angle avec l'axe des abscisses ( $\varphi$ ).

L'équation de cette droite est donc :  $\tau = c + \text{tg}\varphi$

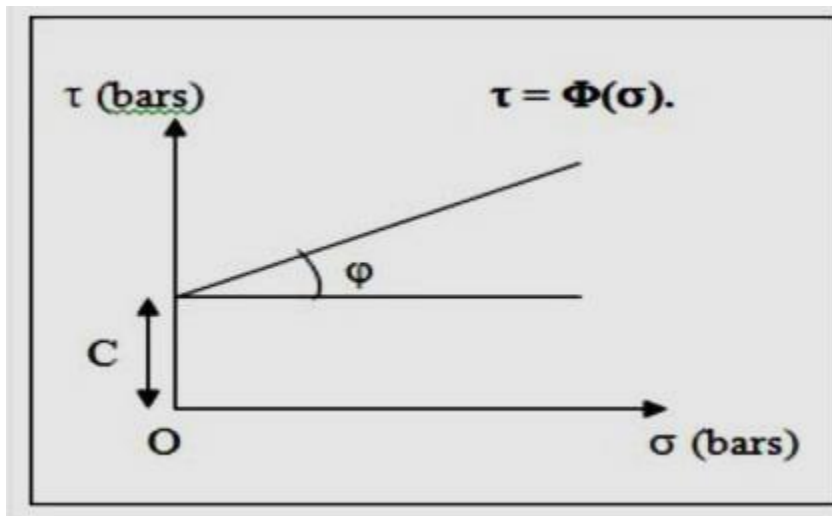


Figure VI.5 : Courbe intrinsèque d'un sol (LCPC, 1987).

#### VI.5 Quelques définitions importantes

- **La cohésion  $c$**  : Elle exprime la résistance au cisaillement du sol sous contrainte normale indépendamment de la contrainte normale  $\sigma$ . Elle constitue la résistance propre de la structure due essentiellement aux liaisons de type physico-chimique pouvant exister entre les grains et créées par la cimentation. La cohésion est nulle dans les sols grenus étant donné qu'ils ne possèdent pas de telles liaisons. En revanche, cette dernière apparaît dans les sables humides ou légèrement cimentés en raison des ménisques d'eau existants aux points de contact entre les grains créant ainsi une certaine adhérence entre ces derniers et qui disparaît dès que la teneur en eau du sable augmente (Magnan, 1991).
- **L'angle de frottement interne  $\varphi$**  : Il traduit le frottement lors du glissement des grains, les uns sur les autres. Il varie d'un sol à un autre. Pour les sols pulvérulents, la valeur de l'angle de frottement interne  $\varphi$  dépend sensiblement de l'état de compacité du sol. Pour un état donné de compacité,  $\varphi$  croît avec l'augmentation du diamètre moyen des grains et l'étalement de la granulométrie du sol. Ce paramètre dépend également de la forme et de la nature de la surface des grains. Par contre, l'angle de frottement interne est pratiquement indépendant de la teneur en eau du sol (Magnan, 1991) et (Robitaille et Tremblay, 1997).
- **Le comportement à court terme (non drainé)** : est régi par un chargement assez rapide, compte tenu de la perméabilité du sol et de la longueur du chemin de drainage, pour provoquer l'apparition de surpressions interstitielles qui ne peuvent se dissiper pendant la

période considérée. En absence de drainage, toute déformation se fait sans variation de volume, les contraintes normales induites dans le milieu par l'application de l'effort sont transmises presque intégralement à la phase liquide (Patrice et Laurent, 2009).

- **Le comportement à long terme (drainé) :** est régi par un chargement suffisamment lent et qui dure assez longtemps, compte tenu de la perméabilité du sol et de la longueur du chemin de drainage, pour n'induire à aucun moment des surpressions interstitielles dans l'éprouvette de sol. Les surpressions interstitielles étant nulles, les efforts appliqués sont transmis intégralement au squelette du sol et les contraintes induites sont des contraintes effectives. L'application de l'effort s'accompagne d'une variation de volume, plus ou moins importante selon les contraintes appliquées. Cette diminution de volume traduit un rapprochement des grains et un volume égal d'eau interstitielle est expulsé du sol au fur et à mesure du chargement (Patrice et Laurent, 2009).

## **VI.6 Méthodes de détermination de la résistance au cisaillement des sols**

### **VI.6.1 Méthode d'essai in situ**

Les essais in situ se déroulent directement sur place et permettent de recueillir toutes les données nécessaires qui seront ensuite traitées par des experts.

En géotechnique, ces essais permettent d'approfondir l'étude des sols et des roches avant construction en surface ou en profondeur (Monnet, 2016)

Pour déterminer la résistance au cisaillement, il existe plusieurs types d'essai :

- **Les essais destructifs :** parmi ces essais nous citons (essai de torsion, essai de traction directe, essai de cisaillement direct, essai de double cisaillement, essai de cisaillement oblique en compression, essai de flexion....etc.).
- **Les essais non destructifs :** comme la mesure de propagation d'une onde dans le sol.

### **VI.6.2 Méthode d'essai au laboratoire**

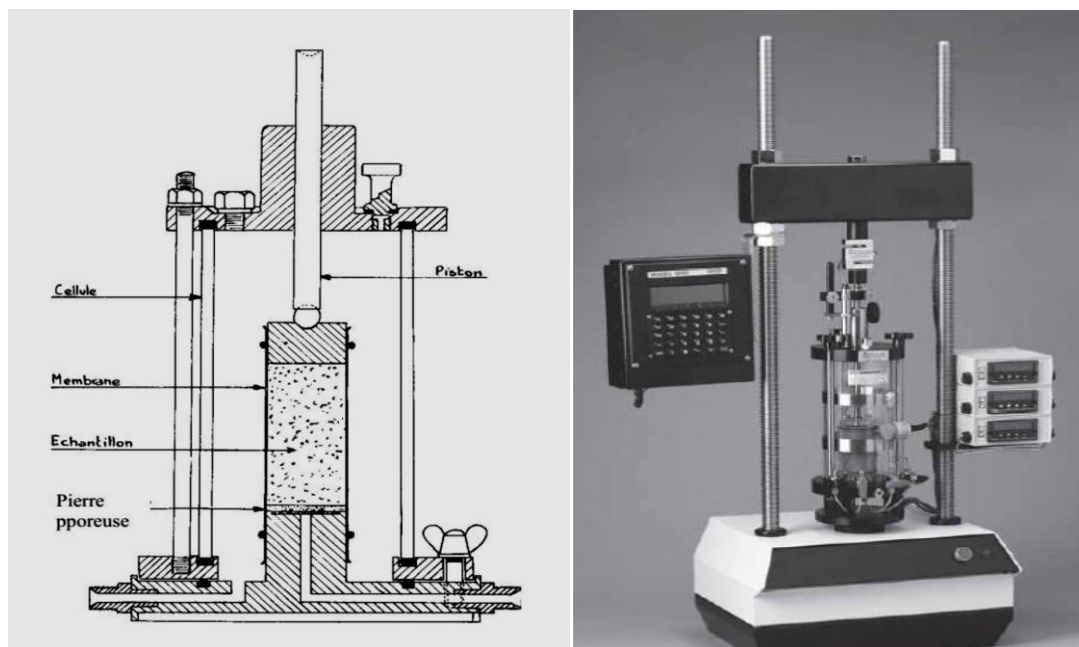
Parfois les essais sont rarement réalisés sur site pour plusieurs raisons, notamment économiques. Par conséquent, ils sont souvent remplacés par des essais de laboratoire réalisés sur des échantillons intacts ou remaniés. Ils permettent d'avoir des résultats assez précis que les essais in situ à des couts relativement moins chers.

### VI.6.2.1 L'essai triaxial

L'essai triaxial a été développé pour l'étude de la résistance au cisaillement des sols dans le but de reproduire au mieux les conditions réelles. Cet essai permet donc de combler et contourner les différents problèmes rencontrés dans l'essai de cisaillement direct à la boîte. En effet, l'essai triaxial permet de reproduire parfaitement les différents états du sol avec un contrôle parfait des conditions de drainage sur tous les types de sols, durant cet essai, la rupture se produit selon la zone la plus faible dans l'échantillon (Robert et al ,1991).

#### ➤ Appareillages et principe de l'essai

En se référant à (Robert et al ,1991).



**Figure VI.6 :** Appareil triaxial.

- L'appareil triaxial permet d'appliquer sur un échantillon cylindrique de sol contenu latéralement dans une fine membrane, d'une part une pression latérale « P » par l'intermédiaire d'un liquide comprimé d'autre part par une force axiale « F » à l'aide d'un piston.
- Aux extrémités de l'échantillon sont placées des pierres poreuses rigides qui sont reliées à un système permettant de mesurer la pression interstitielle « u » de l'eau dans le cas d'un sol saturé et d'effectuer ou non un drainage de l'échantillon.
- La déformation verticale «  $\Delta l$  » de l'échantillon est mesuré à l'aide d'un comparateur.

- La répartition des contraintes est théoriquement homogène, c'est-à-dire qu'en tout point on a le même état de contrainte.
- L'essai classique consiste à augmenter la force « F » jusqu'à la rupture de l'échantillon, tout en laissant la pression « P » constante et on notant la déformation axiale «  $\Delta l$  ».
- Au moment de la rupture, on connaît donc le déviateur maximal des contraintes ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ), correspondant au cercle de Mohr tangent à la courbe intrinsèque.

#### VI.6.2.2 L'essai de cisaillement à la boîte (NF P94-071-1)

C'est parmi les essais les plus anciens par rapport à d'autres essais de laboratoire. Des expériences de coulomb sont effectuées à l'aide d'une boîte de cisaillement, dont la forme la plus récente a été élaborée par Arthur CASAGRANDE en 1932.

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

##### ➤ Appareillage et principe de l'essai

- La boîte de Casagrande ou boîte de cisaillement est destinée aux essais de cisaillement rectiligne, dont lesquels on cherche à obtenir la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé.
- La boîte de cisaillement est constituée de deux demi boîtes l'une est fixe (demi boîte inférieure) et l'autre mobile le long du plan de contact dans une direction donnée.
- Un échantillon du sol à étudier est introduit dans la boîte, sur le quelle on applique par l'intermédiaire du piston un effort de compression « N » et qu'on maintient constant, et un effort horizontal de traction « T » qu'on fait augmenter progressivement, le matériau se rompt, alors pour une contrainte de valeur « T » suivant le plan de séparation des deux demi boîtes, qui coïncide sensiblement avec le plan horizontal de symétrie de l'échantillon.
- On peut mesurer l'effort horizontal « T » en fonction des déformations «  $\Delta l$  ».



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

### VI.7 La différence entre l'essai de cisaillement a la boîte et l'essai triaxial

- **L'essai de cisaillement a la boîte**

- La manipulation est facile (Simple) ;
- La durée d'exécution courte (Rapide) ;
- Le coût n'est pas cher (Économique) ;
- Le plan de rupture imposé (horizontal) ;
- Appliquer une contrainte normale  $\sigma$ .

- **L'essai triaxial**

- La manipulation est assez complexe ;
- Il est couteux par rapport au cisaillement à la boîte ;
- Le plan de rupture inconnu ;
- Appliquer un état de contrainte isotrope p.

**Remarque :** Dans notre étude, afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés, nous avons fait recours à l'essai de cisaillement à la boîte.

### VI.8 Exécution de l'essai

- Préparer une masse du matériau de fraction 0/5, l'échantillon est densifié à sa teneur en eau optimale déterminée précédemment à l'essai Proctor ;
- Solidariser les deux demi-bottes et mettre l'échantillon dans la boîte ;

- Placer la boîte sur le chariot et positionner les comparateurs ou capteurs pour prendre des lectures (déplacement horizontal, déplacement vertical et force tangentielle) ;
- Appliquer sur la face supérieure un effort vertical  $N$  représentant les contraintes normales  $\sigma = 100, 200$  et  $300$  kPa ;
- Régler tous les comparateurs à zéro et démarrer l'essai à une vitesse constante adéquate ; Prendre les lectures simultanées sur les différents comparateurs (force, déplacement horizontal et déplacement vertical), à des intervalles de temps réguliers (toutes les 15 secondes);
- La rupture est atteinte lorsqu'un pic ou un palier est obtenu du graphe  $\tau = f(\Delta l)$ , ce qui permet d'arrêter l'essai après quelques lectures décroissantes ou stabilisées, sinon l'essai est poursuivi jusqu'à la fin de course.



**Figure VI.8 :** Mode opératoire de l'essai de cisaillement à la boîte.

### VI.9 Présentation et interprétation des résultats

Les résultats obtenus aux essais de cisaillement direct à la boîte sont présentés sous forme de courbes :

Contraintes-déformations  $\tau = f(\Delta L)$  ;

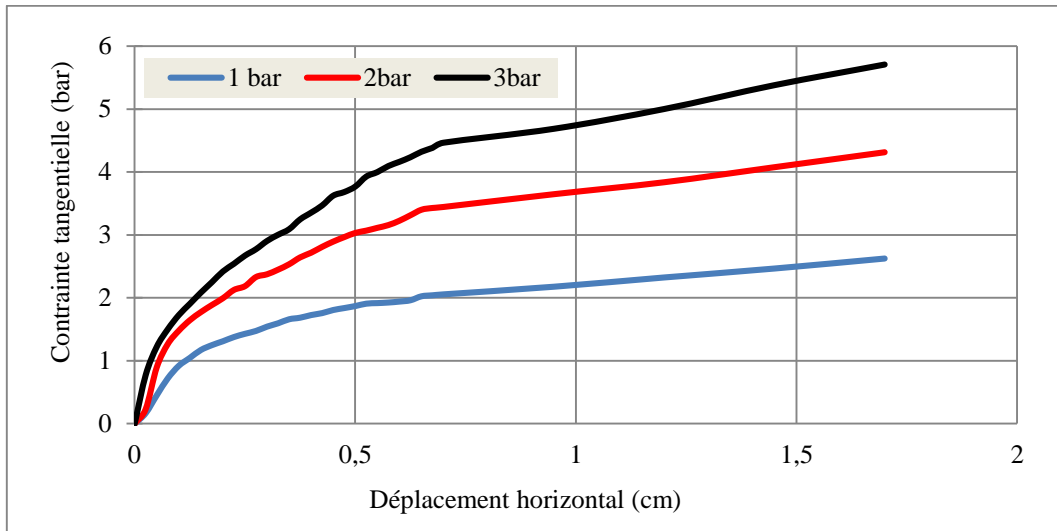
Variation de volume  $\Delta h = f(\Delta L)$  ;

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

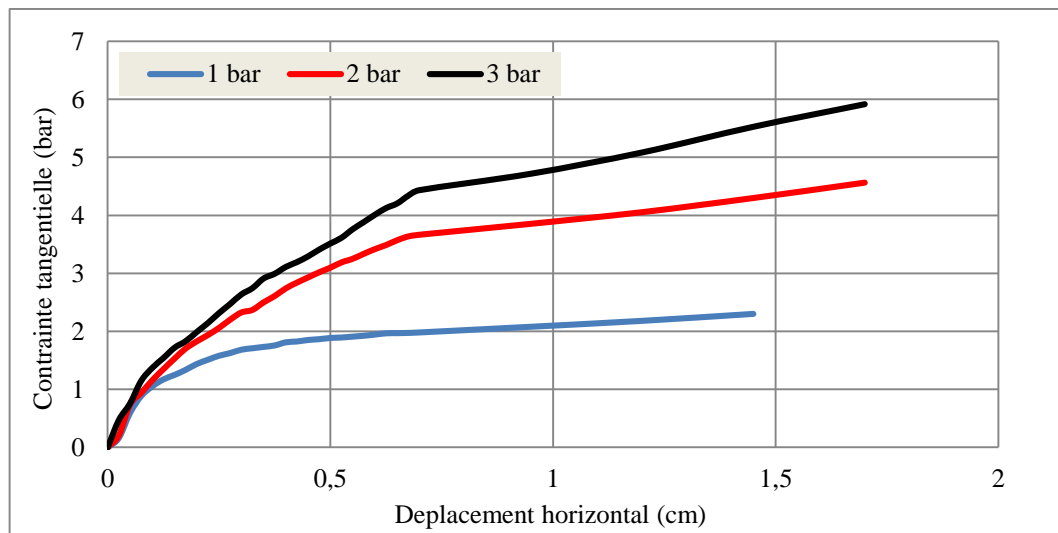
Les essais de cisaillement à la boîte sont réalisés sur les deux échantillons suivants :

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 7% de (déchets plastiques+débris de verre).

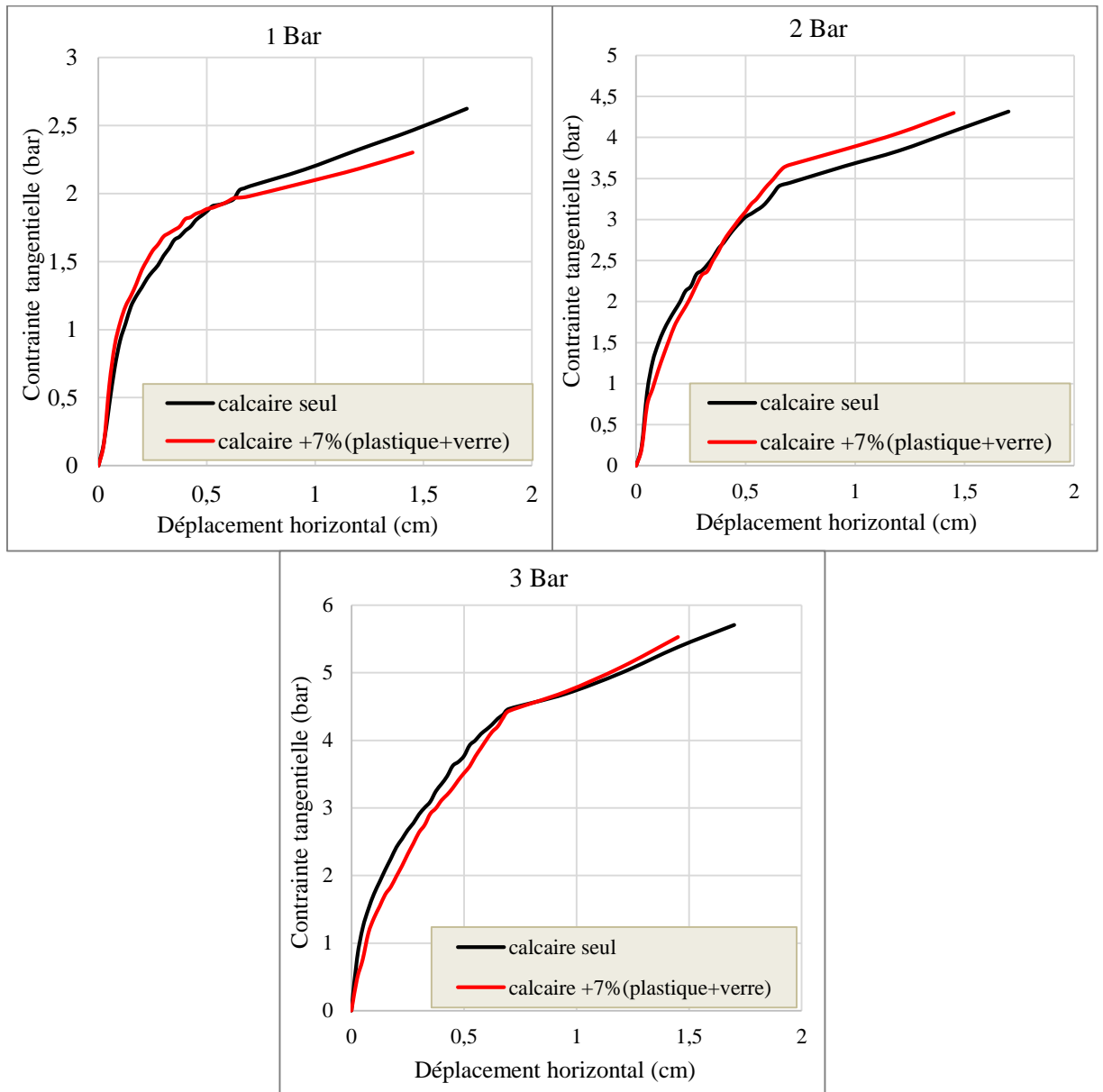
### VI.9.1 Courbes contraintes-déformation



**Figure VI.9 :** Courbes contraintes-déformations du calcaire seul.



**Figure VI.10 :** Courbes contraintes-déformations du calcaire + 7% de (plastiques+verre).



**Figure VI.11:** Courbes comparative contraintes-déformations.

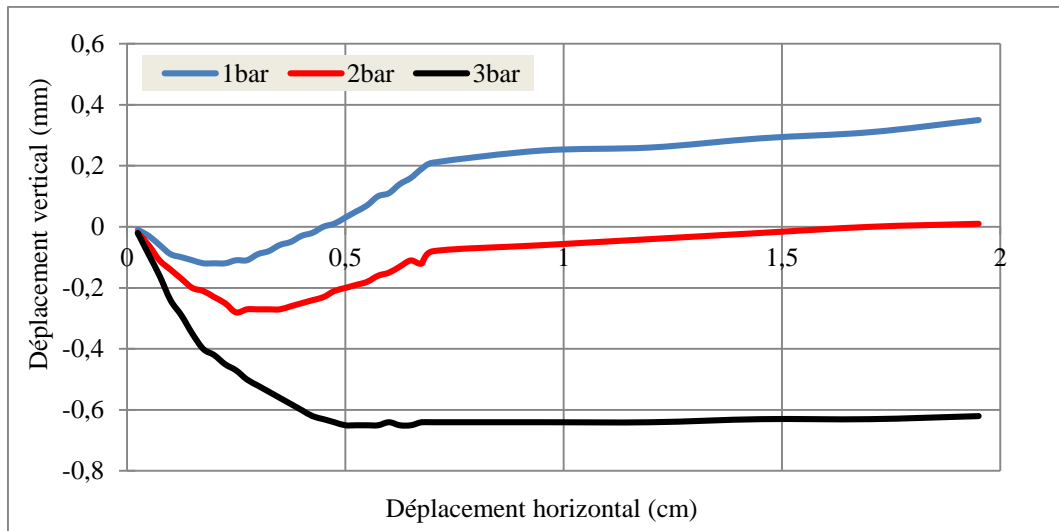
Les figures VI.9 et VI.10 présentent l'évolution de la résistance au cisaillement en fonctions des contraintes normales appliquées (1, 2 et 3 bar) pour les échantillons étudiés.

La résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la contrainte normale, ceci est confirmé pour les différents mélanges étudiés. Effectivement, avec l'accroissement de l'effort vertical, les grains sont de plus en plus serrés les uns contre les autres, les vides sont réduits, ce qui augmente l'enchevêtrement et le frottement entre les grains. Ces forces s'opposent aux mouvements horizontaux de cisaillement.

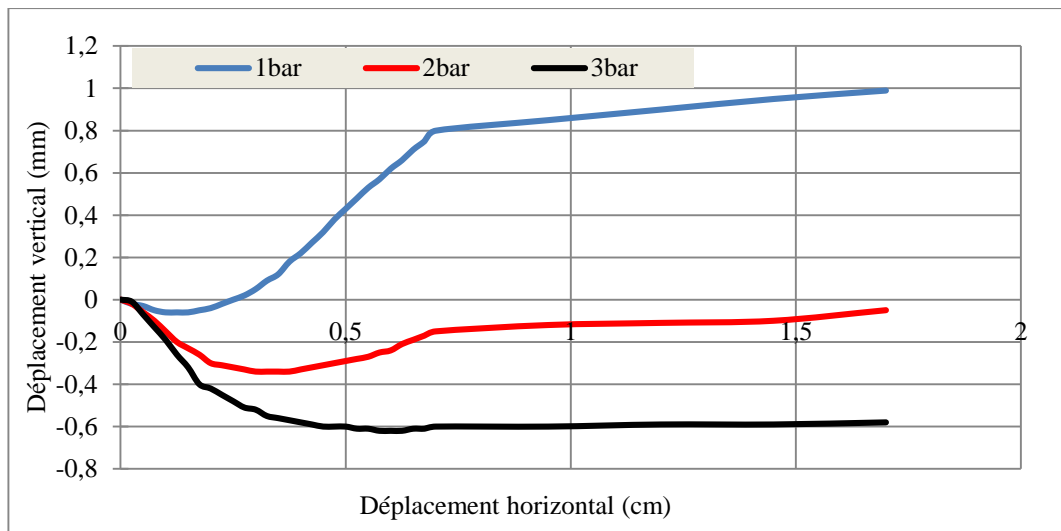
La figure VI.11 permet de faire une comparaison du comportement en cisaillement entre le calcaire seul et les mélanges. La résistance au cisaillement des mélanges paraît légèrement

plus importante que la résistance au cisaillement du calcaire seule sous de fortes contraintes normales (2 et 3 bars), tandis que le calcaire développe une résistance au cisaillement meilleure sous de faibles contraintes normales (1 bar).

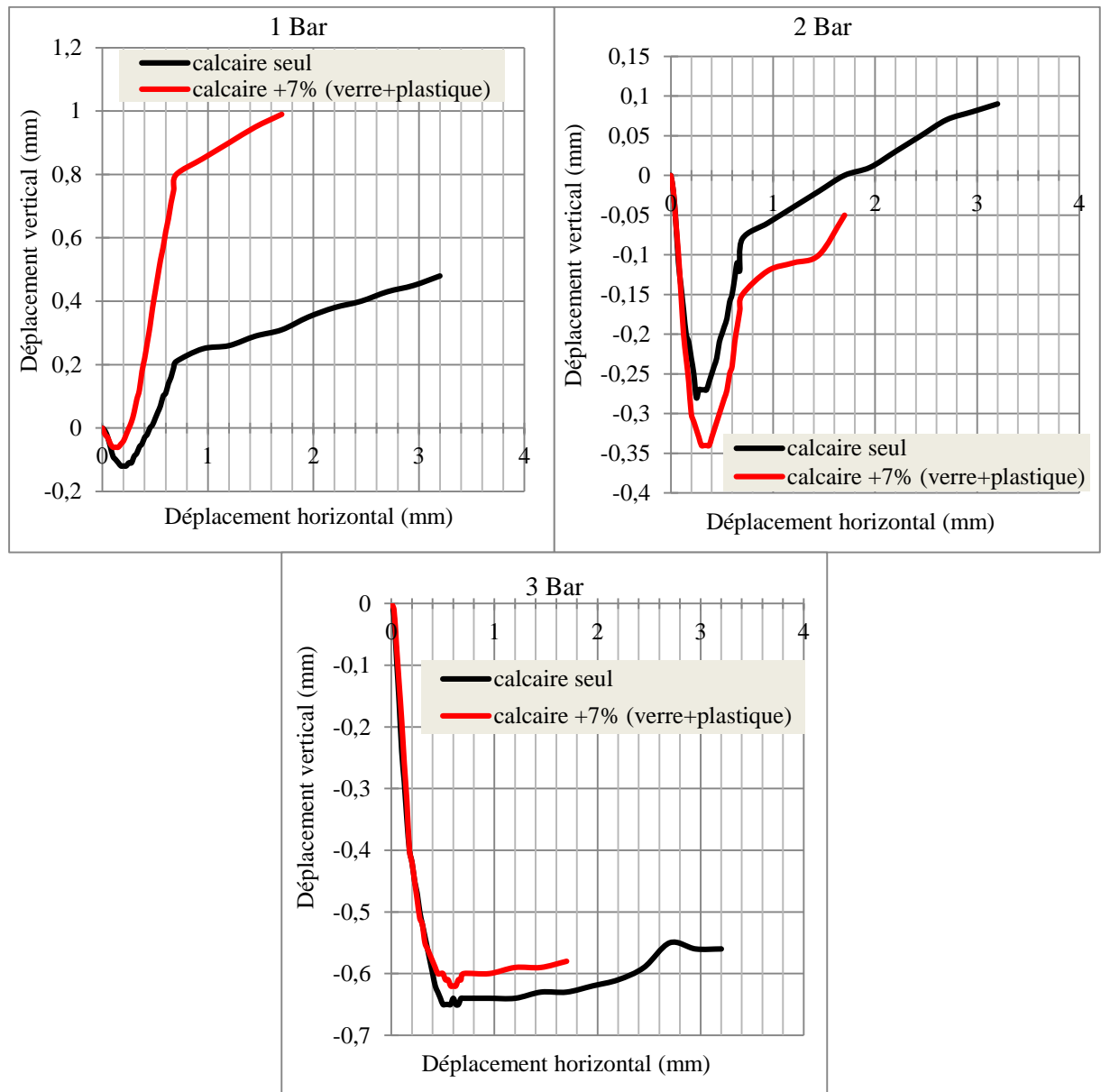
### VI.9.2 Courbes de variation de volume



**Figure VI.12 :** Courbes de variation du volume du calcaire seul.



**Figure VI.13 :** Courbes de variation du volume du calcaire + 7% de (plastiques + verres).



**Figure VI.14:** Courbes comparative de variation de volume.

D'après les courbes présentées sur les figures VI.12 et VI.13, les échantillons du calcaire seul et mélanges ont tendance à augmenter de volume sous les contraintes normales les plus faibles (1 bar). Dans ce cas, les grains peuvent facilement soulever le chapeau de mise en charge au cours de leur déplacement en montant les uns sur les autres sans cisaillement des aspérités, ce qui développe ainsi un comportement dilatant. En revanche, sous des contraintes normales élevées, les forces de contact entre les grains sont assez importantes et limitent donc leur mouvement lors du cisaillement. Ceci rend le matériau moins dilatant et peut être même contractant (cassure des grains).

A titre de comparaison, nous remarquons que le calcaire seul et le mélange calcaire+7% de (déchets plastique et débris de verre) ont pratiquement le même comportement du point de vue variation du volume (voir figure VI.14). En effet, à une contrainte normale de 1 bar, ils ont montré un comportement dilatant. Ensuite, ils développent un comportement de plus en plus contractant au cours du cisaillement en fonction des contraintes normales appliquées.

### VI.9.3 Les courbes intrinsèques

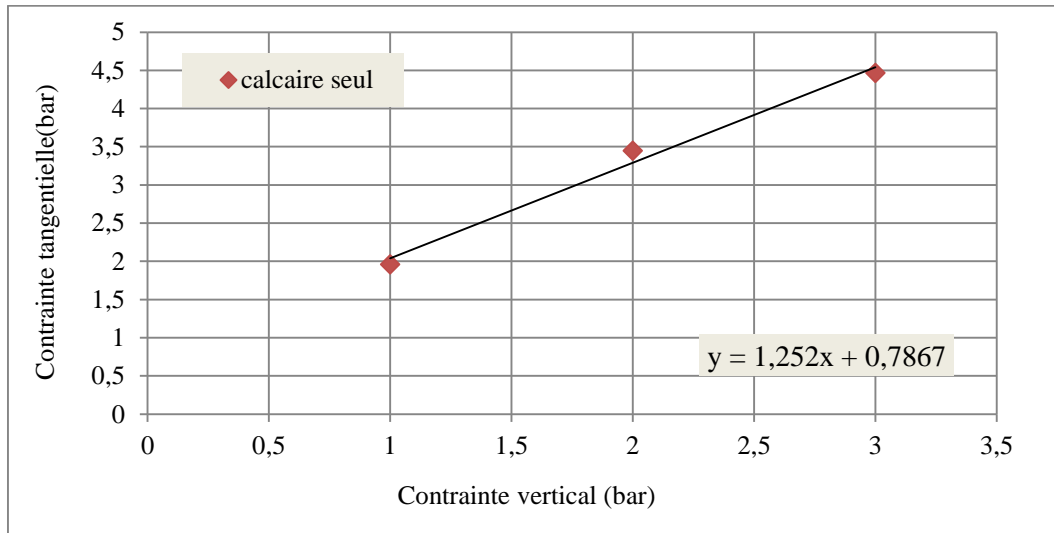


Figure VI.15 : Droite intrinsèque du calcaire seul.

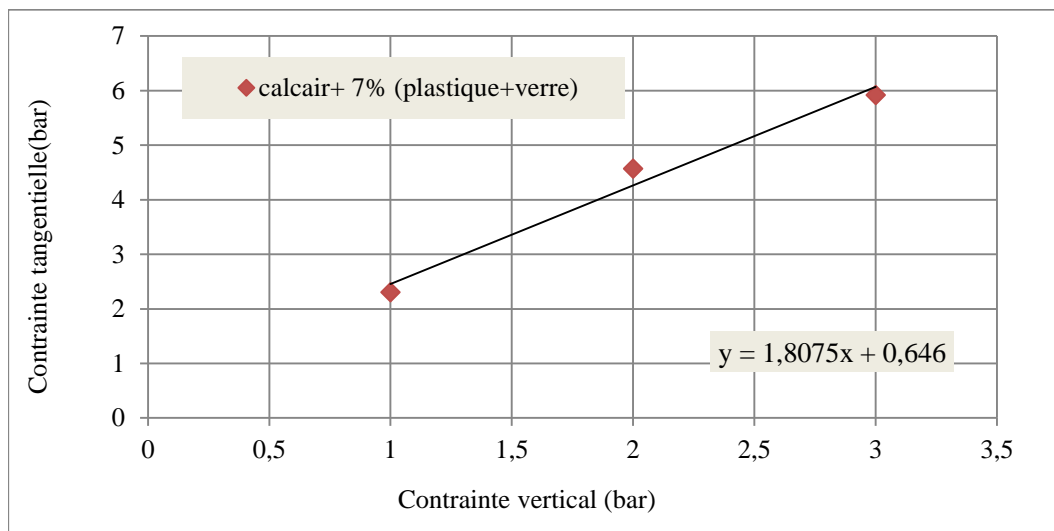


Figure VI.16 : Droite intrinsèque du calcaire + 7% de (plastiques + verres).

**Tableau VI.1** : Les paramètres intrinsèques des mélanges étudiés.

Mélange	Cohésion C (bar)	Angle de frottement $\varphi$ (°)	Résultats moyens de résistance au cisaillement du calcaire, selon (Atlan, 1978)	
Calcaire seul	0.786	51.38	C (KPA)	4-360
Calcaire+7%de (déchets plastique et débris de verre)	0.646	61.04	$\varphi$ (°)	37-58

Les droites intrinsèques présentées sur les figures VI.15 et VI.16 permettent de déduire les caractéristiques mécaniques (angle de frottement interne  $\varphi$ , cohésion  $c$ ) résumées dans le tableau VI.1. Nous constatons que le calcaire seul est doté d'un angle de frottement interne important, ce qui concorde avec les résultats de (Atlan, 1978) suite à la rugosité et les angularités des particules du calcaire. L'ajout de 7% de (déchets plastiques et débris de verres), augmente davantage l'angle de frottement interne du mélange qui passe de  $51.38^\circ$  à  $61.04^\circ$ , ceci peut être dû aux angularités des particules du verre et certaines surfaces rugueuses de plastiques qui s'opposent davantage au glissement des éléments (grains) les uns par rapport aux autres.

Les cohésions enregistrées diminuent également de 0.786 à 0.646 bars. Ceci peut être dû à la forme plus ou moins aplatie du plastique et du verre qui créent des discontinuités dans la structure granulaire des échantillons.

### VI.10 Conclusion

Ce chapitre a permis d'étudier le comportement au cisaillement des mélanges (calcaire seul, et calcaire + déchets plastique et débris de verre), à savoir leurs résistances au cisaillement, leurs variations de volume et l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques.

En conclusion, nous constatons que les échantillons en mélanges présentent de meilleures résistances au cisaillement comparé au calcaire seul. Les mélanges peuvent ainsi développer par la suite (en pratique) des résistances importantes face aux efforts tangentiels dus au freinage et aux accélérations des véhicules, et améliorent ainsi la stabilité de la chaussée.

## **CONCLUSION GENERALE**

L'élaboration d'un nouveau matériau composé de granulats de calcaire et des déchets plastiques et des débris de verre en vue de son utilisation en couches de chaussées peut avoir plusieurs intérêts écologiques, environnementaux et économiques. En effet, cela permet d'une part, de se débarrasser des déchets à moindre cout, et sans nuisance environnemental. D'autre part, apporter une nouvelle source supplémentaire de granulats afin de répondre aux besoins des projets.

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- \* Les mélanges présentent une bonne aptitude au compactage, avec des densités sèches élevées vérifiant le seuil de densités fixé par les normes relatives aux matériaux routiers à des teneurs en eau moyennes intéressantes (économiques).
- \* L'ajout des déchets plastiques et des débris de verre, améliore sensiblement la portance des mélanges même en présence d'eau (après immersion). En outre, les matériaux étudiés présentent des gonflements pratiquement nuls en présence d'eau. Ces résultats sont très intéressants et dépassent les qualités espérées pour ce type de matériaux.
- \* Les mélanges développent une résistance au cisaillement réduite comparativement à celles développées par le calcaire seul, néanmoins, elles restent importantes et satisfaisantes pour un matériau routier.
- \* En ce qui concerne la résistance aux chocs et à l'usure (essais routiers), l'ajout des déchets plastiques et débris de verre a montré qu'ils jouent un rôle protecteur et qu'ils contribuent sensiblement à l'amélioration de la résistance du calcaire face aux différentes sollicitations citées.

En se basant sur l'ensemble des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les mélanges étudiés ont présenté des comportements et des caractéristiques mécaniques très intéressantes sous les différentes sollicitations appliquées. Leur utilisation est fortement envisageable en couches de chaussées (couches de forme, couches de fondations et couches de base éventuellement) sous faible à moyen trafic.

On peut dire ainsi, que l'utilisation des déchets plastiques et des débris de verre dans la technique routière peut être une alternative fiable et rentable sur le volet économique et environnemental. C'est une opération innovatrice permettant de conserver les gisements de

carrière et d'éliminer des tonnes de déchets inertes, leur conférant ainsi un caractère de matière première dans la construction routière.

Cette étude mérite d'être complétée par d'autres essais, notamment à long terme sous l'effet d'autres sollicitations mécaniques (sollicitations cycliques,...) et climatiques (gel-dégel, température,...). Elle mérite également qu'elle soit concrétisée à l'échelle réelle, en associant les universités et les entreprises afin d'étudier le comportement de ces matériaux sur un tronçon réel de route et d'élargir éventuellement leur utilisation pour d'autres domaines de construction. Toutefois, elle doit être suivie d'une campagne d'information et de sensibilisation des citoyens et des pouvoirs publics, afin d'instaurer une politique de collecte sélective des déchets pour faciliter l'opération du tri au niveau des entreprises de recyclage.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Alie J P., 1980.** Caoutchoucs synthétiques.

**André V., 1967.** Annales de géographie.

**Arrambide J et Duriez M., 1959.** Liants routiers et enrobés.

**Asbl., 2013.** Fédération de l'Industrie du Verre.

**Atlan Y., 1978.** Catalogue des essais géotechnique exécutés au laboratoire géotechnique D'ORLEONS, page 1, bureau de recherche géologique et minières service géologique national BP6009-45018 Orléans.

**Aulnois H., 1951.** Les matériaux pour revêtements routiers.

**Aussedat MM.G, Vecoven J et Cochet P., 2003.** Catalogue des structures de chaussées.

**Beauchamp J., 2003.** Mécanique des roches et des sols.

**Bulletin No.78/2007.** Introduction á iso 14000 systèmes de management environnemental

**CEBTP., 1984.** Centre expérimentale de recherches et études du bâtiment et des travaux publics. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. France.

**Chin C et Damen P., 2019.** Viability of using recycled plastics in asphalt and sprayed sealing applications (Austroads Technical Report No AP-T351-19). Sydney, Australia: Austroads. Récupéré de <https://austroads.com.au/publications/pavement/ap-t351-19>

**Corté J F et Hervé D B., 2004.** Matériaux routiers bitumineux : Tome1.

**Daudon D., 1992.** Remblais allégés en déchets de matières plastiques: Étude du procédé Plastbloc (Dissertation doctorale). Université Claude Bernard, Lyon.

**De Bock L, Duerinckx B, Beaumesnil B, Glorie L, Vansteenkiste S et Vanelstraete A., 2019.** Programma Comité vergadering van 23 april 2019: Analyse van het PlasticRoad-concept. (Document Interne CRR TC 4-118). Bruxelles: Centre de Recherches Routières (CRR).

**DEGOUTTE., 2002.** Petit Barrage : recommandation pour la conception, la réalisation et suivi.

**Deluzarche C., 2019.** Futura science.

**Dercourt J et Paquet H., 1995.** Eléments de géologie.

**Derville H., 1931.** Les marbres du calcaire carbonifère en Bas-Boulonnais.

**Dyer T D et Dhir R K., 2001.** Chemical Reactions of Glass Cullet Used as Cement Component, Journal of Material in Civil Engineering.

**EN 15804., 2014.** Fiche de déclaration environnementale et sanitaire -peintures brillantes en phase aqueuse.

**Engelsmann S, Spalding V et Peters S., 2012.** Plastiques.

**Faure M., 1997.** Les Routes cours de l'ENTPE, Tome II, édition Aléas.

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

**ISO 14025., 2006.** International standard. Marquages et déclarations environnementaux — Déclarations environnementales de Type III — Principes et modes opératoires .First Edition.

**Jacques P., 2003.** Déformation des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic.

**Jeandel C et Barman M R., 2011.** Géochimie marine circulation océanique, cycle du carbone et changement climatique.

**Kalantar Z N, Karim, M R et Mahrez A., 2012.** A review of using waste and virgin polymer in pavement. Construction and building materials, 33, 55-62. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>

**Keller E A., 2000.** Environmental geology. Prentice Hall.

**Lacoffe A., 2014.** Etude des causes de dégradation du marquage au sol sur les routes

**Lannoy G., 1977.** Mon grand livre d'expériences chantecler.

**Laurent V, Lyesse.L et Jian Z., 2016.** Mécanique des sols et des roches.

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

**LCPC., 1998.** Catalogue des dégradations de surface des chaussées.

**Magnan J P., 2009.** Résistance au cisaillement des sols pulvérulents. Techniques de L'ingénieur, l'expertise technique et scientifique de référence (c214).

**Monnet J., 2016.** Marche-loisir et marche-déplacement. Thèse de doctorat de l'université paris-4 Sorbonne.

**NBN EN 1748-1., 1997.**Institut belge de normalisation. Verre dans la construction. Produits de base spéciaux. Partie 1 : Verres borosilicates. Bruxelles, IBN.

**NBN EN 1748-2., 1997.** Institut belge de normalisation .Verre dans la construction. Produits de base spéciaux. Partie 2 : Vitrocéramiques. Bruxelles, IBN.

**NBN EN 572., 1995.**Institut belge de normalisation. Verre dans la construction – Produits de base : verre de silicate sodocalcique. Bruxelles, IBN.

**NBN EN 673., 1998.** Institut belge de normalisation. Verre dans la construction. Détermination du coefficient de transmission thermique U. Méthode de calcul. Bruxelles, IBN.

**NBN S 23-002., 1989.**Institut belge de normalisation .Vitrerie (STS 38). Bruxelles, IBN.

**Nelly C., 1988.** Centre géologique et géophysique, université des sciences et technique du Languedoc.

**NF EN 13-285., 2018.** Fuseau granulométrique de matériaux routiers.

**NF P 94 – 053., 1991.** Reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.

**NF P 94 – 068., 1998.** Valeur au bleu de méthylène.

**NF P 94-051., 1993.** Reconnaissance et Essais – Détermination des limites d'Atterberg Limite de liquidité à la coupelle – Limite de plasticité au rouleau."

**NF P 94-066., 1992.** Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux.

**NF P 94-067., 1992.** Sols, reconnaissance et essais. Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux.

**NF P 94-078., 1997.** Sols, reconnaissance et essais. Indice CBR après immersion – Indice CBR immédiat – Indice portant immédiat. Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR.

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

**NF P18-571., 2011.** Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-DEVAL).

**NF P18-573., 2010.** 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 P94-050., 1995.** Reconnaissance et Essais – Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux – Méthode par étuvage

**NF P94-054., 1991.** Reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.

**NF P94-064., 1993.** Reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche-Méthode par pesée hydrostatique.

**Office national de l'énergie., 2006.** Les sables bitumineux du Canada.

**Olivier C., 1991.** Mécanique des milieux poreux.

**Ouali L., 2017.** Etude du comportement d'un mélange de marne et de déchets plastiques dans les corps de chaussées : Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 104.

**Ouamane K.** DG L'AND au service de la gestion des déchets industriels Alger, 25 mai 2017.

**Pajean G., 2007.** L'élaboration du verre » une petite encyclopédie du verre.

**Parry R H G., 1997.** Mohr circles, stress paths and geotechnics.

**Patrice M et Laurent P., 2009.** Retenues d'altitude.

**Picard F.** Le verre et ses propriétés. Présentation <http://slideplayer.fr/slide/10158430/>

**Poulos S J., 1981.** The steady State of Deformation. Journal of geotechnical Engineering.

**Ptrice M, Michel L et Paul R., 2000.** Méthodologie de diagnostic des digues.

**Rabah A., 2017.** Historique de la route en Algérie.

**Rabhi M., 2021.** Journal LIBERTE, (Le traitement des déchets: une opportunité économique, sociale et environnementale).

**Robert D, Holtz, William D et Kovacs., 1991.** Introduction a la géotechnique.

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

**Rogel L et Engelke P., 1997.** Glass as a Road Base Substitute, Garcla and Wright Consultant, Public Works, PP 41-46.

**Salomon J N., 2006.** Précis de karstologie, presses universitaire de bordeaux.

**SETRA., 1996.** Guide pratique courant d'entretien des chaussées.

**Slansky M., 1992.** Terminologie et classification des roches sédimentaires formées de silice, silicates, carbonates et phosphates.

**Terzaghi k., 1999.** Mécanique théorique des sols.

**Towada TH., 2016.** Méthodologies de réhabilitation des chaussées.

**Visa F., 2019.** Les routes. Cours de génie civil de l'institut universitaire de technologie de saint-pierre.

**Zabat A., 2013.** Management des risques dans les projets de trémie méthode MADS MOSAR. Tlemcen, Département de Génie Civil, Algérie.

**Zegane H., 2019.** Étude du comportement d'un mélange de marne, de déchets plastiques et de débris de verre pour une utilisation dans le domaine routier. Mémoire de l'université UMMTO.

## **Cyber graphie**

<https://mcp-menuiserie.com/nos-dossiers-techniques/explication-de-la-condensation-sur-les-fenetres/>.Condensation sur les fenêtres.

[http://fr.wikipeddia.org/wiki/code\\_d%27identification\\_des\\_r%C3%A9sins](http://fr.wikipeddia.org/wiki/code_d%27identification_des_r%C3%A9sins).

<http://www.archiexpo.fr/prod/glashuette-lamberts-waldsassen/product-62657-926360.html>.

<https://docplayer.fr/46208090-Les-essais-de-la-geotechnique-routiere.html>.

<https://fr.scribd.com>.

<https://www.gmartin.fr/blog/2015/01/23/triple-vitrage-ou-vitrage-triple/>.

<https://www.objetconnecte.net/fenetres-intelligentes-futur-0103/>.

<http://www.miroiteriegbm.com/Les-verres-profiles>. Les verres profilés

[Sciences-physiques.ac-Montpellier.fr](http://Sciences-physiques.ac-Montpellier.fr).

<http://www.origer.lu/index.php/fr/types-de-verre-verre-trempe-de-securite-feuillete-feuillete-trempe>. Verre trempé

[www.4geniecivil.com](http://www.4geniecivil.com).