

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

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



## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil  
Option : Géotechnique

### *Thème*

**Etude du comportement d'un mélange de calcaire et de débris de verre pour une valorisation dans la construction routière**

Présenté par :  
**M<sup>elle</sup> BROURI Kamélia**

Devant le jury composé de :

Mr GABI S                      Professeur à l'UMMTOPrésident.  
Mme MEZIANI F              Maitre-assistante A à l'UMMTOExaminatrice.  
Mr BOUDLAL OmarMaitre de conférences A à l'UMMTOPromoteur.

**Promotion : 2019/2020**

## Introduction générale

Toute activité de production où de consommation génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de notre environnement et a de multiples risques pour la santé humaine. L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais. Certes, l'industrie de production reste un moteur essentiel de la croissance économique et de la compétitivité, mais il est également reconnu qu'une réduction de la pollution et l'utilisation rationnelle des ressources et de l'énergie, constituent des impératifs de développement durable et rendent fréquemment les coûts unitaires des produits moins élevés.

Face aux nuisances causées par l'industrie sur l'environnement, l'inquiétude ne cesse de grandir ; et notre domaine le génie civil est appelé à jouer un rôle important dans la protection de la nature et de l'environnement par l'utilisation des déchets solides dans la fabrication des matériaux de construction (liants et bétons) et dans la réalisation des structures (remblais et les assises de chaussées, ...) afin de limiter l'exploitation excessive des ressources naturelles et de diminuer la pollution atmosphérique.

Cependant pour limiter l'extraction abusive des matériaux naturels classiques (sable et gravier), très utilisés dans de vastes programmes de construction, l'exploitation et la valorisation des autres matériaux naturels (calcaire, schiste, marne, ...) ou recyclés (plastique, débris de béton, débris de verre, ...) est aujourd'hui considérée comme une solution d'avenir.

Dans ce travail, nous avons fixé pour objectifs de mettre en évidence, la possibilité d'exploiter et de valoriser les granulats de calcaire et les débris de verre dans la construction routière. Ceci est fait à base de mélanges à différentes proportions de calcaire et de verre. Ces derniers sont d'abord identifiés au laboratoire, ensuite, soumis aux principaux essais routiers, à savoir, les essais Proctor, CBR, fragmentabilité, dégradabilité, Los Ageles, Micro-devalet les essais de cisaillement direct à la boîte, les résultats obtenus sont comparés à d'autres mélanges déjà étudiés dans les travaux précédents (schiste et marne).

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

Le chapitre I, présente des généralités sur les chaussées et les matériaux routiers. Il traite principalement, les définitions des différentes couches constituant une chaussée, les différents types de chaussées, les dégradations, la définition des granulats et les types employés en constructions routières...

Dans le chapitre II, sont définit essentiellement le recyclage et les différents matériaux recyclés. Sont présentés essentiellement le recyclage du verre et les travaux réalisés sur le recyclage du verre ainsi que les domaines d'utilisation.

Le chapitre III, entame la partie expérimentale de ce travail. Il est consacré aux différents essais d'identification sur les matériaux utilisés (granulats de calcaire et débris

de verre), afin de déterminer leurs caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques. Une interprétation des résultats des essais est également donnée dans ce chapitre.

Le chapitre IV, comporte la première série d'essai mécanique (les essais de compactage Proctor et les essais de portance CBR avant et après immersion). Ces essais permettent d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage, ainsi que leur portance sous la circulation du trafic et sous les plus mauvaises conditions hygrométriques. Sont présentés ainsi, les différents modes opératoires, les résultats d'essais et les différentes comparaisons 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.

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 CHAUSSEES

### I.1 Introduction

Le réveil de la route au tout début de XXème siècle, a suivi directement le développement de l'automobile. Mais il a fallu rapidement lutter contre la poussière que soulevaient les voitures en roulant directement sur le macadam. On s'y est appliquée en répandant sur les chaussées toutes sortes des huiles ou de produits chimiques et c'est le DrGuglieminetti(1902) qui a montré les avantages du goudron.

Puis le développement de la circulation a obligé d'élargir les routes et avec l'augmentation de poids des camions ça a nécessité la construction de chaussées plus solides et plus épaisses.

### I.2 Définition de la chaussée

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

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

### I.3 Les caractéristiques d'une chaussée

On définit une route par ses caractéristiques géométriques (son tracé en plan, son profil en travers, son profil en long), par les matériaux utilisés pour la construction des couches qui constituent sa structure et par ses caractéristiques de surface.

### I.4 Structure de chaussées

Une chaussée est composée de plusieurs couches successives qui doivent répondre à des critères de qualités croissants en partant de la PST (partie supérieure de terrassements) pour remonter jusqu'aux couches de roulements.

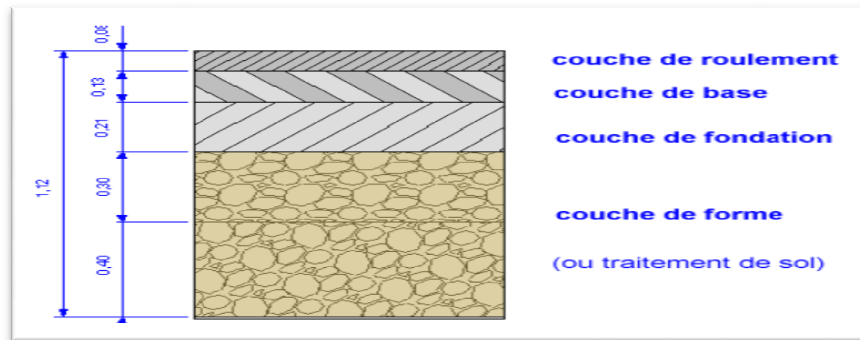


Figure 1.I. Constitution d'une structure de chaussée type (LCPC, 1994).

### 1. Couche de forme

Elle est généralement prévue pour répondre à certains objectifs en fonction de la nature du sol support.

Sur un sol rocheux : elle joue le rôle de nivellement afin d'aplanir la surface ;

Sur un sol peu portant : elle assure la portance suffisante à court terme permettant aux engins de chantier de circuler librement.

Eventuellement une couche drainante ou anti-contaminant peut être intercalée entre la couche de forme et la couche de fondation qu'en peut nommer « sous-couche ».

### 2. Couche de fondation

Elle permet de répartir les pressions sur la couche de forme, afin de maintenir les déformations.

### 3. Couche de base

C'est une couche intermédiaire, permet le passage progressif entre la couche de roulement CR et la couche de fondation CF, elle reprend les efforts verticaux et répartir les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

### 4. Couche de surface

Cette couche est en contact direct avec le pneumatique de véhicule et la charge extérieure, elle est composée de deux couche : **couche de roulement** et **couche de liaison**.

➤ **Couche de roulement** : elle a pour rôle

- Encaisser les efforts de cisailent provoquées par la circulation.
- Imperméabiliser la surface de la chaussée.
- Assurer la secrète (adhérence) et le confort (bruit).

➤ **Couche de liaison** : elle a pour rôle essentiel d'assurer une transition avec les couches inférieures les plus rigides.

### I.5 Les éléments géométriques d'une chaussée

- ✓ **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 circulations.
- ✓ **Accotements** : zones latérales de la plate-forme qui bordent extérieurement la chaussée.

L'accotement est constitué de la berme et de la bonde dérasée.

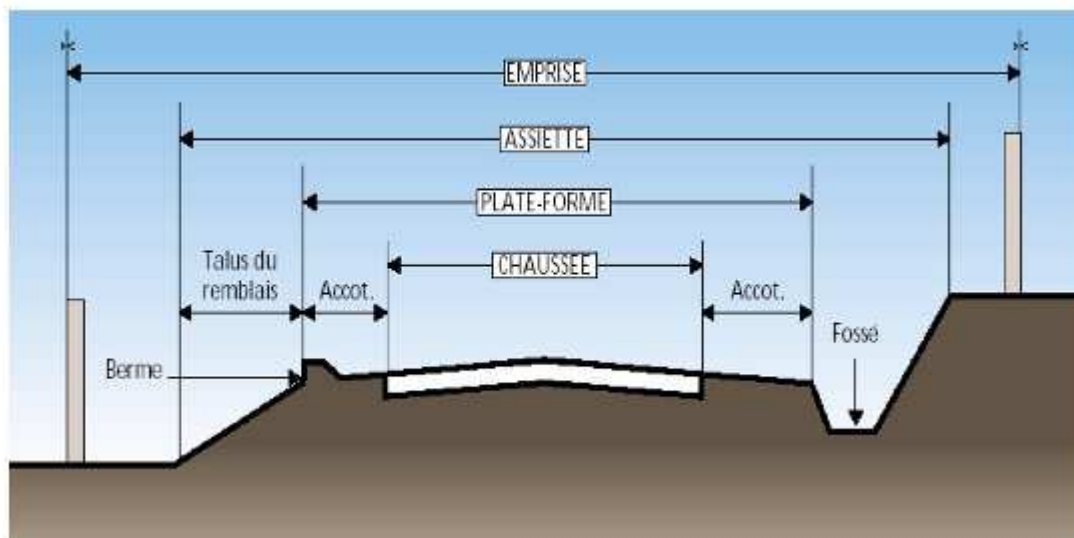


Figure 2.I. Profil en travers type d'une route (Joseph Abdo et al, 2009).

### I.6 Les différentes catégories de chaussée

Il existe deux catégories de chaussée :

#### 1- Les chaussées classiques (souples et rigides)

**Les chaussées souples** : sont des structures de chaussée qui comportent une couverture bitumineuse relativement mince (<15cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposent sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités.

L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

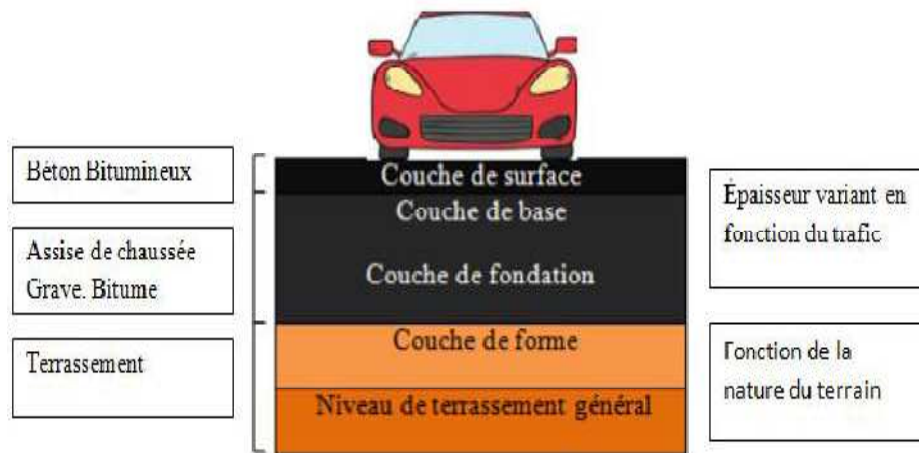


Figure 3.I. Structure type d'une chaussée souple.

**Les chaussées rigides** : ces structures comportent une couche de béton de ciment.

La couche de béton repose soit sur une couche de fondation, soit directement sur le support de chaussée.

La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu ou discontinu).



Figure 4.I. Construction d'une chaussée en béton de ciment.

## 2- Les chaussées inverses (mixtes ou semi-rigides)

### Les chaussées à structure mixte

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

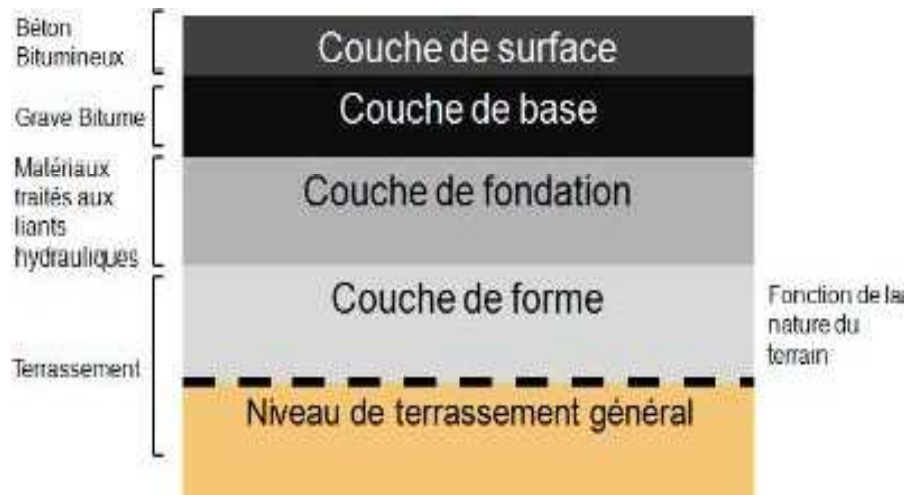


Figure 5.I. Constitution d'une chaussée à structure mixte.

### Les chaussées à structure semi-rigide

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

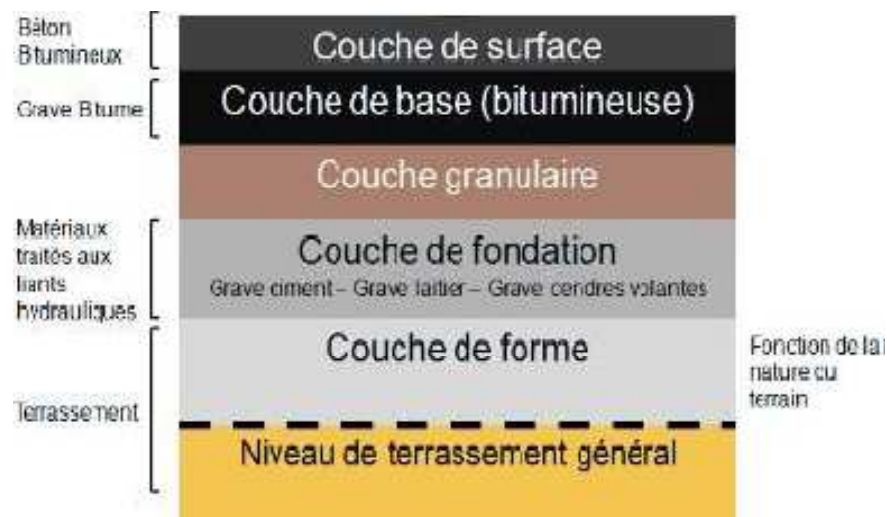


Figure 6.I. Constitution d'une chaussée à structure semi-rigide.

Tableau 1.I. Familles de structures de chaussées.

Structures « type »	Nature des couches		
	SURFACE	BASE	FONDATION
Souple	Bitumineuse	Matériaux granulaires	
Bitumineuse épaisse	Matériaux bitumineux		
Semi-rigide	Bitumineuse	Matériaux traités aux liants hydrauliques	
Rigide	Béton de ciment		MTLH
Mixte	Matériaux bitumineux		MTLH
Inverse	Bitumineuse	Graves non traitées	MTLH

## I.7 Les dégradations des chaussées

L'évaluation des chaussées repose sur une série de mesures et d'observations visuelles qui permettent d'établir la condition de la structure, de diagnostiquer les causes des dégradations apparentes et de cibler les solutions les plus appropriées.

Les dégradations des chaussées, selon le catalogue des dégradations de surface des chaussées du (LCPC, 1998), peuvent être divisées en quatre familles : les arrachements, les mouvements de matériaux, les dégradations de déformations, les fissures.

### 1- Les arrachements

Ces dégradations concernent plutôt la qualité de la couche de surface et en ce sens des problèmes de sécurité routière en rapport avec l'adhérence et l'uni des chaussées.

Ces phénomènes sont dus soit à l'usure de la couche de surface, l'arrachement des gravillons du revêtement, le départ localisé de matériaux de la couche de surface, le départ de gravillon de la couche de surface ou bien le départ du liant autour des granulats dans la couche de surface.



Figure 7.I. Dégradation d'arrachement.

## 2- Les mouvements de matériaux

Ces dégradations sont causées par des remontées du liant à la surface de la chaussée, par l'enfoncement de gravillons dans l'enrobé en période chaude, les remontées des éléments fins à la surface de chaussée ; ou par l'éjection de l'eau à la surface lors du passage des véhicules lourds par suite de l'existence de cavités sous la couche de surface.



Figure 8.I. Remonté des fines: dégradation franche, significative et étendue (LCPC ,1998).

### 3- Les dégradations de déformations

Ces dégradations sont en général celles qui donnent des déformations visibles en surface, comme les phénomènes irréversibles suivants : l'ornièrisme, l'affaissement, le gonflement, le bourrelet, le décalage de joints de dalle ou de bord de fissure, le flambement, les déformations de forme de tôle ondulée.

Ces dégradations ont plusieurs raisons, nous pouvons citer le sous-dimensionnement ou une mauvaise qualité de l'assise entraînant des contraintes verticales excessives à la surface du sol support ou des couches non traitées support par défaut de drainage ou conséquence du dégel; un drainage ou assainissement localement défectueux; un retrait hydrique du sol support.



Figure 9.1. L'ornièrisme (LCPC, 1998).

### 4- Les fissures

Avec le problème de l'ornièrisme, les fissures sont considérées comme un des plus grands modes de dégradation de chaussées. En effet leur présence associée ou non à l'eau met en péril la durabilité à terme de la structure sous le passage répété de véhicules lourds.

Causes possibles :

- Tassement du corps de chaussée (retrait ou gonflement de la couche de base) ;
- Joint de bandes d'épandage ou reprises du travail au finisseur (tapis d'enrobés) mal exécuté,
- Elargissement de chaussée exécuté avec un dimensionnement différent de la chaussée existante,
- Mauvais accrochage de la couche de surface sur la couche de base,
- Différence importante entre la portance du corps de chaussée et celle du tapis d'enrobés,
- Effet horizontaux importants dus à la circulation (freinage, virages),
- Manque de stabilité de la chaussée sur la rive (accotement non rechargé),

- Effet du gel.



Figure 10.I. Fissures dans une chaussée.

## I.8 Les granulats et mélanges routiers

Les mélanges se composent des granulats de différentes tailles et parfois de liants, qui agissent comme de la colle.

Les granulats sont classés en sables, gravillons ou pierres selon leurs dimensions. Ils proviennent de carrière ou de roches massives. Ils peuvent être utilisés seuls ou en associations avec un liant qui leur apporte la cohésion interne désiré.

Les liants, qu'ils soient de la famille du bitume ou de celle du ciment agissent comme une colle. Ils transforment un assemblage de grains juxtaposés à une structure monolithique.

### I.8.1 Les granulats routiers

La norme française définit le granulat comme un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm, destiné notamment à la confection des mortiers et des bétons ainsi qu'à celle des couches de roulement, de base et de fondation des chaussées et aux voies ferrées (Jeuffroy et Sauterey, 1991).

Ils sont appelés fillers, sablons, sables, gravillons, graves ou ballasts suivant leurs dimensions. Les granulats peuvent être d'origines diverses :

- Naturelles comme les alluvions ou les formations résiduelles,
- Provenir du concassage des roches massives comme (basalte, calcaire, grès, etc.) ;
- Artificiels ou provenant de sous-produits industriels.

## I.8.2 Caractéristiques géométriques des granulats routiers

Les matériaux constituant les différentes couches d'une chaussée peuvent être des matériaux concassés ou roulés. Cependant, afin de disposer d'un angle de frottement le plus fort possible, il est nécessaire d'exiger un indice de concassage d'autant plus élevé que le trafic est plus important et la charge légale à l'essieu plus lourde.

Les caractéristiques géométriques principales des granulats routiers sont : l'état de surface, l'angularité, la forme et la granularité (Gaye, 1995).

### ➤ Etat de surface des granulats

Dans le cas des roches poly cristallines ( $\varnothing > 1$  mm), la rugosité dépend de la structure de la roche. Si le grain est monominéral ( $\varnothing < 1$  mm), la surface est généralement lisse.

Pour les roches poly cristallines, la rugosité dépend de la dimension « d » des cristaux. Plus une roche a un « grain fin », plus sa cassure est lisse. Par contre, les roches à « gros grain » ont toujours des surfaces rugueuses.

L'état de surface des grains joue un rôle au niveau de la maniabilité des matériaux, de la stabilité des assises non traitées et de la microrugosité des couches de surface. Cependant, l'action du trafic tend à polir la surface des grains, mais il est admis qu'une bonne microrugosité assure généralement une bonne adhérence à faible vitesse.

### ➤ Angularité des granulats

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement, en améliorant l'adhérence, et pour ceux des assises de chaussées, dont elle améliore la stabilité.

Pour un granulats concassé de roche massive, elle est égale à 100 %.

Pour un granulats d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :

- L'indice de concassage  $IC$ , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension  $D$  du granulats élaboré,

- Le rapport de concassage  $RC$ , rapport entre  $d$  du matériau soumis au concassage et  $D$  du granulats obtenu.

Pour les assises de chaussées non traitées, l'angularité favorise les propriétés mécaniques en augmentant l'angle de frottement interne : celui-ci augmente d'environ  $12^\circ$  dans un essai triaxial quand on passe des billes de verre entièrement roulées aux billes de verre concassées. Pour les couches de roulement, ce facteur favorise l'adhérence pneumatique, la rupture du film d'eau et le drainage.

La maniabilité et la compactibilité sont également liées à l'angularité : le déplacement relatif des grains et leur mise en place sont facilités lorsqu'ils sont arrondis.

### ➤ La forme des granulats

Elle joue un rôle important à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats ou allongés réduisant la compacité et la stabilité.

Elle a aussi une grande influence sur les caractéristiques mécaniques des matériaux (Los Angeles, Micro-Deval, fragmentation dynamique).

### ➤ La granularité des granulats

Elle caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. La granularité a une importance primordiale car elle permet d'obtenir une compacité maximale et d'éviter la ségrégation au moment de la mise en œuvre.

La granularité que l'on peut maîtriser et optimiser pour tous les matériaux, apparaît comme le recours le plus général pour corriger les autres caractéristiques géométriques des granulats et dans une certaine mesure une résistance mécanique déficiente.

## I.9 Les matériaux utilisés dans les couches d'assise

Il existe 4 matériaux différents grâce auxquels on peut former le corps de chaussée:

- Les graves non traitées ;
- Les graves et les sables traités aux liants hydrauliques ;
- Les graves et les sables traités aux liants hydrocarbonés ;
- Les bétons de ciment.

### I.9.1 Les graves non traités (NF P 98-129)

C'est le plus ancien des matériaux modernes. Depuis les années 50, elle n'a pas cessé d'être améliorée afin de convenir à la demande actuelle. C'est un mélange à granularité continue de cailloux, de graviers et de sables, avec généralement une certaine proportion de particules plus fines. On les obtient en concassant soit des pierres naturelles, ou alors des matériaux de récupération.

Utilisation

- Plates-formes supports de chaussées ;
- Couches de fondation ou fondation /base.

Épaisseur de mise en œuvre 15 à 35 cm.

### I.9.2 Les graves et les sables traités aux liants hydrauliques

Le liant permet de rigidifier la structure de grave et donc de lui assurer de meilleures caractéristiques. Lors des premières utilisations de cette méthode, on a utilisé le ciment comme liants, puis on a sans cesse amélioré les liants permettant d'accroître leur efficacité.

Pour avoir un corps de chaussée valable qui résistera au trafic, de nombreux critères sont à prendre en compte :

**Connaître précisément la composition des liants utilisés :** Pour respecter cela, les liants sont fabriqués en centrale, où ils sont composés avec beaucoup de soin pour qu'ils respectent toujours les mêmes caractéristiques.

**Ne pas mettre trop de liants dans la fabrication du matériau :** Pour cela, il existe des normes qui permettent de fixer le pourcentage de liants de chaque sorte à utiliser.

**Avoir une grave possédant les caractéristiques requises :** En effet, il faut savoir que le liant poursuit son travail même quand la route est en circulation, c'est pourquoi la grave doit avoir certaines caractéristiques qui empêchent les problèmes dus à la prise du liant de se produire.

Pour les déterminer, il existe une fois encore des normes qui permettent de déterminer quelles graves utilisées.

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

#### **Utilisation**

Couches de fondation, base ou fondation /base.

Épaisseur souhaitable d'utilisation 18 à 28 cm.

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

#### **Utilisation**

Réalisation des couches de fondation.

Épaisseur souhaitable 18 à 32 cm ;

Épaisseur maximale par couche de 32 cm ;

### **I.9.3 Les graves et les sables traités aux liants hydrocarbonés (ou liants noirs)**

On utilise ici, comme liant du bitume soit sous forme de bitume pur ou sous forme d'émulsion.

**Graves-bitume:** C'est donc un mélange de graves et de bitume pur. Comme pour ce que nous avons vu précédemment, la grave et le bitume doivent avoir certaines caractéristiques. Par exemple, les granulats doivent avoir une certaine dimension (comprise dans une fourchette) pour obtenir les caractéristiques recherchées.

**Sables-bitume:** Ici, aussi certaines caractéristiques du sable et du bitume sont requises pour obtenir le mélange que l'on veut. On améliore les caractéristiques du sable en lui additionnant certains autres éléments, comme la chaux, le ciment, ou même du sable broyé.

**Graves-émulsion:** Lorsqu'il est en émulsion, le bitume se fixe sur les éléments fins en constituant un mastic qui enchâsse les gros grains et les scelle entre eux. Le mélange sortant du malaxeur est très maniable et le reste jusqu'à la fin du compactage. Ce matériau est souvent utilisé pour les reprofilages car elle peut être mise en œuvre en faible épaisseur et même se raccorder à zéro sur une chaussée déformée. On l'utilise également en renforcement et en couche de base. Il est bon de noter que c'est une technique peu coûteuse en énergie.

#### **I.9.4 Bétons de ciment (NF P 98-170)**

Ce sont des mélanges, fabriqués en centrale, de granulats, de ciment et d'eau. Les bétons ont la propriété d'être maniables pendant un certain temps après leur fabrication, puis de durcir progressivement jusqu'à atteindre des résistances très élevées. Les particularités des bétons routiers ne sont pas différentes de celles des bétons utilisés dans d'autres applications.

Utilisation :

- Couches de base et/ou couche de roulement ;
- Réalisation des fondations de chaussées à revêtement en béton pervibré et des fondations des chaussées à revêtement en pavés de pierre naturelle ou en béton.

#### **I.10 Conclusion**

La réalisation des ouvrages routiers nécessite des quantités en agrégats de plus en plus croissante en rapport avec le développement des pays, au point où les carrières restent parfois incapables de satisfaire les besoins nationaux. Cependant, la nécessité d'exploitation d'autres sources de matériaux devient indispensable pour assurer la continuité de l'approvisionnement des projets.

Dans le chapitre suivant seront présentés les matériaux traités dans cette étude, notamment les matériaux recyclés.

# CHAPITRE II

## RECYCLAGE ET VALORISATION DES DECHETS

### II.1 Introduction

Le recyclage est utilisé dès l'âge du bronze. À cette époque, les objets usagés en métal sont fondus afin de récupérer leur métal pour la fabrication de nouveaux objets. Dans toutes les civilisations, l'art et la manière de « faire du neuf avec du vieux » existent. Par exemple, les vieux chiffons, puis les papiers et cartons, sont récupérés pour faire de la pâte à papier. La situation change avec le développement progressif puis massif de l'industrialisation et de la consommation. La gestion des matières premières et des déchets devient de plus en plus difficile, les premières devenant trop rares et les seconds trop envahissants.

Le recyclage devient alors progressivement un enjeu dans la sauvegarde de l'environnement.

### II.2 Définition de recyclage

Le recyclage peut être défini comme recouvrement ou réutilisation des matériaux ou articles. En d'autres mots, toute méthode d'extraction de valeur en forme d'énergie ou matière à partir des déchets à n'importe quel moment du cycle de vie d'un produit. (Chamarande et Jolivet, 2015).

Dans le domaine de génie civil, il consiste en la transformation des débris en vue de leur utilisation comme matière secondaire. Certains débris peuvent être utilisés tels quels, comme remblais, de même que les terres non contaminées. D'autres, ne pourront être directement réemployés. Il faudra d'abord en extraire les éventuels contaminants (bois, papiers, métaux, plastiques...), puis les concasser. Les granulats ainsi obtenus pourront être réutilisés lors de la construction de routes ou de travaux d'infrastructure.



Figure 1.II. L'anneau de Moebius, logo officiel indiquant le caractère recyclable d'un produit.

### II.3 Les chiffres du recyclage dans le monde

Les chiffres de la production de déchets, et du recyclage, sont vertigineux. D'après un rapport de la Banque Mondiale, le monde produit 2,01 milliards de tonnes de déchets par an, dont 33 % ne seraient pas traités correctement. Un chiffre qui va aller en grandissant dans les années qui viennent, à cause de l'augmentation de la population et de l'occidentalisation de nos modes de vie.

Des montagnes de déchets, qui posent des problèmes en termes environnementaux (pollution des sols, des eaux, menaces pour la biodiversité...) mais aussi sociaux, surtout dans les pays du Sud : émanations toxiques des déchets brûlés, effondrement de décharges sauvages...

Le traitement des déchets dans le monde représente également une véritable manne financière, puisqu'il faut bien stocker, voire recycler ces déchets. Le Bureau International du Recyclage estime qu'il s'agit d'un business à hauteur de 175 milliards d'euros dans le monde. <https://www.consoglobe.com>.



Figure2.II. Le recyclage dans le monde.

### II.4 Les types de 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 ou pour séparer par courants de Foucault ;
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

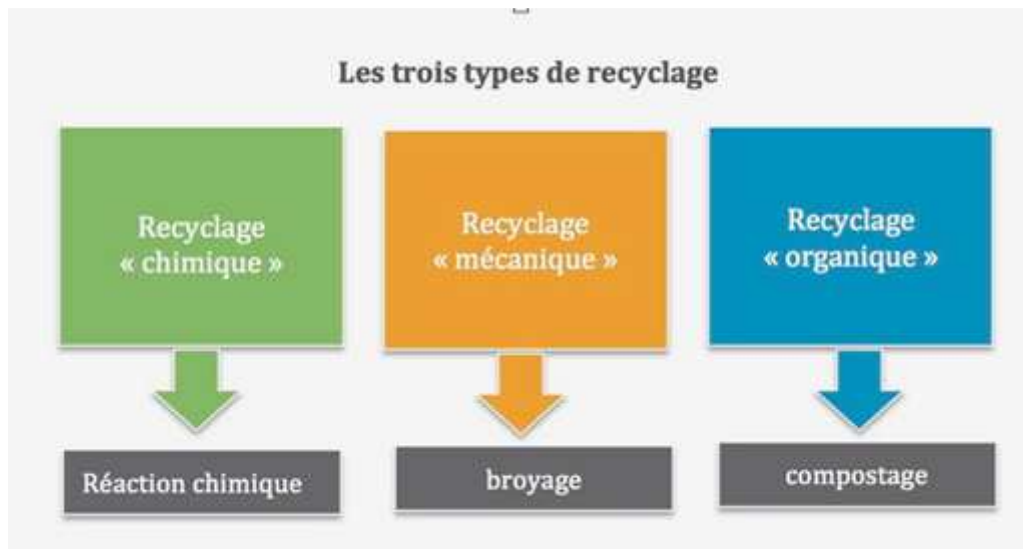


Figure 3.II. Les types de recyclages.

## II.5 Les étapes du recyclage

La chaîne du recyclage comporte différentes étapes :

### - Collecte de déchets

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Dans les pays développés, les ordures ménagères sont généralement incinérées ou enfouies en centres d'enfouissement pour déchets non dangereux.

### - Transformation

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

### - Commercialisation et conservation

Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs.

## II.6 Les avantages et les inconvénients du recyclage

### II.6.1 Les avantages du recyclage

#### 1-Le recyclage minimise la pollution

Toutes les formes de pollution dans le monde moderne émanent des déchets industriels. Le recyclage de ces déchets industriels, tels que les plastiques, les canettes et les produits chimiques, contribue considérablement à réduire les niveaux de pollution, car ces déchets sont réutilisés au lieu d'être simplement jetés de manière imprudente.

## **2-Le recyclage minimise le réchauffement climatique**

Lors de l'élimination des déchets, d'énormes quantités de matériaux sont brûlées, entraînant l'émission de vastes gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le soufre et l'azote, qui contribuent au changement climatique et au réchauffement de la planète.

Le processus de recyclage implique une combustion minimale et les déchets sont transformés en matériaux réutilisables avec un impact nul ou minimal sur l'environnement. L'ensemble du processus de traitement et de fabrication des produits à partir de déchets produit peu de gaz à effet de serre, car les industries de recyclage de déchets brûlent peu de combustibles fossiles.

### **II.6.2 Les inconvénients notables du recyclage**

#### **1- Coûts d'investissement initiaux élevés**

Le recyclage n'est pas toujours rentable. Construire une nouvelle unité de recyclage des déchets nécessite beaucoup de capital. Les coûts d'accompagnement comprennent l'achat de différents types de véhicules utilitaires, la mise à niveau de l'unité de recyclage, la gestion des déchets, l'élimination des produits chimiques et la formation des locaux en organisant des programmes et des séminaires utiles.

#### **2- Les sites de recyclage sont toujours peu hygiéniques, dangereux et inesthétiques**

Rendez-vous sur n'importe quel site de recyclage des déchets et vous tomberez presque toujours sur des conditions insalubres, malsaines et disgracieuses. Les endroits où tous les types de déchets sont empilés constituent un terrain propice à la formation de débris et à la propagation de maladies infectieuses. Les produits chimiques nocifs provenant de ces déchets peuvent également être dangereux.

## II.7 Les matériaux recyclés

Le nombre et la qualité des études des filières de recyclage sont très variables selon le produit ou matériau considéré.

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 transformés en composte ou incinérés. En plus de ces déchets de légumes, les déchets ménagers de type épluchures de fruits et légumes permettent de produire du biogaz, puisqu'elles se composent de la matière première nécessaire à cette production 'la biomasse'. Le bois quant à lui est valorisé en énergie renouvelable tel que l'électricité et la chaleur.

**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 4.II. Les différentes filières du recyclage.

Tableau 1.II. Quantité recyclée des emballages (verre, plastique, aluminium)

(http://www.bafu.admin.ch)

Année	Verre		Plastique		Aluminium	
	Quantité recyclée (tonne)	Taux de recyclage (%)	Quantité recyclée (tonne)	Taux de recyclage (%)	Quantité recyclée (tonne)	Taux de recyclage (%)
2000	60011	91	23000	82	1760	90
2001	246765	91	25989	82	2370	91
2002	227300	94	27306	72	2602	91
2003	231731	95	32597	71	2900	85
2004	209294	95	31495	74	3250	88
2005	210204	95	31604	75	3750	90
2006	215645	96	32366	76	4362	90
2007	226869	95	33880	78	5000	90
2008	228390	95	35822	78	5800	91
2009	238384	95	37543	81	6400	91
2010	236733	94	36637	80	6900	91
2011	244733	94	38010	81	8000	91
2012	241683	96	37571	81	9050	92
2013	244775	96	38035	83	9100	91

## II.8 Le recyclage du verre

Le verre est durable, inerte, hygiénique, malléable, esthétique et naturel. Pour cette raison il demeure incontournable comme matériau d'emballage pour les boissons et les aliments.

Parmi les qualités du verre, il en est une d'importance : sa recyclabilité. Le verre évolue en effet dans un circuit de matières fermé à 100%.

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



Figure 5.II. Bouteilles de verre jetées sur les bords de routes.

## II.9 Origines du verre recyclé

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

**a) Le verre ménager** : issu des collectes sélectives (container verre) et des collectes multi matériaux (poubelle verte) cette source représente 85 % du verre recyclé et se caractérise par une composition chimique assez homogène et stable, pour une région donnée, puisqu'il s'agit du mélange de tous les emballages en verre consommés sur un territoire bien défini; par contre ce verre est très pollué par des contaminants minéraux (cailloux, poteries, porcelaine...) et par des contaminants organiques (bois, papiers, plastiques, résidus alimentaires...).

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

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

## II.10 Le cycle de recyclage de 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 du verre résultant du tri, peut constituer jusqu'à 80% des nouveaux emballages.



Figure 6.II. Cycle du recyclage du verre.

### II.11 Valorisation des matériaux recyclés en Génie Civil

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

#### II.11.1 Pneus usagés

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



Figure 7.II. Pneus usagés.

### II.11.2 Déchets des chantiers de BTP

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



Figure 8.II. Déchets des chantiers de BTP.

### II.11.3 Laitiers sidérurgiques

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

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



Figure 9.II. Laitier d'aciérie de conversion.

#### II.11.4 Les déchets plastiques

La réutilisation des déchets plastiques dans les corps de chaussées a déjà été abordée dans plusieurs pays étrangers tels que les Etats-Unis, l'Allemagne ou encore la France, mais aussi en Afrique.

**-En Allemagne :** mise au point d'un revêtement routier à base de granulats concassés et d'un liant thermoplastique constitué de 80% de déchets plastiques et de 20% de bitume. La technique consiste à fabriquer des plaques appelées Plasphalt pouvant être posées directement sur les assises de chaussées (Recherche routière, 1977).

**-Aux États-Unis :** fabrication de dalles de 6cm d'épaisseur à base de granulats de bitume et de plastique provenant de pots de lait (polyéthylène) (Recherche routière, 1977).



Figure 10.II. Déchets en plastique ( [www.emwelt.lu](http://www.emwelt.lu)).

## **II.12 Utilisation de verre recyclé dans la construction routière**

Du point de vue technique routière, les recherches sont peu nombreuses et à part les États-Unis et le Canada où des routes avec incorporation de déchets de verre ont été réalisées, ces recherches n'en sont qu'au stade expérimental.

### **II.12.1 Utilisation des résidus de verre dans les enrobés bitumineux**

Un grand nombre d'expériences ont été menées visant l'utilisation des résidus de verre comme granulats 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.12.2 Utilisation des résidus 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.

Il en résulte que l'usage des rebuts de verre comme matériaux de construction ne causa 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.

La comparaison des coûts de construction entre les matériaux « mélangés » à base de résidus de verre et ceux composés de matériaux naturels démontra que les matériaux « mélangés » coûtent relativement plus cher que les matériaux naturels. Une partie de ces coûts a été attribuée aux conditions de traitements additionnels (tri et concassage) du verre et au procédé de mélange du verre et des granulats naturels (Roger et Engelke, 1997).

À la lumière des conclusions de ce projet, la ville de Devine a bénéficié de 4000 pieds de route de bonne qualité et constituée d'une fondation en débris de verre. Ce projet démontra également que le débris de verre s'est avéré une excellente solution de rechange dans la construction et que l'on pourrait poursuivre l'utilisation des débris de verre dans le futur comme matériau de construction. Il n'a pas été nécessaire de prendre des précautions extraordinaires relativement à la conception et à la réalisation de ce projet. Celui-ci démontra que l'on pouvait aussi utiliser les débris de verre comme matériau de remblai.

Le potentiel de réduction des coûts réalisée par l'utilisation des résidus de verre provient surtout des économies liées à leurs coûts de disposition.



Figure 11.II. Équipement nécessaire au broyage du verre.

### **II.13 Autres utilisations envisageables**

En dehors du domaine routier d'autres utilisations du verre sont envisagées ou envisageables ; éventuellement pour un prix de revient moins élevé, dans la fabrication de briques, de céramiques, de laine de verre ou de billes de verre, pour peintures routières, mais là encore, dans ces domaines de réutilisation, la collecte et le tri poseront des problèmes difficiles à résoudre.

### **II.14 Conclusion**

L'industrie routière est un moyen de valoriser les déchets générés par les autres industries.

Le verre brisé peut présenter des propriétés intéressantes pour un matériau de chaussée puisqu'il s'agit d'un matériau très perméable et, par conséquent, peu capillaire donc peu susceptible au gel. Néanmoins, son comportement mécanique sous l'effet du trafic doit satisfaire les conditions exigées par les normes pour valider son utilisation dans le domaine routier.

Cependant, vu les différentes sollicitations auxquelles il sera soumis en pratique, la connaissance d'autres caractéristiques physiques et mécaniques du verre est indispensable pour confirmer son utilisation dans le domaine routier. Cette caractérisation mécanique fera l'objet des prochains chapitres.

Le chapitre suivant est consacré à la présentation et à l'identification des différents matériaux utilisés dans cette étude.

## CHAPITRE III

# IDENTIFICATION DES MATERIAUX

### III.1 Introduction

Il est évident que le monde des matériaux de construction est très vaste, pour cela, il est obligatoire de faire une identification pour connaître leurs caractéristiques.

Pour identifier un sol on doit passer par quelques essais qui se réalisent au laboratoire, appelées « essais d'identification » ; à savoir :

- La teneur en eau ( $w$ ) ;
- La masse volumique des grains solides ( $\rho_s$ ) ;
- La masse volumique sèche ( $\rho_d$ ) ;
- Les limites d'Atterberg.

### III.2 Les matériaux à identifier

Les mélanges étudiés dans ce travail sont composés de deux matériaux principaux ; à savoir les granulats de calcaires et les débris de verre.

#### III.2.1 Le calcaire

##### III.2.1.1 Définition des roches calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire carbonatée, composée principalement de calcite ou carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) (au moins 50 %) et de carbonate de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ). Suivant sa localisation, le calcaire peut également contenir de la dolomite et de l'argile (aragonite ou marne) (Castaing et Geisle, 1972).

##### III.2.1.2 La formation des roches calcaire

On pense que les roches calcaires existent depuis plus de 3 milliards d'années, ce qui correspond à l'ère précambrienne. Les mers peu profondes de l'époque fournissaient un terrain idéal pour la formation du carbonate de calcium.

Les roches calcaires peuvent se former :

- Soit, par accumulation biologique de carbonate de calcium se produit dans une eau (de mer de préférence) comprise entre 25 et 30 °C contenant des coraux, des algues et des coquillages. Les eaux ne doivent pas être trop profondes pour permettre aux organismes de profiter des rayons solaires : on parle alors de calcaire d'origine organique.

- Soit, par précipitation chimique ou biochimique de carbonate de calcium : on parle alors de calcaire d'origine chimique.

Parmi les calcaires d'origine organique, on trouve les calcaires à foraminifères comme la craie.

Parmi les calcaires d'origine chimique, on trouve la calcite, le calcaire oolithique, pisolithique ou encore lithographique (utilisé en imprimerie avec un grain très fin).

Les zones les plus favorables pour la formation du calcaire se trouvent sur le bord des continents (essentiellement en zones tropicales et équatoriales). Les récifs qui s'y développent, forment une barrière qui casse les courants marins. On distingue alors trois milieux.

- La barrière de corail et sa faune associée.
- La plateforme interne, protégée des courants est donc favorable au développement de la faune et de la flore.
- La plateforme externe, soumise à la violence des courants marins où les coquilles seront brisées.

**Remarque :** La force des courants et la faune, différents dans chaque milieu, vont définir les différents types de calcaire. <https://www.lhoist.com/fr/origine-des-roches-calcaires>

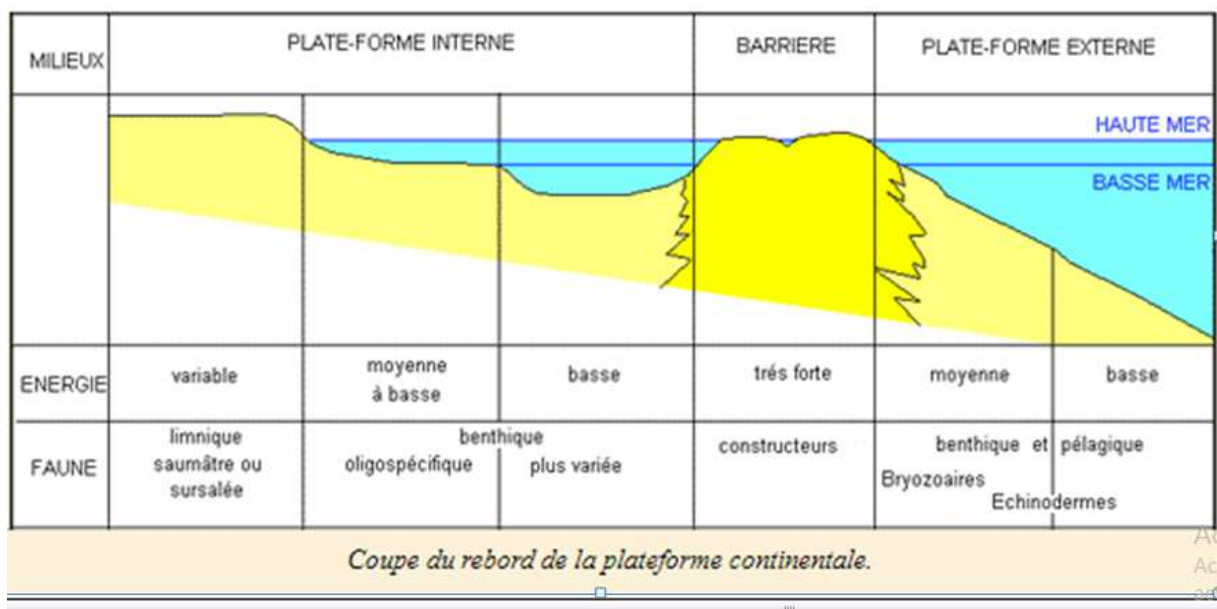


Figure 1.III. Les zones les plus favorables pour la formation du calcaire.

### III.2.1.3 Les origines des roches calcaires

- **Origine détritique**
  - Calcaires détritiques.
- **Origine organique**
  - 1- **Calcaires construits (calcaires coralliens)**
    - Calcaires à rudiste.
    - Calcaires à bryozoaires.
    - Calcaires d'algues.
  - 2- **Calcaires d'accumulation (calcaires à entroques)**
    - Calcaires à foraminifères.
    - Lumachelles.
- **Origine chimique ou biochimique**
  - Calcaires lacustres.
  - Tufs ou travertins.
  - Calcaires grumeleux ou noduleux
  - Calcaires marneux et les marnes (Castaing et Geisle, 1972).

### III.2.1.4 L'utilisation des roches calcaires

Le calcaire est une roche sédimentaire composée en grande partie ou entièrement de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ). Les roches carbonatées, et dans certains cas le marbre, qui ressemblent étrangement au calcaire, sont importantes dans l'industrie de la construction comme pierre de construction et granulats, et en tant que première composante du ciment portland et de la chaux.

Le calcaire est aussi utilisé dans la fabrication du verre et de bon nombre de produits chimiques, comme matières de charge, abrasifs ou amendements pour le sol.

#### III.2.1.4.1 L'utilisation des roches calcaires dans la construction

- Comme matériau en sculpture.
- Comme roche à bâtir .
- Comme matériau d'empierrement de la voirie : macadam, graves calcaires, ballast, d'un usage très fréquent.
- Comme matière première entrant dans la fabrication du ciment.
- Comme sable et granulats dans la fabrication des bétons, plus rarement dans les enrobés bitumineux, pour les calcaires les plus durs.

### III.2.1.5 Les gisements de calcaire et la production des agrégats à Tizi-Ouzou

Pour un besoin annuel en sable et agrégats de carrière estimé à 2,5 millions de m<sup>3</sup> pour l'approvisionnement de ses chantiers de construction et des travaux publics, la wilaya de Tizi-Ouzou n'en produit qu'un peu plus de 24144 m<sup>3</sup>, soit à peine 2 % de la demande exprimée, selon une estimation de la direction de l'énergie et des mines (DEM). Cette quantité "insignifiante" de matériaux alluvionnaires est actuellement produite par six carrières d'une capacité totale d'installation de 440.000 m<sup>3</sup>/an, "mais ce potentiel est insuffisamment exploité, pour cause d'utilisation de moyens d'extraction mécanique (brise roche), et des équipements vétustes, dont notamment des stations de concassage et les engins de transport", a indiqué le chef de service des mines et contrôle technique à la DEM, Idris Mourad.

Relevant le paradoxe de "manque d'agrégats dans une région où la pierre (ressource) est plus qu'abondante", ce responsable a signalé que "depuis une dizaine d'années, quatre autres carrières ont été contraintes de cesser leurs activités par des riverains aux sites d'exploitation, arguant des motifs liés aux nuisances et autres considérations environnementales".

### III.2.1.6 Localisation géographique du calcaire de la région de Tizi-Ouzou

**Massif d'Azrou :** ou affleure des calcaires intéressants pour granulats, d'ailleurs cette substance y est exploitée pour ces derniers. Au sud de ce massif, il existe toute une série de crêtes d'altitude 1600m à 1956m, formées de roches dolomitiques, qui se poursuivent jusqu'au col de Tirourda.

**Massif d'Adrar Timesouin :** au nord-est de Tizi – N'Kouilal, affleurent tout le long de la route des formations de calcaire dolomitique à relief peu accidenté. A la base de ces crêtes, les roches se débitent en blocs moyen à gros ; ces zones constitueraient des réserves non négligeables, pour matières premières à granulats.

Il existe deux gisements de calcaire jurassique dans la wilaya de TiziOuzou (Bouadnane- AzrouTidjer ) qui sont à présent en activité. On les exploite dans un volume restreint pour des agrégats et des pierres de taille.

### III.2.1.7 Site d'extraction du calcaire étudiée

Le site choisis est donc situé dans la wilaya de Tizi-Ouzou comme indiqué sur la carte ci-dessous :



Figure 2.III. Situation géographique du site de prélèvement des échantillons.



Figure 3.III. Carrière d'extraction du Calcaire.

## III.2.2 Le verre

### III.2.2.1 L'histoire du verre

L'histoire du verre remonte à la Préhistoire : en 100 000 av. J.-C., l'obsidienne, un verre volcanique naturel, est déjà taillée par l'homme pour former des pointes de flèches ; les tectites, billes de verre formées par des impacts avec des météorites, servent également de bijoux ; enfin, les fulgurites, petits tubes issus de la fusion du sable atteint par un éclair, sont connus.

Le verre moulé par la main de l'homme apparut, lui, environ 7000 ans avant J.C, tandis que le premier vase de verre à dû attendre à 1500 avant J.C pour pointer son nez. Le premier pot à fruit est un bien de lux qu'on retrouve dans les grandes maisons anglaises du milieu du 19<sup>e</sup> siècle. Suivant le cours de l'histoire, la production de verre s'est industrialisée avec l'arrivée, en 1903, de la machine automatisée des Owens qui fabrique à grande vitesse des contenants de poids, de grandeur et de capacité uniforme.

Une révolution technique d'une importance exceptionnelle, parfaitement datée au premier siècle de notre ère, et l'invention du soufflage du verre. Ce procédé n'est devenu fiable qu'en raison de la meilleure qualité de la pâte, mieux fondre dans un four plus chaud.

### III.2.2.2 Définition du verre

Le verre est un corps dur, homogène, inaltérable, élastique, fragile, non cristallin, qui provient du refroidissement rapide de certaines substances après fusion. Il est opaque, translucide ou transparent, malléable à chaud et susceptible d'un poli parfait. Il est le type du cassant « comme du verre », du transparent, du lisse (miroir) et de l'inaltérable. Depuis quelques décennies, il sert de référence aux isolants thermiques « équivalents à telle épaisseur de laine de verre ». C'est aussi un isolant électrique. Ses formes et ses applications sont innombrables. (Scholze,1974)

### III.2.2.3 La fabrication du verre

L'élément de base du verre et le sable, ou plus exactement la silice fondue. D'ailleurs, on trouve du verre "naturel" qui se forme lors d'éruptions volcaniques. L'obsidienne, une roche noire et coupante, en est un exemple bien connu. Le problème, c'est que la silice fond à une température très élevée (1 750°C environ). Pour faire baisser cette limite, on ajoute donc des "fondants", comme la soude, la potasse ou la chaux.

Les ingrédients sont ensuite mélangés à de l'eau et du calcin (débris de verre recyclé) selon des proportions très précises. On enfourne le tout dans un four à 1 550°C en moyenne ; c'est l'une des températures les plus élevées dans l'industrie. Pour obtenir du verre plat, par exemple une vitre, on a recours au procédé du "float" : le verre fondu est coulé sur un bain d'étain en fusion. En flottant sur la surface plane du liquide, le ruban de verre est étiré et refroidi. Vers 500°C, il devient à peu près solide.

Placé sur un équerre, il finit de refroidir à l'air libre. On enlève alors les bords avant de le découper en plaques. A la sortie du four, le verre subit un laminage : il passe entre des rouleaux métalliques qui lui donnent l'épaisseur et le relief désiré.

#### III.2.2.4 Les propriétés physiques des débris de verre en géotechnique

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

- Densité = 2,49 à 2,52
- 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>
- Angle de friction ( $\phi$ ) avec 100 % de verre brisé = 51,2°
- CBR avec 50 % de pierre concassée et 50 % de verre brisé = 42 à 115 %
- Classification unifiée = SW
- Pourcentage passant au tamis de 80 microns = 1 à 3 %
- Perméabilité = 1 à 6 x 10<sup>-4</sup> cm/sec; donc très perméable par rapport aux granulats conventionnels utilisés. (Wartman et al., 2004)

#### III.2.2.5 L'analyse chimique du verre

L'analyse chimique du verre ne peut être réalisée au sein de notre laboratoire, vu le manque de matériels.

D'après la recherche bibliographique on peut dire que le verre se compose généralement des composants suivants :

Tableau 1.III. L'analyse chimique des débris du verre (Dyer et Dhir, 2001).

Composition	Masse (%)
CaO	10.26
Al <sub>2</sub> O	2.5
SiO <sub>2</sub>	71.28
K <sub>2</sub> O	0.52
Na <sub>2</sub> O	14.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0
MnO	0.04
MgO	0.9
TiO <sub>2</sub>	0.11
Cr	0
SO <sub>3</sub>	0.07

### III.2.2.6 Origine du verre utilisé

Les débris du verre utilisé proviennent du concassage de chute de verre pour fenêtre, collectés au niveau de l'unité d'entretien de la faculté du génie de la construction de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO).



Figure 4.III. Débris de verres concassés.

### III.3 Concassage et tamisage du calcaire

Avant de procéder à la préparation des échantillons ; les éléments de calcaire prélevés sous forme de blocs rocheux sont soumis à plusieurs opérations au laboratoire, à savoir : un concassage mécanique, un séchage à étuve, et puis un tamisage (NF P 18-560), de telle sorte à former une courbe granulométrique de classe 0/20 mm, délimitée par un fuseau bien précis relatif aux corps de chaussée prescrit par la norme NF EN 13-285 (2010).

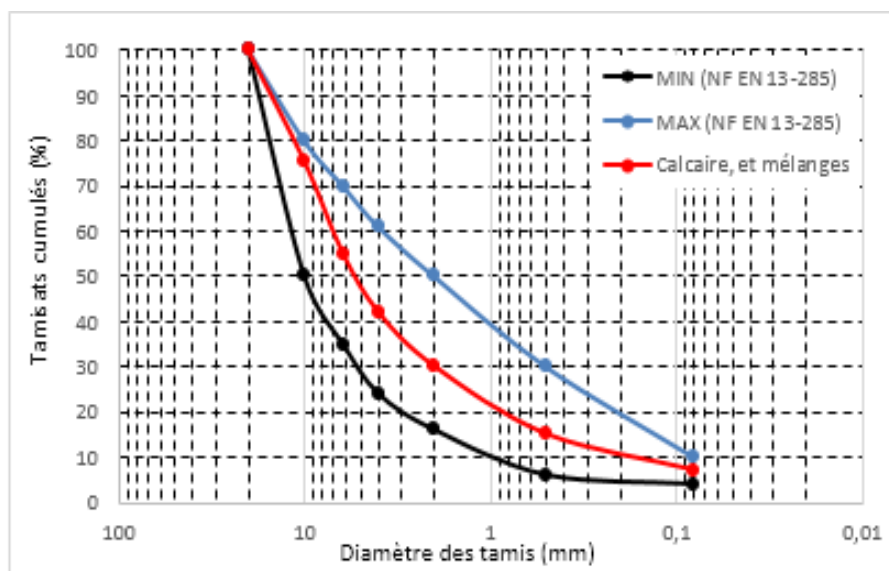


Figure 5.III. Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-85(2010).



Figure 6.III. Matériau calcaire après concassage et tamisage.

### III.4 Essais d'identification

#### III.4.1 La teneur en eau naturelle (NF P94-050)

La teneur en eau est déterminée selon la norme française (NF P94-050) ;(méthode par étuvage).

La détermination de cette teneur consiste à peser un échantillon humide puis on le passe à l'étuve à 105°C pendant 24H ; et on le pèse encore une fois à sec.

La Teneur en eau est calculée comme suit :

$$W = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

**M<sub>w</sub>**: Masse de l'eau.

**M<sub>s</sub>**: Masses des grains solides.

**M<sub>h</sub>**: Masse du matériau humide.

Les résultats de l'essai sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.III. Détermination de la teneur en eau.

Matériaux	Teneur en eau (W%)
Calcaire	1.05

## Interprétation

Les résultats présentés dans le tableau 1.III, montrent que la teneur en eau naturelle des granulats naturels est faible.

Ceci signifie que le matériau étudié est granulaire non argileux, très perméable.

### III.4.2 Les masses volumiques

#### III.4.2.1 La masse volumique sèche $\rho_d$ par pesée hydrostatique (NF P 94-064)

La masse volumique sèche d'un échantillon de roche est déterminée par pesée hydrostatique (avec échantillon paraffiné) selon la norme NF P94-053.

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.

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

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

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 7.III. Appareillage utilisé pour pesée hydrostatique.



Figure 8.III. Echantillons soumis à l'essai.

Tableau 3.III. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche.

Echantillon				
Paramètre	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai	Moyenne
$M_r$ (g)	43.3	48	38.3	43.2
$M_{rp}$ (g)	44	48.2	38.5	43.56
$M'_{rp}$ (g)	22.6	29.4	23.6	25.2

$$\rho_d = 2.40 \text{ g/cm}^3$$

Tableau 4.III. Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche (NF P 94-064).

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

D'après le tableau ci-dessus, on peut dire que notre matériau est dense.

#### III.4.2.2 La masse volumique humide

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

Avec :

**w** : Teneur en eau du matériau ;

**$\rho_d$**  : Masse volumique sèche.

Alors l'application numérique donne :  $\rho_h = 2.4 * (1 + 0.0105)$

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

#### III.4.2.3 La masse volumique des particules solide $\rho_s$ (pycnomètre)(NF P 94 – 054)

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

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

L'échantillon de sol est séché à l'étuve puis pesé.

Le volume des particules est déduit par pesée à l'aide d'un pycnomètre en substituant de l'eau de masse volumique connue aux particules solides.

La masse volumique des particules solides est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\rho_s = \rho_w \frac{m_2 - m_1}{(m_4 - m_1 + m_2 - m_3)}$$

Avec :

**M1** : masse du pycnomètre vide + bouchon ;

**M2** : masse du pycnomètre + particules solides + bouchon ;

**M3** : masse du pycnomètre + eau + particules solides + bouchon ;

**M4** : masse du pycnomètre + eau + bouchon ;

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

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 5.III

Tableau 5.III. Résultats de la masse volumique des particules solides

M1	206.4g
M2	256.2g
M3	797.6g
M4	767.72g
$\rho_s$	2.5g/cm <sup>3</sup>

### III.4.3 Indice des vides, degré de saturation et porosité

#### a) Indice des vides (e)

L'indice des vides permet de savoir si les vides sont importants ou non, c'est-à-dire, si notre matériau est dans un état serré ou lâche (Schlosser, 1988).

Il est déterminé par la relation suivante :

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

Sachant que l'indice des vides dépend aussi des paramètres déjà déterminés ( **$\rho_{setpd}$** ) selon la formule :

$$e = \rho_s / \rho_d - 1$$

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

Après calcul on obtient un indice des vides égal à :  **$e = 0.041$**

#### b) Degré de saturation $S_r$

On le sait, le sol est un milieu poreux comportant des vides. Or, pour connaître le degré de saturation du sol ( $S_r$ ) il faut calculer la proportion du volume des vides qui est occupée par l'eau (Robitaille et Tremblay, 1997).

$$S_r = (V_e / V_s) * 100 \text{ (lorsque le sol est saturé, } S_r = 100\%)$$

Il peut aussi être défini par la formule suivante :

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

Sachant que  $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$

Ce qui donne l'indice des vides suivant :  $S_r = 64\%$

Tableau 6.III. Détermination du degré de saturation. (D'après TERZAGHI)

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

En se basant sur les intervalles présentés dans le tableau ci-dessus, le matériau étudié est mouillé.

### c) Porosité n

La porosité a mis en évidence la portion du volume de sol constituée de vides susceptible de se remplir d'eau à divers degrés : elle est le rapport du volume des vides ( $V_v$ ) au volume total ( $V$ ). (Robitaille et Tremblay, 1997).

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

La porosité et l'indice des vides sont liés par la formule :  $n = e/e+1$

Ce qui nous donne une porosité de **0,039** ou bien **n=3,9%**.

### III.4.4 Limites d'Atterberg (NF P94-051)

Selon sa teneur en eau, un sol sensible à l'eau peut se présenter sous trois états

- 1. État liquide:** les grains de sol sont indépendants et ne se touchent pas. Leurs mouvements relatifs sont aisés.
- 2. État plastique (pates) :** les grains sont approchés et ont mis en commun l'eau absorbée qui agit comme un sachet en plastique dans lequel les grains peuvent se mouvoir sans s'écarter.
- 3. État solide :** les grains se sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelques points en chassant l'eau absorbée. Les frottements internes sont alors importants.

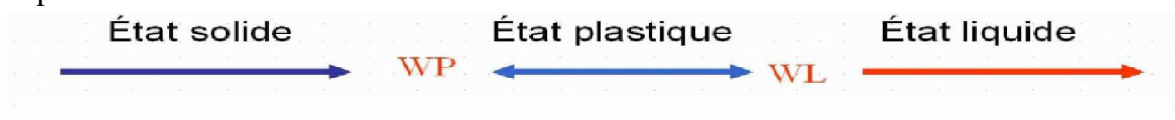


Figure 9.III. Plages des limites d'Atterberg.

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales, caractéristiques du sol. Elles correspondent à des comportements particuliers de celui-ci sous l'action des variations de la teneur en eau. Ces limites sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 $\mu\text{m}$ . Ces limites sont déterminées selon la norme française NF P94 -051.

#### a) Limite de liquidité $w_l$

C'est la teneur en eau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure pratiquée dans l'échantillon placé dans une coupelle après 25 chocs.



Figure 10.III. Détermination de la limite de liquidité  $w_l$ .

#### b) Limite de plasticité $w_p$

C'est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint  $3,0 \pm 0,5$  mm.



Figure 11.III. Détermination de la limite de plasticité  $w_p$ .

### c) Indice de plasticité $I_p$

C'est la différence des limites  $w_l$  et  $w_p$ . Cet indice définit l'étendue du domaine plastique.

$$I_p = w_l - w_p$$

### Interprétation des résultats

Après avoir réalisé plusieurs essais nous avons constaté que les limites de liquidité et de plasticité du matériau étudié sont non mesurables.

C'est-à-dire que nous n'arrivons pas à avoir de pâtes cohérentes en présence d'eau et que l'échantillon s'effrite entre les doigts à chaque essai comme du sable.

Nous avons remarqué que le matériau 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.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre l'origine des matériaux utilisées et les résultats d'essais d'identification réalisés au laboratoire. Ces derniers ont permis d'avoir une idée sur la nature des matériaux étudiés.

Ceci contribue sensiblement à mettre en évidence leur comportement sous les différents types de sollicitations auxquelles ils seront soumis.

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

---

# CHAPITRE IV

## COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIÉS

### IV.1 Introduction

Le sol est un des premiers matériaux utilisés par l'homme dans le domaine de la construction. Il existe de nombreuses techniques d'utilisation de la terre pour la construction.

On peut distinguer parmi ces techniques deux grandes familles en fonction de la consistance à la mise en œuvre :

Terre moulée : mise en forme à l'état plastique puis séchage (adobe, bauge, mortier, enduit).

Terre compactée : compaction statique ou dynamique d'une terre humide non saturée, contenant de l'air.

Le compactage est la méthode la plus ancienne et la plus importante d'amélioration et de stabilisation des sols.

Cependant, il a fait l'objet de plusieurs recherches et fut traité par plusieurs auteurs (Holtz et Kovacs, 1991), (Dupain et al, 2000), (Leonards, 1968) et (Robitaille et Tremblay, 1997)...etc. vu son importance et son utilisation fréquente et indispensable notamment dans les travaux de routes, de barrages,...etc.

L'opération du compactage est liée directement à la portance des sols, des remblais, des couches de forme, des fondations et des sous-fondations des routes et aéroports. Elle est caractérisée par l'essai CBR qui permet de mesurer la résistance à l'effort tranchant d'un sol et son gonflement lorsqu'il est immergé dans l'eau. Il permet ainsi de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement et donne un des paramètres indispensables dans les essais géotechniques précédant la construction d'ouvrages routiers. C'est un essai utilisé partout dans le monde pour déterminer l'épaisseur des couches de chaussées.

## IV.2 Définition du compactage

Ce que l'on appelle "compactage" au sens strict correspond à la communication d'un certain procédé mécanique (force, vibration, combinaison des deux, chocs,...). Cette définition étant très limitative, il serait préférable de qualifier le compactage comme un ensemble d'opérations permettant d'obtenir, à partir d'un matériau donné, des caractéristiques appropriées aux fonctions à remplir.

D'une manière générale, on entend par compactage, l'ensemble des mesures prises afin d'augmenter le poids spécifique apparent sec du sol traité, ce qui conduit à réduire son volume apparent. (Biarez, 1974)

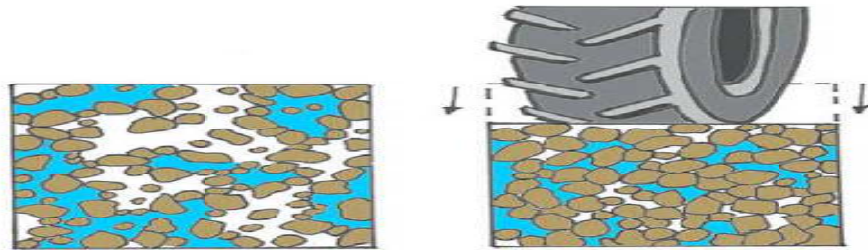


Figure 1.IV. Compactage.

## IV.3 Les objectifs du compactage

Les objectifs du compactage des sols sont multiples.

Ils visent principalement à :

- Réduire la déformation (augmenter le module de Young) ;
- Diminuer la perméabilité des sols ;
- Diminuer les variations de volume indésirables ;
- Augmenter la capacité portante du sol.

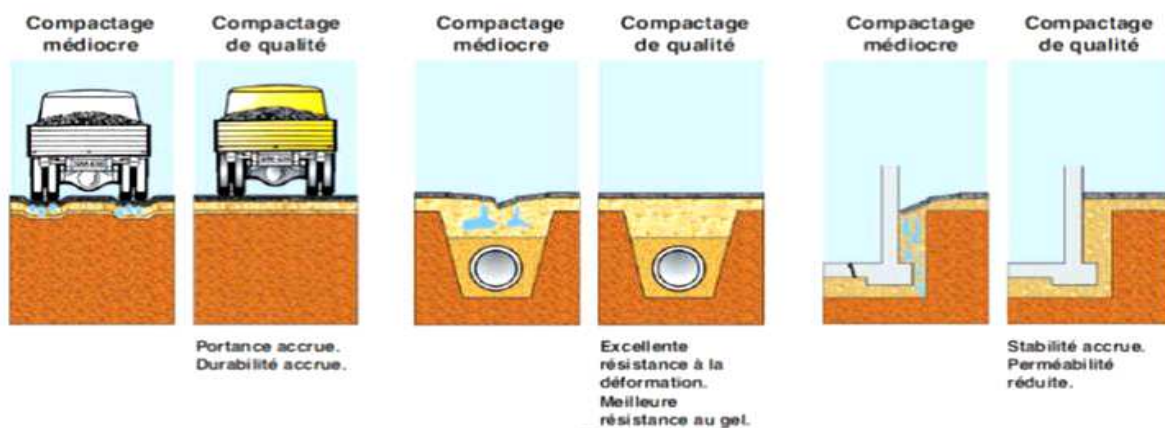


Figure 2.IV. Objectifs du compactage.

## IV.4 Les engins de compactage

Nous appellerons engin de compactage, tout matériel de génie civil destiné à compacter un sol ou une couche de chaussée.

### IV.4.1 Classement des engins

Il est indispensable de procéder à un classement de ces engins, ne serait-ce que pour pouvoir décrire chacun des types retenus. De nombreuses classifications ont été tentées.

Nous mentionnerons celle du Comité for European Construction Equipment (C.E.C.E), de la fédération nationale des travaux Public (F.N.T.P) et de la Commission d'étude des matériels de Génie Civil (C.E.M.A.G).

#### IV.4.1.1 Rouleaux à bandage lisse

Ils sont composés d'un châssis très robuste portant la chaîne cinématique (qui comprend le moteur), la cabine, le poste de commande et les roues.

Les roues, qui constituent l'élément compacteur, sont des cylindres en acier d'un diamètre variant de 0.40 m et 2 m. La surface cylindrique s'appelle le bandage lisse.



Figure 3.IV. Rouleaux à bandage lisse.

#### IV.4.1.2 Rouleaux à pneu

On distingue essentiellement trois types de compacteurs à pneus :

- Compacteurs à pneus tractés à une rangée de roues, très lourds (60 - 100 tonnes)
- Compacteurs à pneus tractés à deux rangées de roues, légers (< 15t) ;
- Compacteurs à pneus automoteurs.

L'épaisseur des couches compactées pour les engins de compactage à pneus peut varier généralement entre 15 cm et 25 cm.

#### IV.4.1.3 Rouleaux vibrants

Ces engins sont utilisables pour le compactage des matériaux à angle de frottement interne élevé ce qui explique que leur domaine d'action préférentiel soit celui des assises de chaussées :

- Rouleau mono axe tracté ;
- Rouleau monocylindre autottracté ;
- Rouleau automobile monocylindre ;
- Rouleau tandem transversal ;
- Rouleau tandem longitudinal ;
- Rouleau automobile mixte vibrant à pneus.

L'épaisseur des couches compactées peut varier entre 15 cm et 30 cm.

#### IV.4.1.4 Rouleaux à pieds dameurs

Ce sont des compacteurs très anciens utilisés aux *Etats-Unis* dès le début des *années 30*. C'est le type de rouleau qu'utilisait *Proctor*. (MOREL.G, 1988).

Les compacteurs à pieds dameurs, actuellement sur le marché, sont de trois types :

- Les tandems, à articulation centrale ;
- Les tricycles ;
- Les quadri-roues.

#### IV.5 Les paramètres influençant le compactage

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

Le compactage est influencé principalement par :

- La teneur en eau du matériau ;
- La nature du sol ;
- L'énergie de compactage.

### IV.5.1 Influence de la teneur en eau

En effet pour une énergie de compactage donnée, si l'on fait varier la teneur en eau  $w$  d'un échantillon de sol et l'on représente graphiquement la variation du poids spécifique sec  $\gamma_d$  en fonction de cette teneur en eau, on obtient une courbe en cloche qui représente un optimum appelé optimum Proctor.

Ce phénomène s'explique aisément lorsque la teneur en eau est élevée (partie droite de la courbe), l'eau absorbe une partie importante de l'énergie de compactage sans aucun profit de plus elle occupe la place des grains solides (aucun tassement possible). Par contre pour des teneurs en eau raisonnables, l'eau joue un rôle lubrifiant non négligeable et la densité sèche augmente avec la teneur en eau (partie gauche de la courbe).

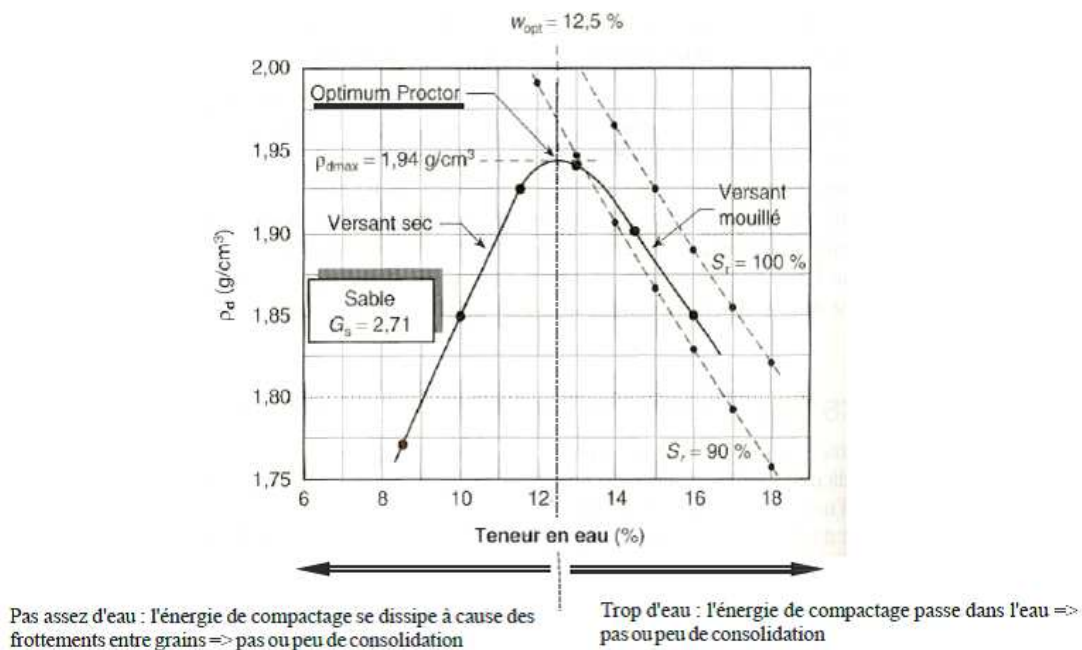


Figure 4.IV. Courbe de compactage et Optimum Proctor.

### IV.5.2 Influence de la nature du sol

De façon générale, la courbe Proctor est très aplatie pour les sables et par contre présente un maximum très marqué pour les argiles plastiques.

Pour les matériaux à courbe Proctor aplatie, le compactage est peu influencé par la teneur en eau.

Ces matériaux (courbe Proctor aplatie) constituent donc à priori les meilleurs remblais d'un point de vue tolérance à l'exécution, car peu sensibles à la teneur en eau réellement ou non apportée par des camions citernes ou les pluies. Mais, par contre, il est plus difficile d'améliorer les caractéristiques de ces sols (Energie de compactage à fournir plus importante).

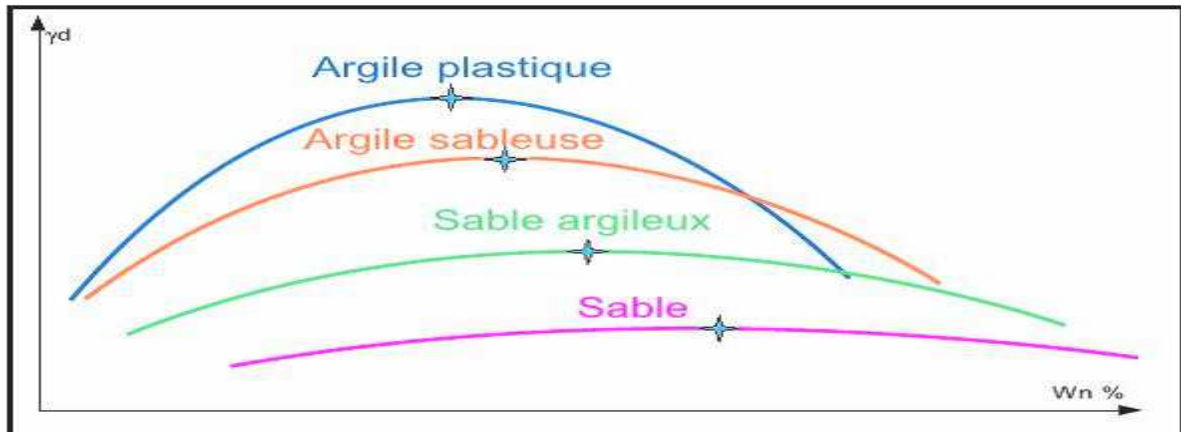


Figure 5.IV. Influence de la nature du sol.

#### IV.5.3 Influence de l'énergie de compactage

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

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.

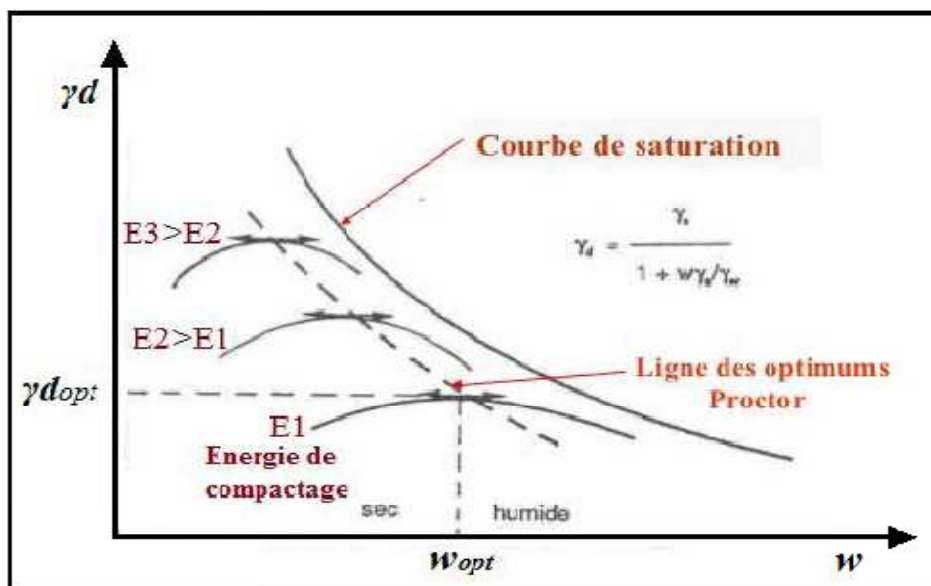


Figure 6.IV. Influence de l'énergie de compactage.

### IV.6 Le compactage in situ

Malgré l'extrême diversité des engins de compactage, il est possible de dégager un certain nombre de facteurs intervenant principalement sur l'efficacité d'un engin sur un sol donné.

Nous trouverons bien sûr des facteurs propres au terrain compacté (nature, teneur en eau,...) mais aussi des facteurs caractérisant l'engin et la séquence de compactage (nombre de passes, vitesse, pression de contact, fréquence et intensité de vibration...).

#### IV.6.1 Notion de planche d'essai

Une grande partie des difficultés des projets de terrassement vient du fait que la mise en place d'un sol (remblai par exemple) dépend souvent des conditions atmosphériques au moment des travaux.

La planche d'essai permet avant l'ouverture d'un chantier de terrassement, de fixer les paramètres de compactage lié à l'engin utilisé, au sol considéré au moment des travaux (teneur en eau, vitesse des engins, nombre de passe, ...), et ce, en vue d'obtenir la compacité à atteindre (compacité prescrite)

#### IV.6.2 .Influence de la vitesse de l'engin

Pour un engin donné et des exigences de qualité fixées, il existe une vitesse optimale, fonction de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une compacité maximale. Plus les exigences de qualité ne sont sévères, plus la vitesse de translation optimale a une valeur réduite.

Il est recommandé de limiter la vitesse de la plupart des compacteurs à 8km/h. Dans le cas des compacteurs vibrants, la vitesse optimale se situe autour de 5km/h pour que les vibrations puissent agir efficacement sur toute l'épaisseur de la couche.

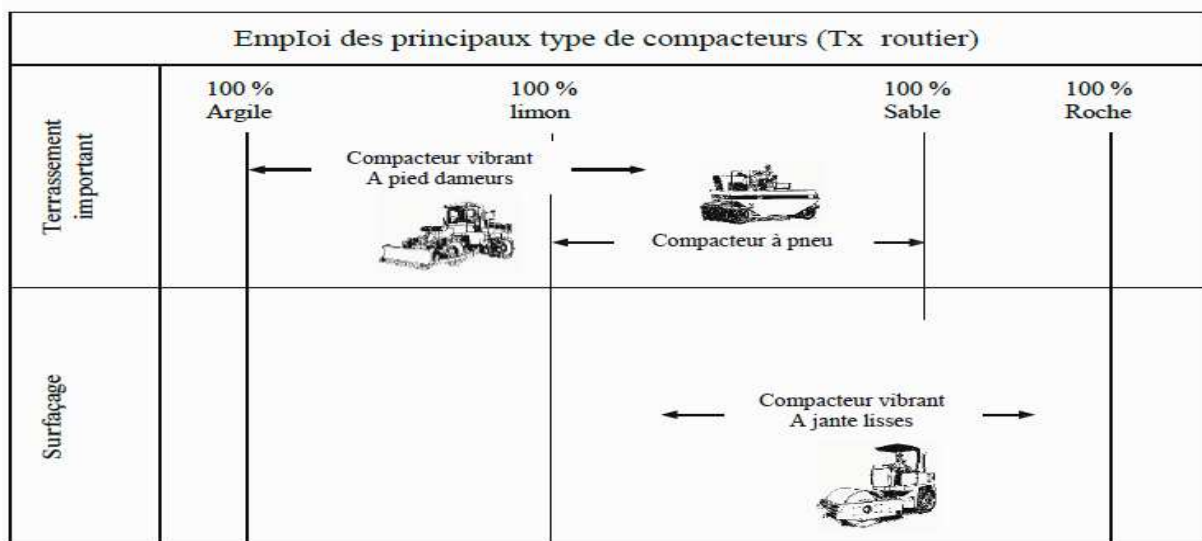


Figure 7.IV. Domaine d'emploi des principaux engins de compactage.

### IV.6.3 Influence du nombre de passes

Pour un engin donné et des paramètres de qualité fixés, il existe un nombre de passes optimales fonction de la vitesse de l'engin, de l'épaisseur de la couche et de la nature du matériau permettant d'obtenir une compacité maximale. Plus les exigences de qualité sont sévères, plus le nombre de passe optimale est élevé.

De façon générale il faut 3 à 8 passes pour compacter une couche de sol de 30 cm d'épaisseur, mais ce nombre peut facilement atteindre 12 en fonction du type de sol, de la teneur en eau et de la masse du compacteur. Si la compacité voulue n'est pas atteinte après 12 passes dans les conditions optimales d'humidité, on conclut que les opérations de compactage n'ont pas atteint leur but et que le compacteur utilisé n'est probablement pas adéquat.

En pratique la teneur en eau fixée à la valeur optimale de l'essai Proctor est obtenue par étalonnage de la citerne à eau. Pour chaque vitesse de l'engin considéré on détermine le nombre de passes permettant d'obtenir les spécifications prescrites. On peut ainsi représenter la courbe (Vitesse de l'engin, Nombre de passes) et déterminer son optimum qui donne les paramètres liés à l'engin.

### IV.7 Contrôle de la compacité

Le contrôle de la densité en place d'une plateforme ou d'un corps de chaussée est primordial. Le degré de compacité ( $D_c (\%) = \gamma_{dchant} / \gamma_{dopt}$ ) est le principal critère de contrôle pour accepter ou non le compactage. On calcule le degré de compacité ( $D_c$ ) en comparant le poids volumique du sol sec sur le chantier ( $\gamma_{dchant}$ ) avec celui du laboratoire ( $\gamma_{dopt}$ ). Ce degré s'approche de 100% lorsque la valeur de ( $\gamma_{dchant}$ ) s'approche de celle de ( $\gamma_{dopt}$ ). En général le cahier des charges exige un  $D_c \geq 95\%$  (voir 98%).

On mesure la compacité et/ou la teneur en eau sur le chantier à l'aide de plusieurs appareils de plus simples aux plus sophistiqués.

#### IV.7.1 Densitomètre à membrane (NF P94-061-2)

Le densitomètre à membrane est un procédé traditionnel permettant de mesurer le volume d'une cavité réalisée dans la couche à contrôler et dont on a soigneusement extrait le sol pour en déterminer le poids total humide puis le poids total sec (Fig. 8a). En ayant la masse humide et sèche de l'échantillon extrait ; on peut facilement calculer les poids volumiques apparents humide, et sec des sols en place.

#### IV.7.2 Gamma (Nucléo) densimètre (NF P98-241-1)

Cet essai relatif aux chaussées, mesure de la masse volumique moyenne apparente des matériaux en place à l'aide de transmission directe de rayons Gamma. Cet appareil portatif permet d'effectuer des mesures de densité et d'humidité des sols, granulats, terrassement, bétons et enrobés bitumineux (Fig. 8b). Ils contiennent une ou deux source(s) radioactive(s)

scellée(s). La première (Césium 137 ou Cobalt 60) permet de déterminer la masse volumique des matériaux (par transmission directe ou rétrodiffusion) grâce au comptage de photons (compteur Geiger Müller). La seconde (Américium 241/Béryllium ou Californium 252) permet de déterminer la teneur en eau des matériaux. Les neutrons émis par la source sont ralentis par l'hydrogène de l'eau puis captés par un détecteur à Hélium 3.

### IV.7.3 Le soildensity gauge (SDG)

Cet essai permet le contrôle de compactage par la méthode SDG 200. Le SDG 200 (soildensity gauge) est un appareil non nucléaire qui crée un champ électrique au niveau de son plateau sensitif et mesure en réponse le constant diélectrique du matériau avec un temps de mesure n'excédant pas 3 minutes (Fig. 8c).

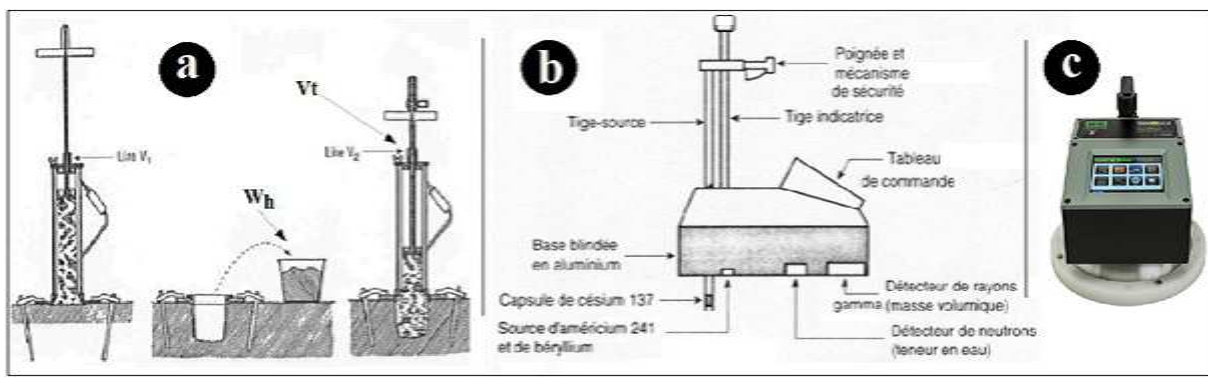


Figure 8.IV. Différentes méthodes pour mesurer la compacité.

### IV.7.4 L'essai à la plaque NF P 94-117-1

L'essai de chargement à la plaque est un essai géotechnique classique qui permet de réaliser sur la surface d'un sol ou d'une couche faisant partie de la structure routière une expérience relativement simple dont le résultat est lié aux propriétés mécaniques des matériaux examinés.

Les résultats de l'essai sont destinés au contrôle de la mise en œuvre des matériaux (contrôle de compactage) ; parfois les essais de chargement à la plaque sont effectués dans le cadre d'une étude de dimensionnement d'une chaussée neuve ou de renforcement d'une chaussée existante. A défaut de mesure du module de la plaque, il est estimé par la formule donnée par les catalogues de dimensionnement des chaussées neuves  $E = 5 \times \text{CBR}$ .

### IV.8 Les essais de compactage au laboratoire

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

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

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

#### **IV.8.1 Les essais Proctor (NF P 94-093)**

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

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différents teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe ( $\gamma_d/\gamma_w$ ;  $w$ ) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale ( $w_{opt}$ ) et l'ordonnée est la densité sèche maximale ( $\gamma_{d\ max}$ ).

On utilise pour ces essais deux types de moules de dimensions différentes :

- Le moule Proctor ( $\phi$  moule = 101,6 mm ; H = 117 mm) lorsque le matériau est suffisamment fin (pas d'éléments supérieurs 5mm),
- Le moule CBR (California Bearing Ratio) pour des matériaux de dimensions inférieures à 20mm ( $\phi$  moule = 152 mm ; H = 152 mm).

##### **IV.8.1.1 L'essai Proctor normal**

Dans ce cas l'énergie de compactage est relativement faible. On réalise l'essai Proctor normal pour l'étude des sols de remblais (barrage en terre, digues....), le compactage a alors pour but de limiter les tassements ultérieurs.

##### **IV.8.1.2 L'essai Proctor modifié**

Contrairement à l'essai Proctor normal, l'essai Proctor modifié est caractérisé par son énergie de compactage plus importante, il est utilisé pour les couches de chaussées, piste d'aérodromes...etc, ce qui est le cas de cette étude.

Tableau 1.IV. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (NF P 94-093,1999)

Nature de l'essai	Caractéristique de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de dame	2490 g	2490g	3 couche, à raison de : 25 coups par couche      56 coups par couche 
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de dame	2490 g	2490g	5 couche, à raison de : 25 coups Par couche      56 coups par couche 
	Diamètre du mouton	51 mm	51 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	

#### IV.8.1.2.1 Principe de l'essai

L'essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau, puis à le compacter dans un moule normalisé selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneurs en eau considérées, on déterminera la masse volumique sèche du matériau et on tracera la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau, cette courbe appelée courbe Proctor, cette dernière présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenu pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé (NF P 94-093, 1999).

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

- Calcul de la teneur en eau :  $w = (Mh - Ms) \cdot 100 / Ms$
- Calcul de la masse volumique sèche :  $\rho_s = \frac{Ms}{V}$ . Avec V : volume du moule CBR =  $2295 \text{ cm}^3$ .

#### IV.8.1.2.2 Matériels utilisés

L'appareillage spécifique comporte :

- Moule CBR ;
- Dame Proctor modifié ;
- Règle à araser ;
- Balance ;
- Étuve ;
- Éprouvette graduée.



Figure 9.IV. Matériels utilisés pour l'essai Proctor.

#### IV.8.1.2.3 Exécution de l'essai

-On prend 5,5 kg du mélange (calcaire +%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%).

-Le mélange doit être soigneusement malaxé et homogénéisé et laissé suffisamment pour assurer une humidification uniforme de tous ses éléments.

- On remplit le moule CBR normalisé en 05 couches puis après avoir versé chaque couche on compacte à l'aide de la dame Proctor modifiée 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 le sable avec une règle à araser, on comble les vides laissés à la surface.

- On prélève ensuite un échantillon d'environ 100 g à la surface du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un 2ème échantillon du même poids environ.

- 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 10.IV. Exécution de l'essai Proctor.

#### IV.8.1.2.4 Essais Proctor réalisés

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

- Calcaire seul ;
- Mélange de calcaire + 20% de verre ;
- Mélange de calcaire + 30% de verre ;
- Mélange de calcaire +50% de verre.

#### IV.8.1.2.5 Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :

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

- La masse volumique sèche  $\rho_d$ .

On portera chaque mesure de la densité sèche sur un graphe en fonction de la teneur en eau correspondante.

Les résultats ainsi que les courbes obtenus sont présentés dans ce qui suit :

- Échantillon de calcaire seul (témoin)

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

Teneur en eau initiale (%)	Masse humide mh (g)	Masse sèche ms (g)	Teneur en eau w (%)	Masse volumique sèche $\rho_d$ ( $g/cm^3$ )
4	4482.4	4314.6	4.03	1.88
6	5305.4	5003.1	6	2.18
8	5222.4	4819.5	8.02	2.10
10	4400	4000	10	1.98

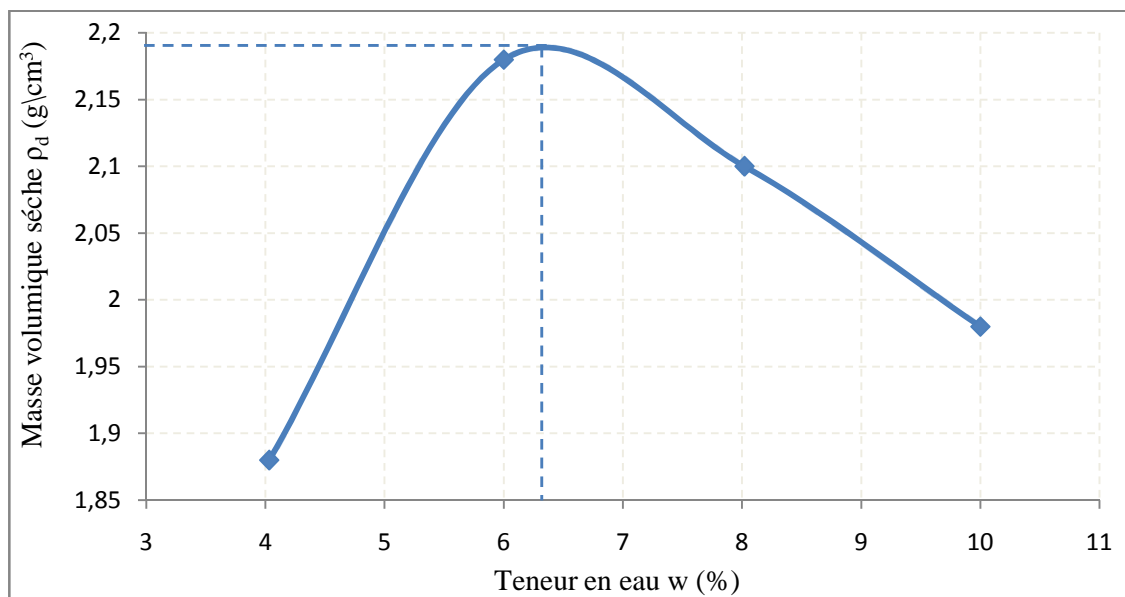


Figure 11.IV. Courbe Proctor du calcaire seul.

- Échantillon de calcaire + 20% du verre.

Tableau 3.IV. Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire+ 20% du verre.

Teneur en eau initiale (%)	Masse humide mh (g)	Masse sèche ms (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
4	4575	4383.45	3.98	1.91
6	4873	4590	4.6	2.00
8	5050	4658.85	6.00	2.03
10	5028	4567.05	7.7	1.99

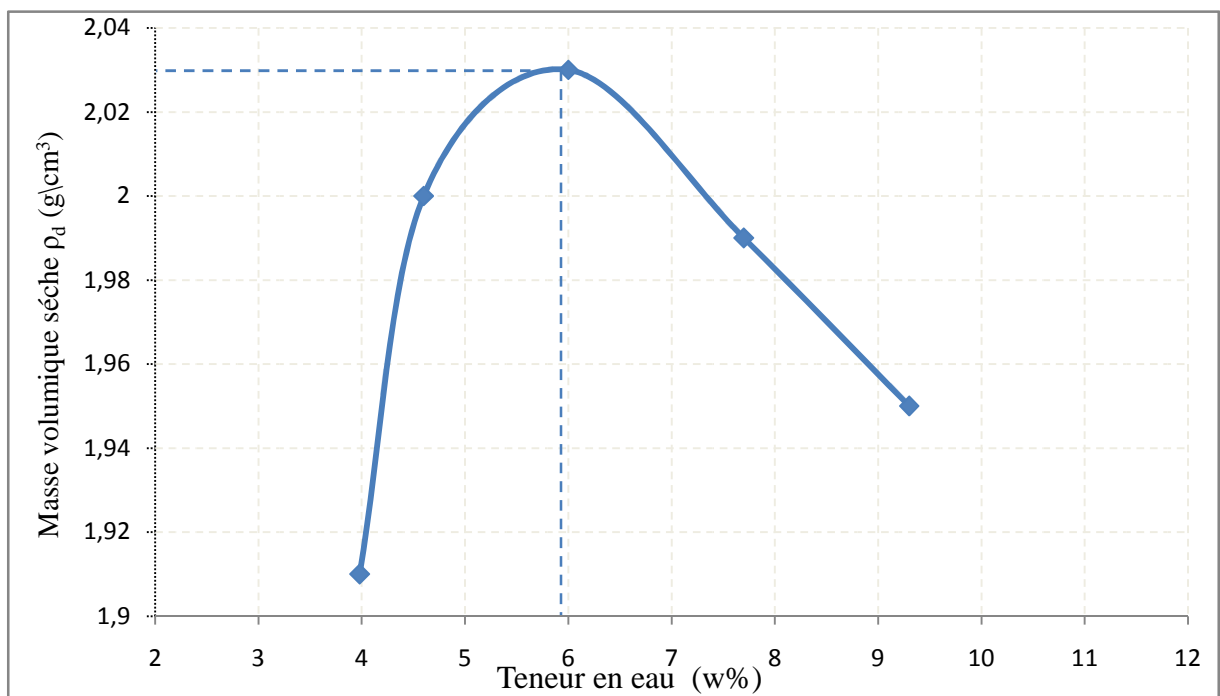


Figure 12.IV. Courbe Proctor du calcaire+ 20% de verre.

- Echantillon calcaire + 30% du verre.

Tableau 4.IV. Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 30% du verre.

Teneur en eau initiale (%)	Masse humide mh (g)	Masse sèche ms (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
4	4530	4314.6	3.93	1.97
6	4920	4612.95	5.12	2.01
8	5392	4658.85	6.74	2.025
10	4934	4452.3	7.45	1.94

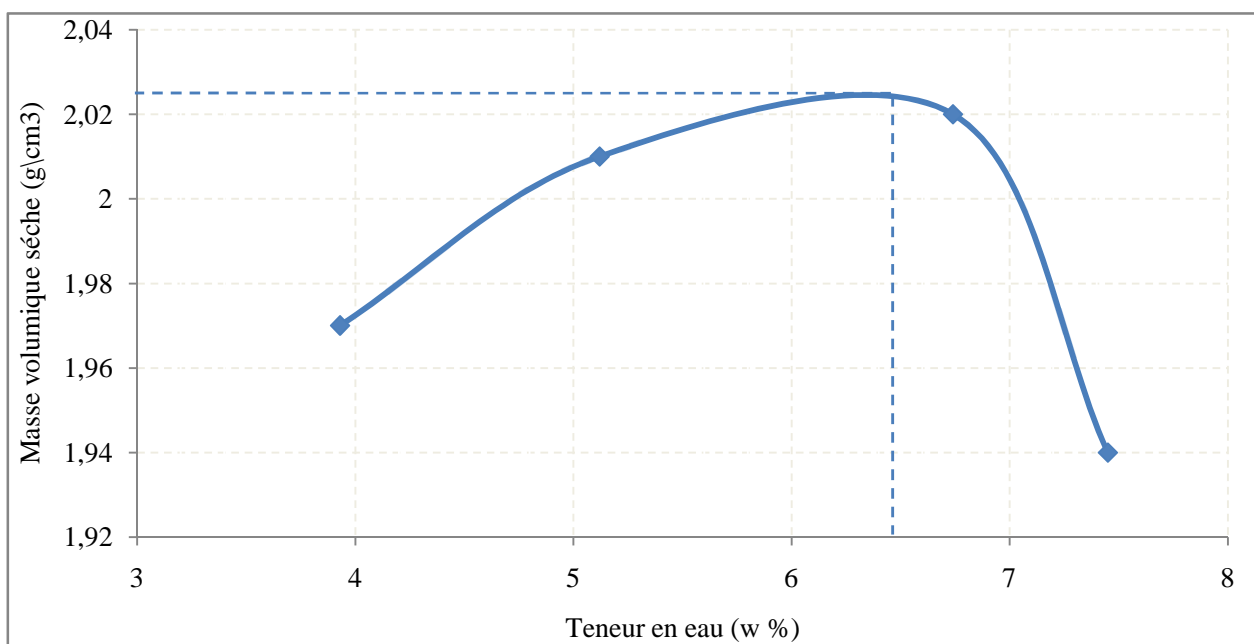


Figure 13.IV. Courbe Proctor du calcaire+30% verre.

- Echantillon calcaire +50% du verre

Tableau 5.IV: Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 50% du verre.

Teneur en eau initiale (%)	Masse humide mh (g)	Masse sèche ms (g)	Teneur en eau w(%)	Masse volumique sèche $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
4	4633	4612.95	5	1.94
6	4764	4751.65	5.99	1.96
8	4925	4567.05	7.13	1.99
10	4925	4452.3	7.87	1.94

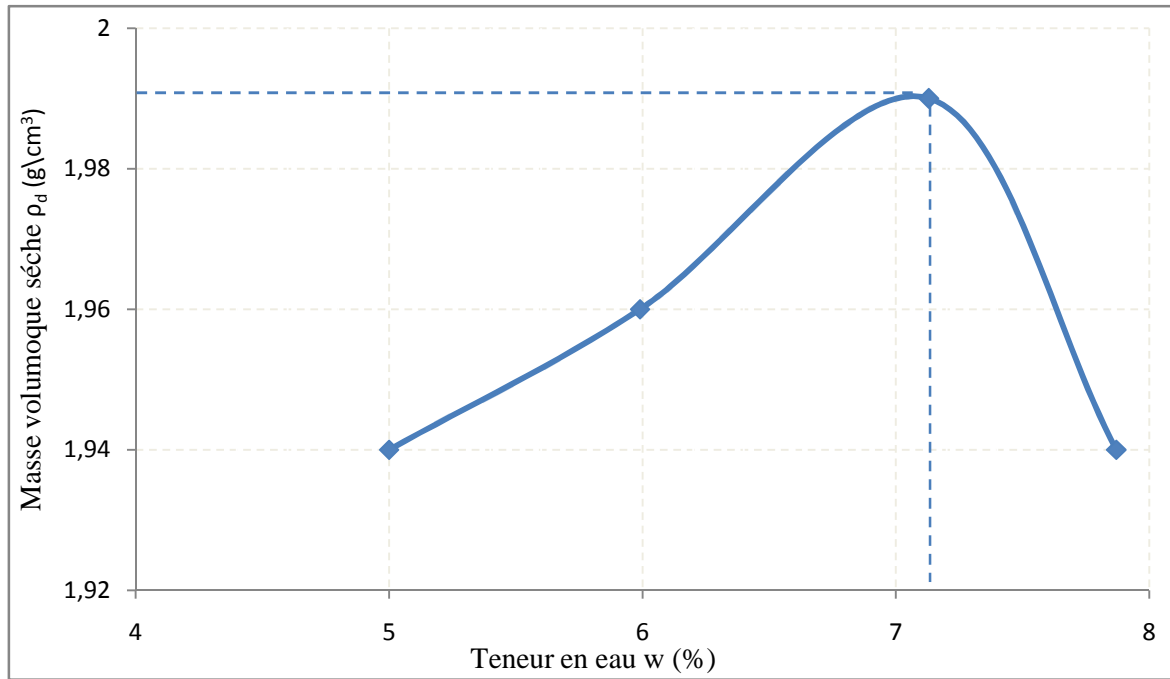


Figure 14.IV. Courbe Proctor du calcaire+50% de verre.

**a-Courbes comparatives de tous les échantillons**

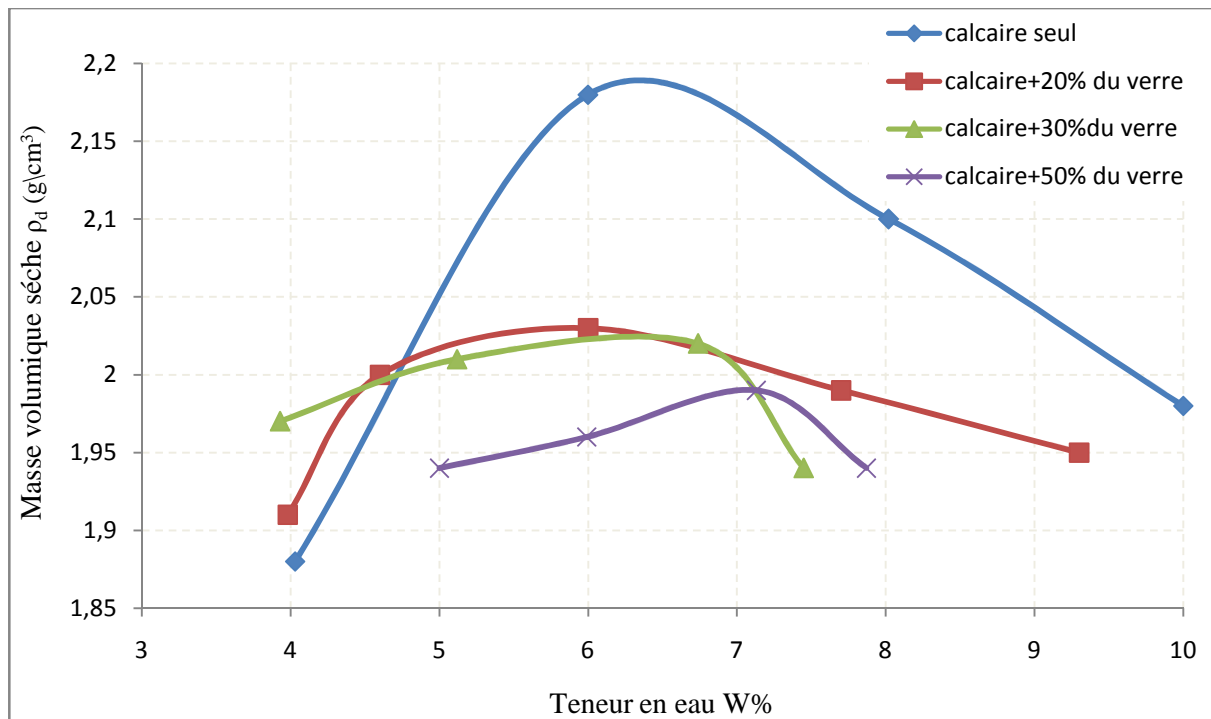


Figure 15.IV. Courbe Proctor comparative de tous les échantillons.

D'après la figure précédente, on remarque que la courbe Proctor pour le calcaire seul a une allure légèrement bombée ; ce qui permet de dire que le calcaire a une faible sensibilité à l'eau.

Avec l'ajout du verre, on remarque que les courbes deviennent de plus en plus aplaties, ce qui est bien visible dans la courbe (calcaire+50% du verre).

Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales obtenues sont résumées dans le tableau 6.IV et présentées sur les figures 16.IV et 17.IV.

Tableau 6.IV. Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales.

Echantillon	Teneurs en eau optimales $w_{opt}(\%)$	Masses volumiques sèches maximales $\rho_d (g/cm^3)$
Calcaire seule	6.3	2.19
Calcaire + 20% du verre	5.8	2.03
Calcaire + 30% du verre	6.5	2.02
Calcaire + 50% du verre	7.1	1.99

#### b- Évolution de la teneur en eau des différents mélanges

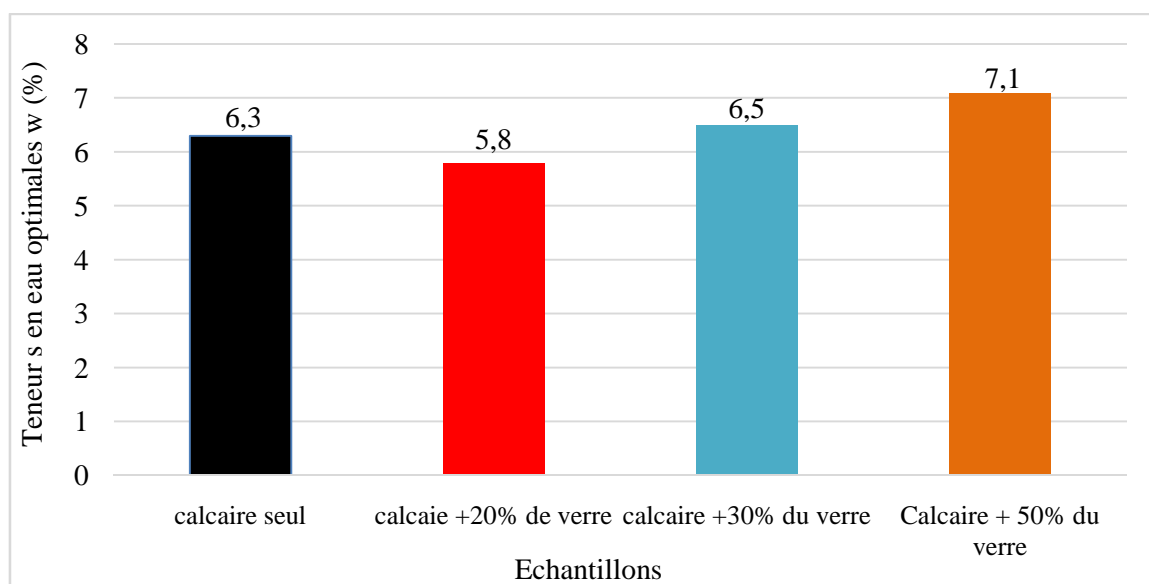


Figure 16.IV. Évolution des teneurs en eau optimales en fonction du pourcentage de verre.

Le compactage des échantillons en mélange a nécessité des teneurs en eau légèrement plus élevées que celle obtenue au compactage du calcaire seul. A l'exception du mélange à 20% de verre où la teneur en eau a légèrement diminué. Ce type de mélange peut présenter une certaine économie d'eau très intéressante, notamment dans le cas des régions où l'eau est considérée comme une denrée rare.

Au-delà de 20% de verre, la teneur en eau commence à augmenter. Ceci, peut-être dû au fait que les mélanges à fortes teneurs en verre présentent des espaces vides de plus en plus importants pouvant être remplis d'eau.

### c. Évolution des masses volumiques sèches

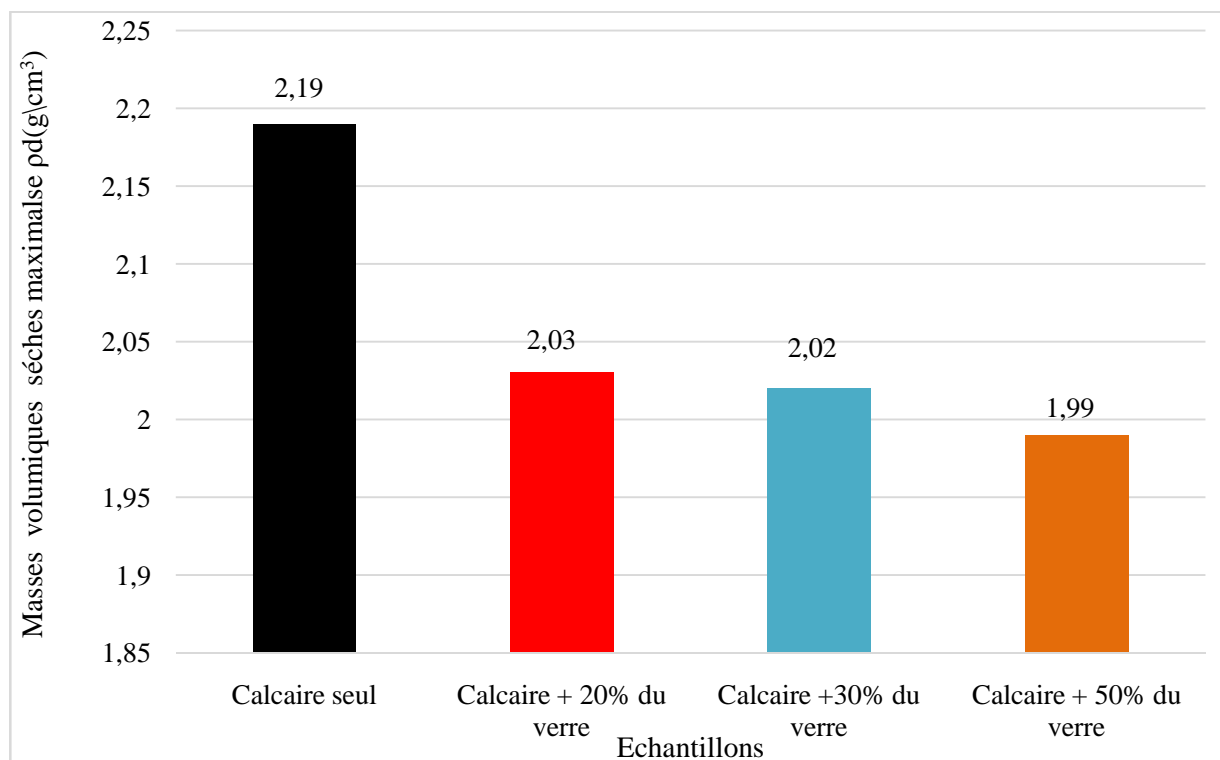


Figure 17.IV. Évolution des masses volumiques sèches maximales en fonction du pourcentage de verre.

Au compactage des différents échantillons, les mélanges de calcaire + verre présentent des densités sèches qui diminuent de plus en plus avec l'augmentation de leurs teneurs en verre. Ceci peut être dû à la structure feuilletée des débris de verre. De telles structures présentent généralement de faibles densités sous pilonnage. Toutefois, ces densités sont supérieures à 1.8 ce qui qualifie les mélanges étudiés du point de vue compactage comme matériaux acceptables pour les corps de chaussées.

### IV.9 Comparaison avec les études antérieures (Marne et Schiste + verre)

Tableau 7.IV. Tableau comparatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales des différents matériaux.

Matériaux	Teneurs en eau optimales (w)%	Masses volumiques sèches $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
Calcaire +50% de verre	7.1	1.99
Schiste +50% de verre	3.8	2.133
Marne +50% de verre	7.03	1.989

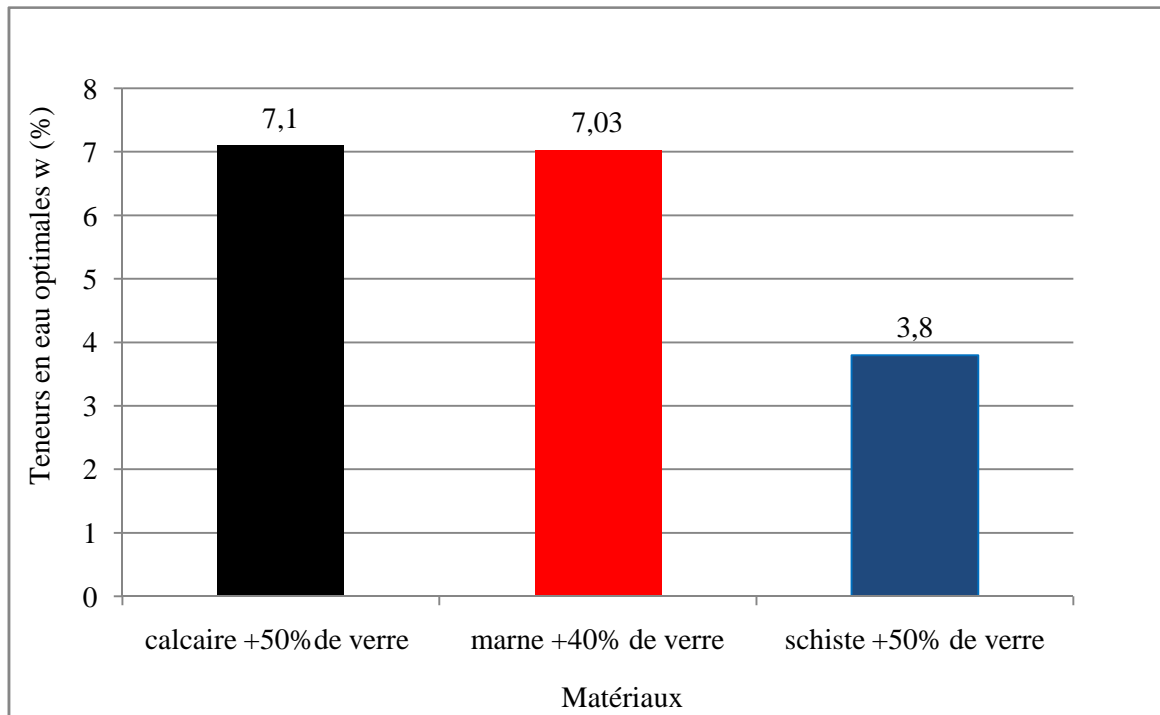


Figure 18.VI. Teneurs en eau optimales des différents matériaux.

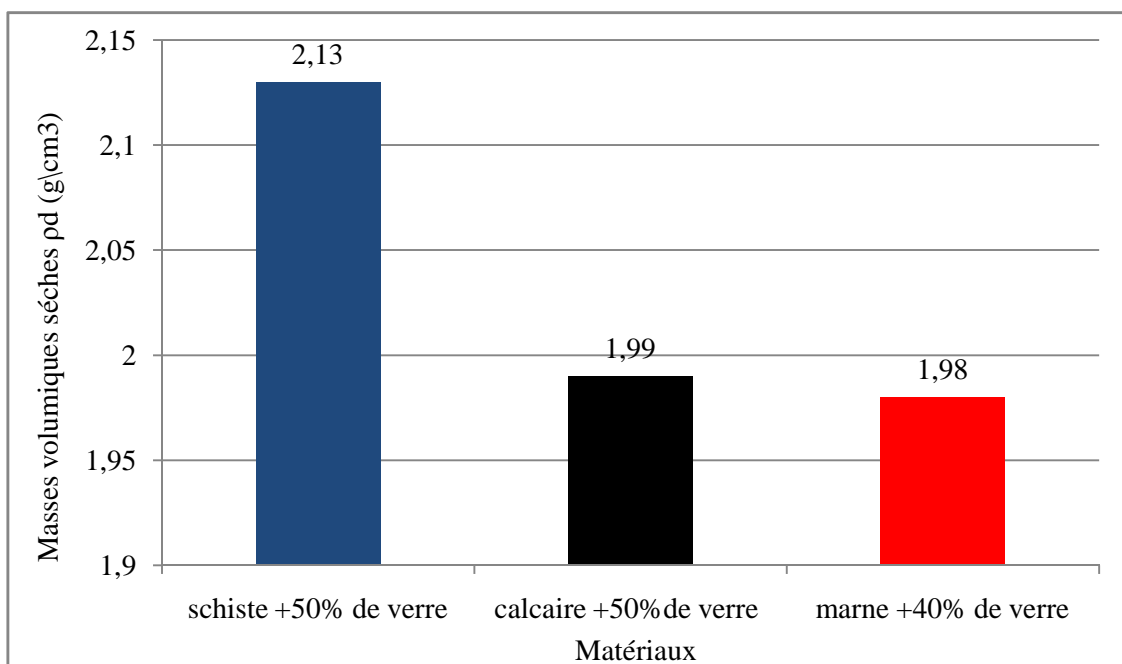


Figure 19.IV. Masses volumiques sèches des différents matériaux.

Les résultats présentés dans les figures (18.IV et 19.IV) montrent que le mélange schiste+50% de verre possède une meilleure densité à l'essai Proctor modifié par rapport aux autres matériaux. Toutefois, les mélanges calcaire et marne (avec ajout de verre) développent des densités sèches intéressantes supérieure à 1.8 (seuil minimal exigé par les normes en vigueur).

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

### IV.10.1 Définition

L'essai CBR a été mis au point en 1929, par les ingénieurs Stanton et Poter du département des routes de Californie.

On peut attribuer l'essai C.B.R (California Bearing Ratio Test) à l'état californien. Qui est originalement un essai routier peu avant la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale. Le corps des ingénieurs de l'armée américaine adopta cette méthode pendant la guerre puis la développa et l'améliora.

Après des années on peut dire que l'essai de C.B.R est reconnu à l'échelle mondiale.

### IV.10.2 But de l'essai

Essai de CBR sert à caractériser la portance du matériau, c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre, mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée à une perméabilité amenée par une forte immersion en cas de fortes pluies. Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part et dans un matériau de référence d'autre part.

### IV.10.3 Principe de l'essai

Le matériau est compacté à la teneur en eau optimale suivant les procédures de l'essai Proctor modifié : moule CBR qui sera compacté de 55 coups par couche (5 couches). On poinçonne ensuite le l'échantillon avec un piston de 19,35cm de diamètre à une vitesse de 1,25mm/min. Les essais CBR permettent de déterminer les indices CBR, selon le but recherché et la fonction du sol étudié :

- 1) **Indice portant immédiat (IPI)**: Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux ;
- 2) **Indice CBR immédiat (CBR)**: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau ;
- 3) **Indice CBR après immersion (CBR<sub>imm</sub>)**: Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support (ou constituant de chaussée) compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique (présence de l'eau).

Le but de cette imbibition est de faire subir au sol (ou au matériau en général) les plus mauvaises conditions et cela en la présence de nappe phréatique.

L'indice CBR exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} I(2.5) = \text{Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN)} * 100 / 13.35 ; \\ I(5) = \text{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)} * 100 / 20. \end{array} \right.$$

La capacité portante du sol est d'autant meilleure que l'indice CBR est plus élevé.

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

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

Avec :

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

H : hauteur initiale de l'éprouvette.

#### IV.10.4 Matériel utilisé

##### 1. Matériel de confection des éprouvettes

Moule CBR, Dame Proctor modifié, Disque d'espacement, Règle à araser, Bacs, Eprouvette graduée 150 ml environ, Balance, Etuve.

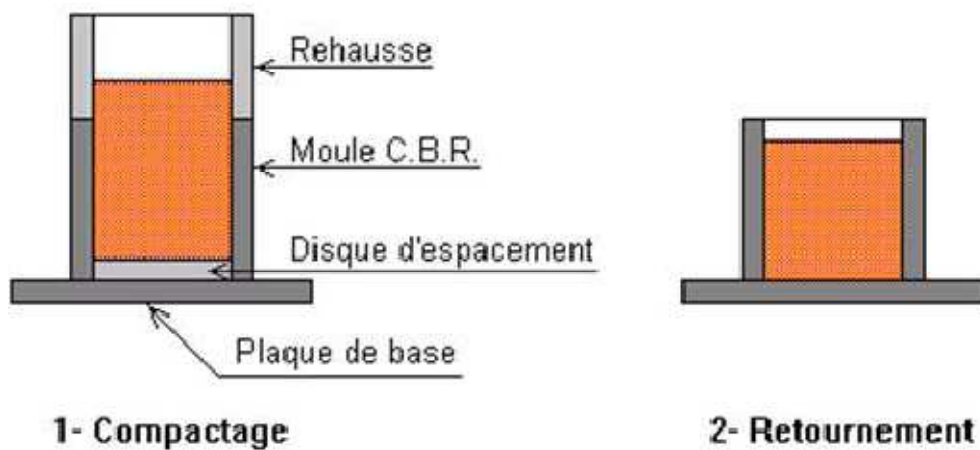


Figure 20.IV. Confection de l'éprouvette pour essai CBR.

## 2. Matériel de poinçonnement

Il comprend une presse de compression de 50 KN minimum et de 60 mm de course, équipée d'un poinçon cylindrique en acier de 19.35 cm<sup>2</sup> de section et de 20 cm de longueur.



Figure IV21.IV. Presse CBR.

### IV.10.5 Mode opératoire

Les essais CBR avant et après immersion, sont réalisés au laboratoire selon la norme française (NF P94-078).



Figure 22.IV. Etape d'immersion, cas du CBRimm.

Les classes de portances sont présentées dans le tableau suivant :

Nous avons déterminé les indices immédiats CBR et CBR immergés pour :

- Calcaire seul ;
- Calcaire +50% de verre.

#### IV.10.6 Expression des résultats

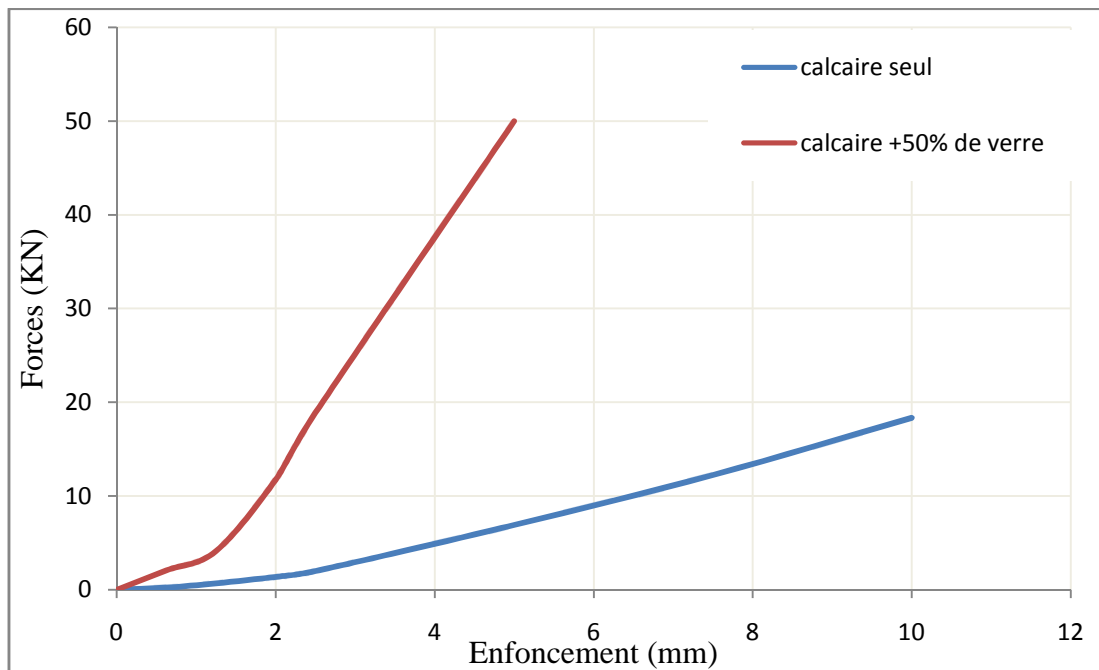


Figure23.VI. Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immédiat.

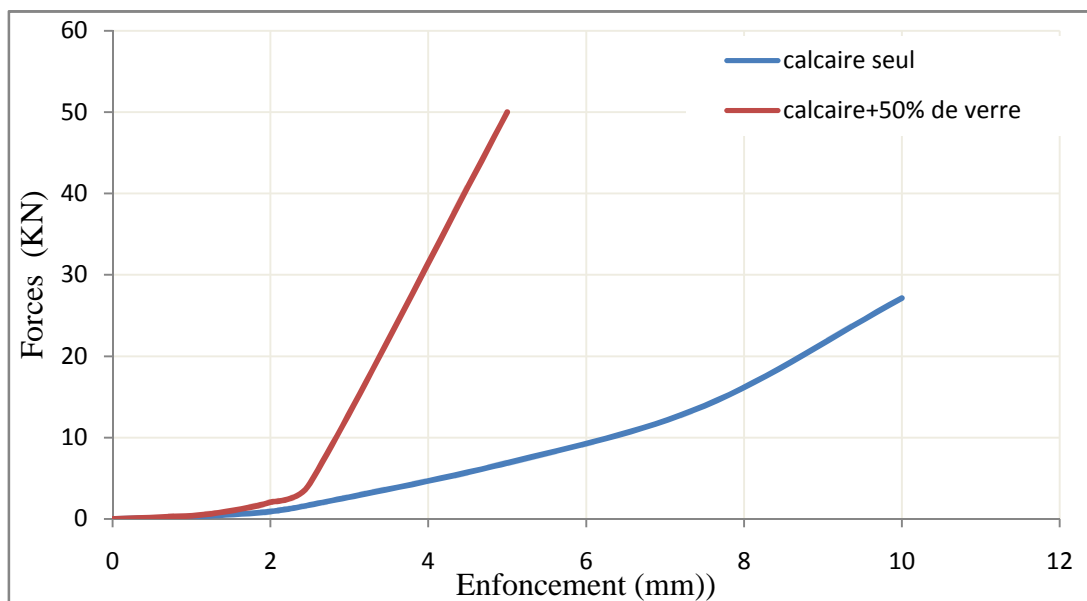


Figure 24.IV. Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immersion.

D'après les figures 21.IV et 22.IV, on constate que la résistance au poinçonnement du mélange (calcaire+ 50% de verre) est plus importante à celle obtenu avec le mélange de calcaire seul ; ça peut être du a la nature des débris de verre utilisés.

Tableau 8.IV. Résultats d'essai CBR pour le calcaire + débris de verre.

Echantillon	Gonflement relatifs G(%)	Indice CBR immédiat (%)			Indice CBR après immersion(%)		
		I <sub>(2.5)</sub>	I <sub>(5)</sub>	CBR <sub>imm</sub>	I <sub>(2.5)</sub>	I <sub>(5)</sub>	CBR <sub>imm</sub>
Calcaire seul	0	14.94	34.66	34.66	12.88	34.55	34.55
Calcaire+50% de verre	0	141.43	>250	>250	32.64	>250	>250

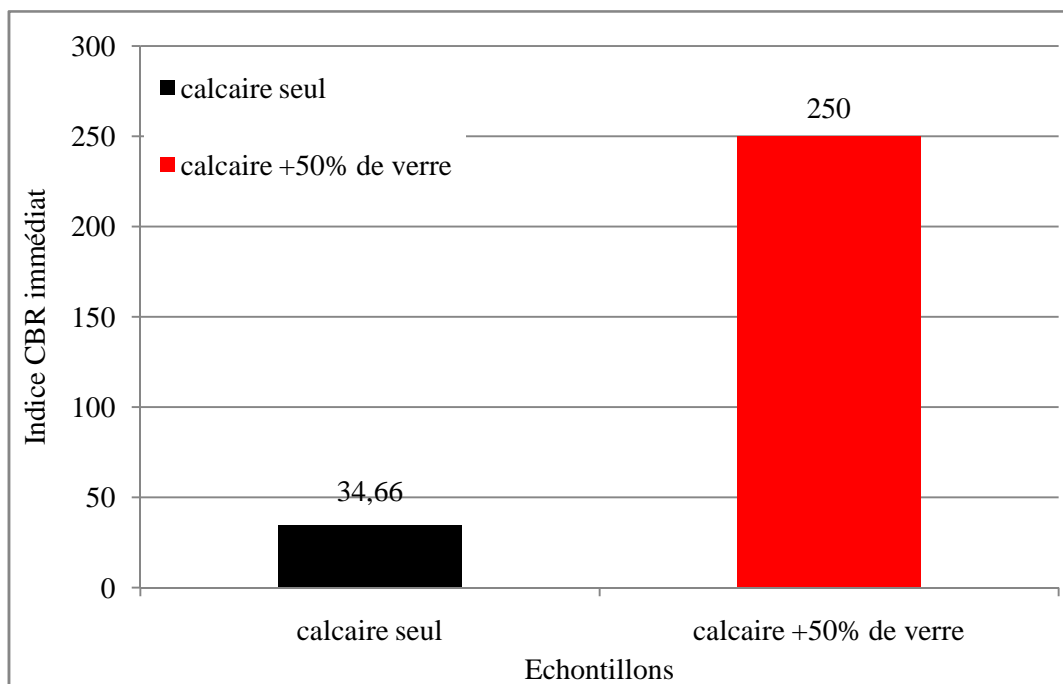


Figure 25.IV. Évolution des indices CBR immédiat.

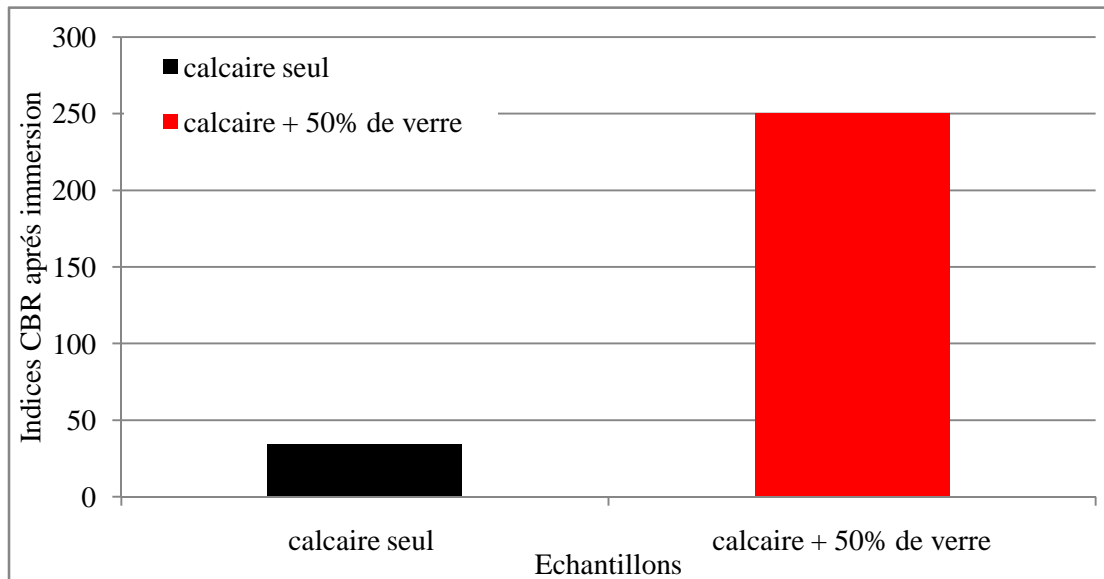


Figure 26.IV. Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immersion.

#### IV.10.7 Interprétation des résultats

##### a- L'indice CBR immédiat

L'essai de portance sur le calcaire seul montre des résultats assez satisfaisants. En effet, le calcaire est un matériau rocheux présentant une bonne portance à l'état sec.

Avec ajout de 50% de verre, la valeur de l'indice CBR immédiat a augmenté sensiblement pour atteindre un maximum dépassant 250, au point où la presse CBR n'arrive plus à continuer le poinçonnement.

##### b- L'indice CBR après immersion

L'ajout du verre améliore également la portance des mélanges en présence d'eau. En effet, elle passe de 34.55 pour le calcaire seul à des valeurs dépassant 250 avec l'ajout de 50% de verre (au-delà d'un certain seuil, la presse CBR n'arrive plus à poinçonner l'échantillon).

Tableau 9.IV. Les classes de portance des sols (CEBTP, 1984).

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

En se référant aux classes de portances présentées dans le tableau 9.IV, nous pouvons dire que les matériaux étudiés peuvent être classés dans la catégorie des matériaux de portances très élevée (S5).

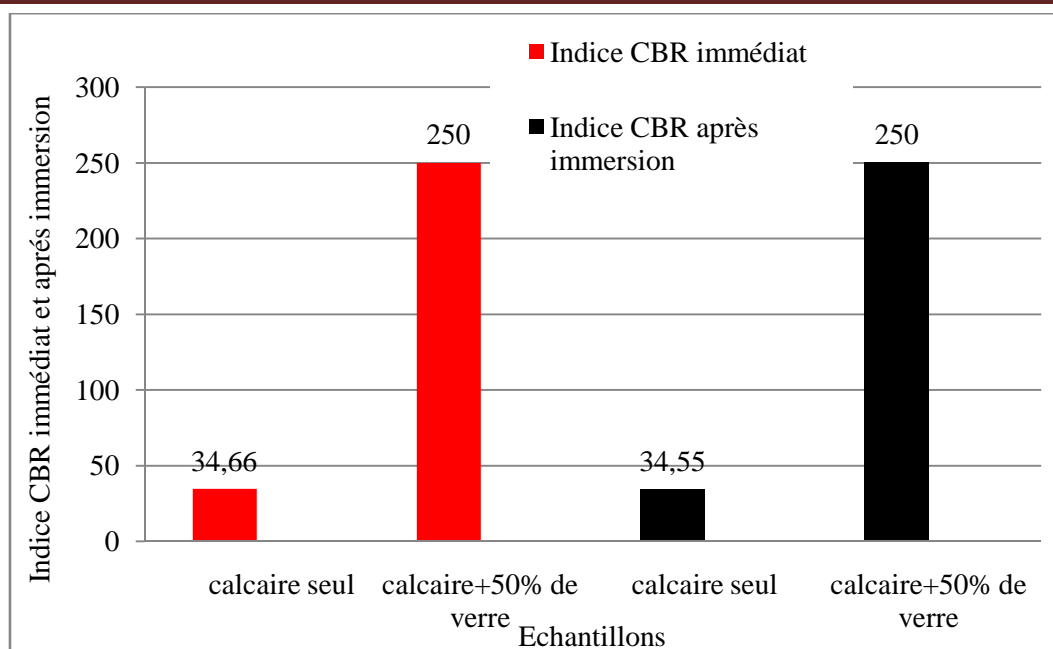


Figure 27.IV. Indice CBR immédiat et CBR immergé des différents mélanges.

Bien que l'ajout du verre a fait chuter la densité sèche du mélange aux essais de compactage, néanmoins, il améliore sensiblement sa portance. En effet, les deux indices CBR (avant et après immersion) passent de (34.66 et 34.55) à une valeur supérieure à 250 respectivement pour une teneur en verre de 50%.

La figure 27.IV montre que la résistance au poinçonnement des échantillons étudiés n'est pratiquement pas influencée par la présence d'eau. Cette caractéristique est très importante pour un matériau routier. Ceci offre à l'ouvrage construit (chassée) une meilleure stabilité sous l'action des agents climatiques (eau) et donc une meilleure durée de vie.

#### IV.10.8 Comparaison entre le mélange étudié (calcaire+débris de verre) et les autres mélanges (schiste et marne)

Tableau 10.IV. Tableau comparatif des indices CBR avant/après immersion des mélanges étudiés et des autres mélanges

	Calcaire+50% de verre	Schiste+50% de verre	Marne+50% de verre
CBR immédiat	250	73.57	55.092
CBR immersion	250	66.96	27.52

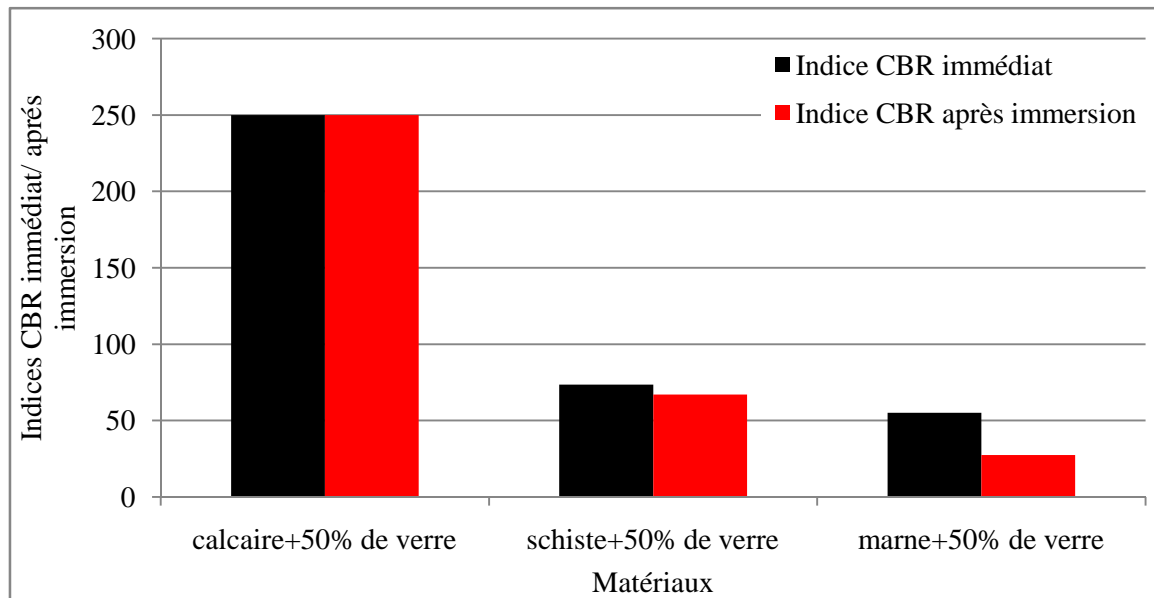


Figure 28.IV. Indice CBR immédiat et CBR immergé des différents matériaux.

D'après les résultats présentés dans la figure 28.IV on constate que le mélange calcaire+50% de verre présente une meilleure portance par rapport aux autres mélanges et une meilleure stabilité avant et après immersion. Ceci peut être dû à la nature minéralogique des matériaux naturels utilisés.

#### IV.11 Conclusion

A l'issue des différents essais réalisés dans ce chapitre, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés (mélange de calcaire+ débris de verre) ont présenté dans certains cas des comportements très intéressants. Les densités sèches développées sont supérieures à 1,8 est un signe d'une bonne aptitude au compactage à des teneurs en eau acceptables. Les portances développées sont également très intéressantes, notamment pour des teneurs en verre au voisinage de 50%. Ainsi leur utilisation en couches de chaussées est fortement recommandée à condition de satisfaire les exigences des normes pour d'autres essais routiers. Vu le manque du temps on a choisi ce dernier afin de réaliser les autres essais restants (essais routiers et essais de cisaillement à la boîte).

# CHAPITRE V

## ESSAIS ROUTIERS

### V.1 Introduction

Pour mieux connaître les caractéristiques mécaniques des granulats utilisés pour les couches de chaussées, les essais présentés dans les chapitres précédents ne sont pas suffisants.

Il existe par contre, d'autres essais permettant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages bien spécifiques (routiers), à titre d'exemple le degré d'usure, de fragmentabilité, de dégradabilité...etc.

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

#### V.2.1 Définition

L'essai est effectué en général sur le matériau à l'état sec (MDS) et à l'état humide (MDE) selon les conditions climatiques subies. Nous avons réalisé l'essai MDE pour étudier le comportement du matériau dans les plus mauvaises conditions climatiques.



Figure 1.V. Appareillage Micro Deval.

#### V.2.2 But de l'essai

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

### V.2.3 Principe de l'essai

Il faut préparer par lavage et tamisage les fractions suivantes : 10/14 ; 6.3/10;4/6.3.

Ces fractions sont encore divisées, dans lesquelles on prélève une quantité bien définie (500g), en rajoutant la masse de bille indiquée (ci-dessous).

Tableau 1.V. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire (NF P18-572, 1990)

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

### V.2.4 Mode opératoire

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

Une fois la rotation terminée, le contenu du cylindre est vidé sur un tamis de 1,6 mm

Le coefficient MDE est calculé comme suit :

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

Avec :

MDE : coefficient Micro Deval :

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

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

Nous avons choisi dans notre cas la classe granulaire 6.3-10, avec une masse de charge abrasive de 4000g.

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

Tableau 2.V. Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval (NF P18-572, 1990).

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 Matériaux utilisés

Nous avons réalisé deux essais Micro Deval sur la classe 6.3-10 à savoir :

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 50% de verre.

### V.2.6 Résultats et interprétation

- **Calcaire seul**

$$\text{MDE} = \frac{500 - 436.43}{500} \times 100 = 12.8\%$$

Tableau 3.V. Calcul du coefficient Micro Deval.

M(g)	M'(g)	MDE
500	436.43	12.8

- **Calcaire +50% de verre**

$$\text{MDE} = \frac{500 - 440.3}{500} \times 100 = 11.94\%$$

Tableau 4.V. Calcul du coefficient Micro Deval.

M(g)	M'(g)	MDE
500	440.3	11.94

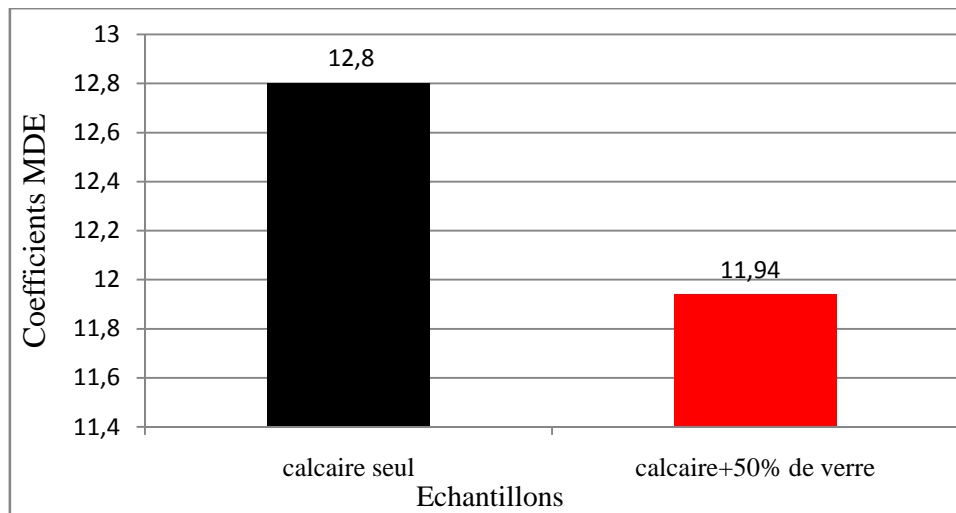


Figure 2.V. Résultats graphiques des essais Micro Deval.

### V.2.7 Interprétation des résultats

D'après les résultats présentés sur la figure 2.V, on peut constater que le calcaire et le mélange calcaire +50% de verre présentent des coefficients MDE de 12.8% et 11.94% respectivement, ce qui signifie que nous sommes en présence d'un matériau demoyenneà bonnerésistance à l'usure. Toutefois, il est à signaler que l'ajout du verre a amélioré légèrement la résistance à l'usure de l'échantillon. Ceci, peut-être dû au fait que les débris de verre sont insensibles à l'eau.

## V.3 Essai Los Angeles (NF P 18-573)

### V.3.1 Définition

C'est un essai très fiable est de très courte durée, il nous permet d'évaluer la qualité du matériau. Il s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle.

### V.3.2 But de l'essai

L'essai a pour objectif, la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs (dureté par rapport aux chocs) des granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du génie civil, particulièrement dans le domaine routier.

### V.3.3 Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite d'un matériau, soumis aux chocs de boulets normalisés (boules en acier) 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 - 25mm; 16 - 31,5mm et 25 - 50mm). Telles que, la classe (10 - 25mm) doit contenir 60 % de (10 - 16mm), la classe (16 - 31,5mm) 60 % de (16-25mm) et la classe (25 - 50mm) 60 % de (25 - 40mm).

### V.3.4 Mode opératoire

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

Tableau 5.V. Charge de boulet suivant le type de classe granulaire (NF P18-572, 1990)

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets
4-6.3	7
6.3-10	9
10-14	11

Nous avons choisi la classe 6.3-10 pour réaliser ces essais, pour cette classe granulaire on rajoute 9 boulets à la masse du matériau utilisé (5000g).

L'essai est mis en route en programmant à la machine 500 rotations à une vitesse comprise entre 30 et 35 tr/min.

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

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

### V.3.5 Matériaux utilisés

Nous avons réalisé deux essais Los Angeles sur la classe granulaire 6.3-10 à savoir :

- Calcaire seul ;
- Calcaire+ 50% de verre.

### V-3-6 Résultats et interprétations

- **Calcaire seul**

$$LA = \frac{5000 - 3740.5}{5000} \times 100 = 25.19\%$$

Tableau 6.V. Calcul du coefficient Los-Angeles (calcaire seul).

M(g)	M'(g)	LA
5000	3740.5	25.19

- **Calcaire + 50% de verre**

$$LA = \frac{5000 - 3525.7}{5000} \times 100 = 29.48\%$$

Tableau 7.V. Calcul du coefficient Los-Angeles (calcaire+ 50% de verre)

M(g)	M'(g)	LA
5000	3525.7	29.48

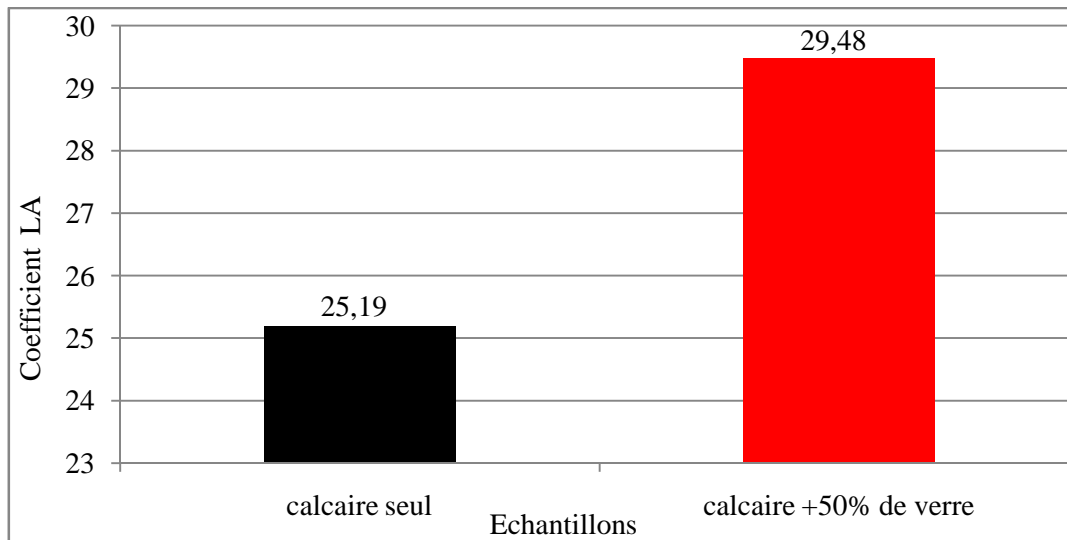


Figure 3.V. Résultats graphiques des essais Los-Angeles.

Tableau 8.V. Appréciation des résultats de l'essai Los Angeles (NF P18-572, 1990)

Coefficient LA	Appréciation
<15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 40	Moyen à faible
>40	Médiocre
Plus LA est élevé, moins le matériau est dur	

D'après les résultats présentés sur la figure 3.V, on peut constater que le calcaire et le mélange calcaire +50% de verre présentent des coefficients LA de 25.19% et 29.48% respectivement, ce qui signifie que nous sommes en présence d'un matériau demoyenne à faible résistance aux chocs. Une certaine amélioration du coefficient Los Angeles est constatée après l'ajout du verre.

Tableau 9.V. Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons.

	LA	MDE	MDE+LA
Calcaire seul	25.19	12.8	37.99
Calcaire +50% de verre	29.48	11.94	41.42

Tableau 10.V. Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure  
(Moron, BRGM)

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

A partir des valeurs de références présentées dans le tableau 10.V, on peut dire que :

Le calcaire seul et le mélange calcaire +50% de verre présentent une bonne résistance aux chocs et à l'usure. Ceci, permet de les classer dans la famille des matériaux de catégorie C.

Ce type de matériau peut être utilisé pour couche de fondation et couche de base, sous tout trafic.

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

### V.4.1 Définition

L'essai de fragmentabilité permet de traduire l'évolution continue de la granularité de certains matériaux rocheux. Chaque matériau évolue et se dégrade différemment sous l'effet du trafic de chantier, c'est pour cela qu'on détermine le coefficient de fragmentabilité noté FR permettant de classer l'échantillon par rapport aux valeurs de référence données par la norme française NF P 94 – 066.

### V.4.2 Appareillage

L'essai se réalise en utilisant le matériel suivant :

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

### V.4.3 Mode opératoire

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

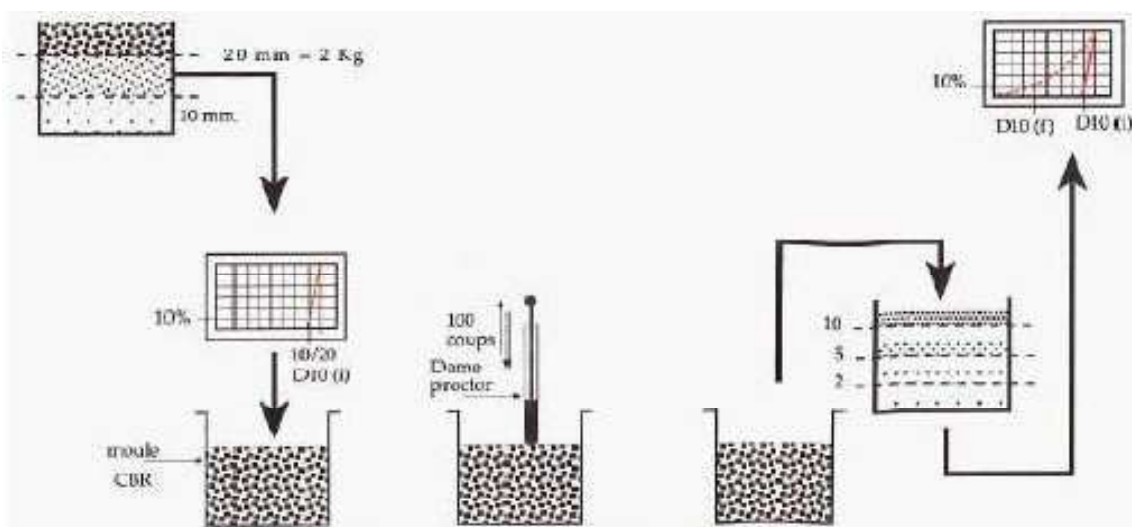


Figure 4.V. Différentes étapes de l'essai de fragmentabilité.

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

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

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

Tableau 12.V. Valeurs de références NF P 94-066.

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

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

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 50% de verre.

#### V.4.4 Résultats des essais

- Calcaire seul

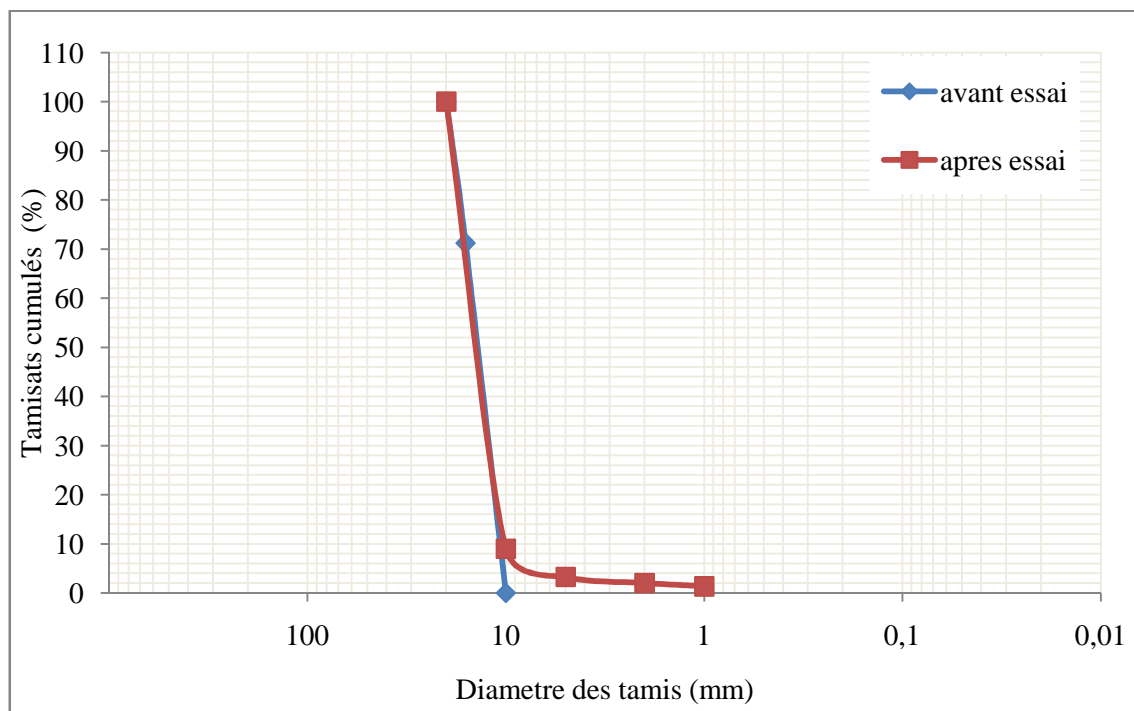


Figure 5.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire seul.

$$FR = \frac{11}{10} = 1.1$$

- **Calcaire +50% de verre**

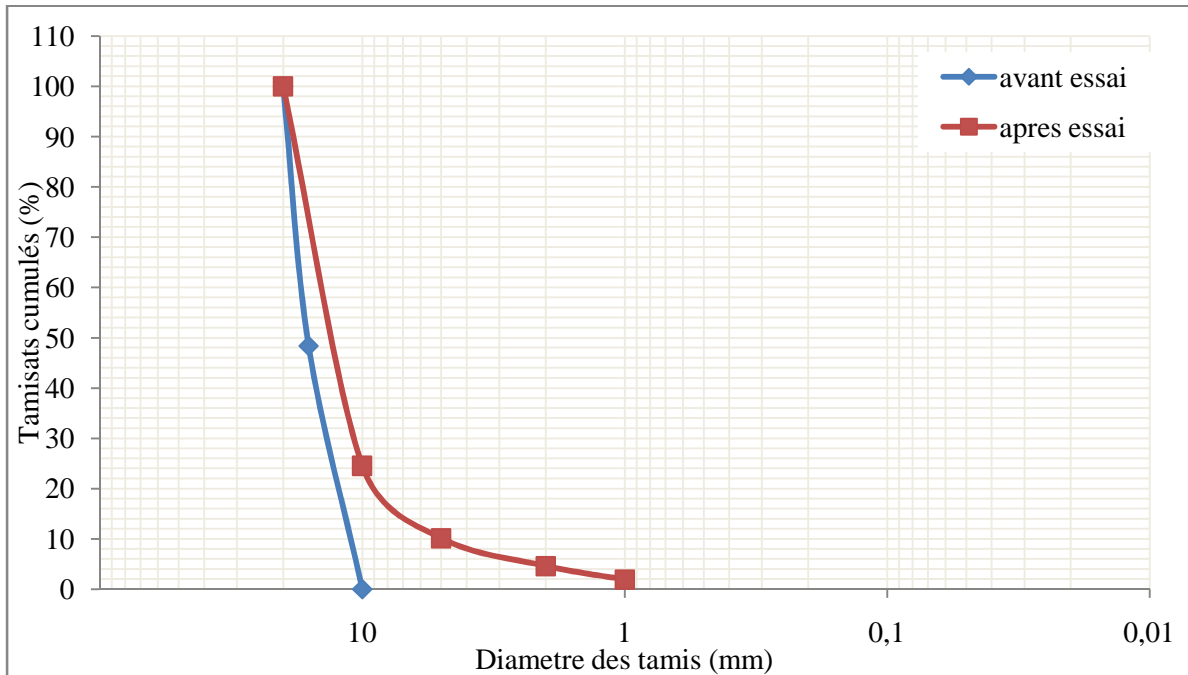


Figure 6.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire + 50% de verre.

$$FR = \frac{11}{5} = 2.2$$

#### V.4.5 Présentation graphique des résultats

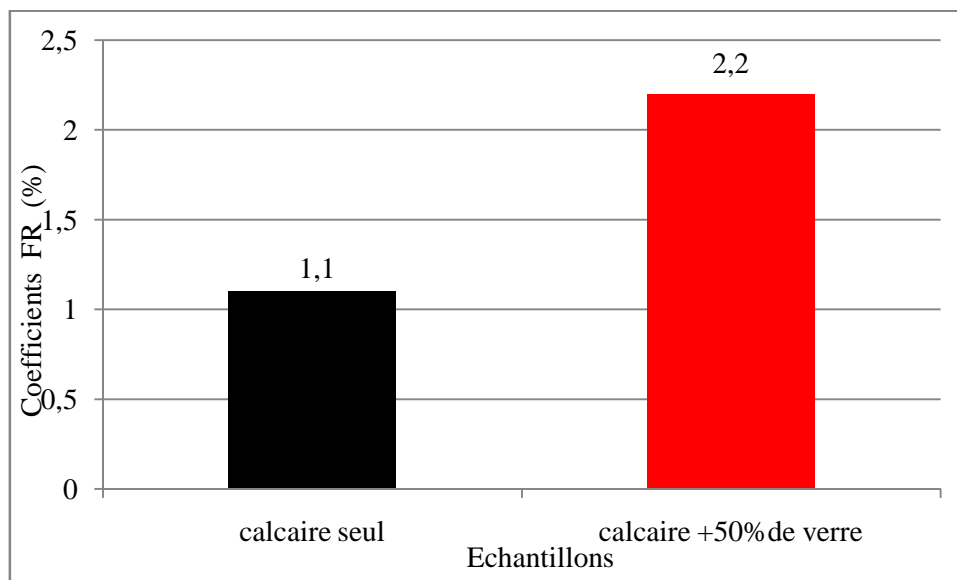


Figure 7.V. Coefficients de fragmentabilité des différents échantillons.

#### **V.4.6 Interprétation des résultats**

Les résultats obtenus pour les échantillons de calcaire seul et avec ajout des débris de verres 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. Le calcaire seul a très bien supporté le pilonnage appliqué. Toutefois, la résistance à la fragmentation des mélanges diminue avec l'ajout de 50% des débris de verre. Elle passe de 1.1 pour le calcaire seul à 2,2 pour le mélange à 50% de verre. Ceci peut être dû au fait que les débris de verre sont peu résistants au pilonnage appliqué. Néanmoins, le comportement du mélange combiné calcaire-verre présente des résultats satisfaisants.

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

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

##### **V.5.1 Appareillage**

L'essai se réalise en utilisant le matériel suivant :

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

##### **V.5.2 Mode opératoire**

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

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

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

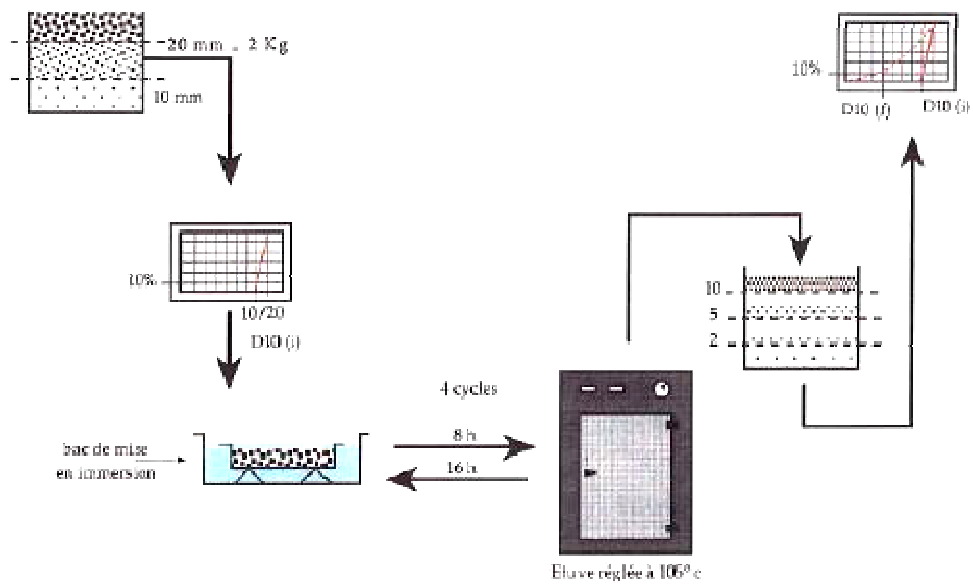


Figure 8.V. Différentes étapes de l’essai de dégradabilité.

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

$$DG = \frac{D10 \text{ Avant le 1er cycle imbibition/séchage}}{D10 \text{ Après le 4emecycle imbibition/séchage}}$$

Tableau 13.V. Classification des matériaux rocheux selon le coefficient DG NF P 94-067

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

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

- Calcaire seul ;
- Calcaire + 50% de verre.

**V.5.3 Résultats des essais**

- **Calcaire seul**

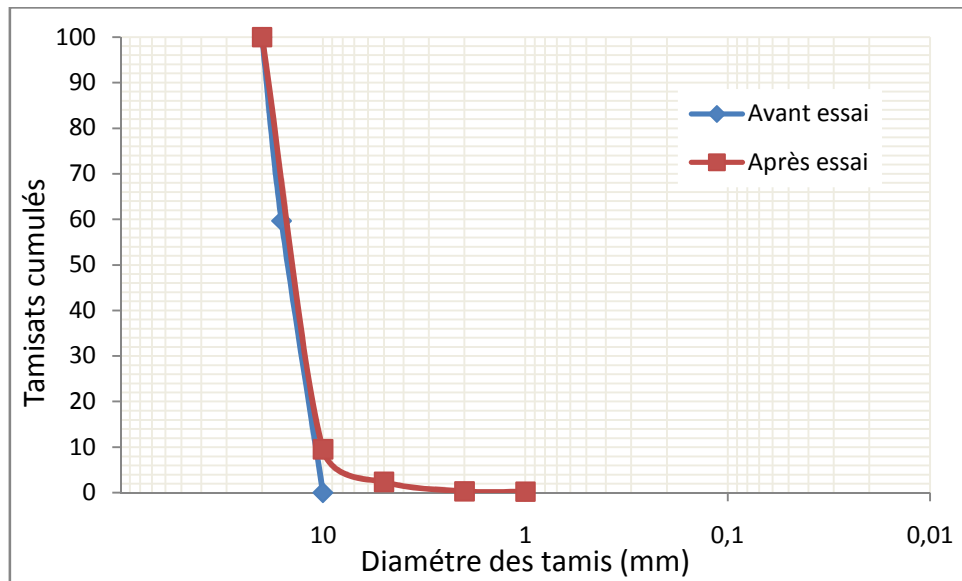


Figure 9.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire seul.

$$DR = \frac{11}{10} = 1.1$$

- **Calcaire + 50% de verre**

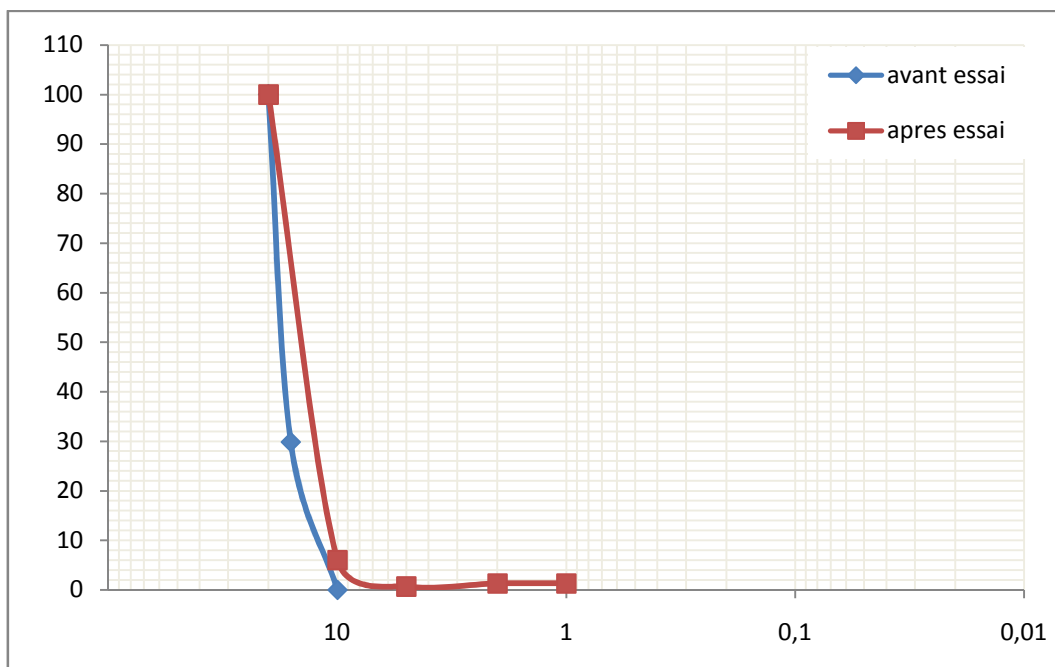


Figure 10.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire +50% de verre.

$$DR = \frac{9}{9.5} = 0.94$$

### V.5.4 Présentation graphique des résultats

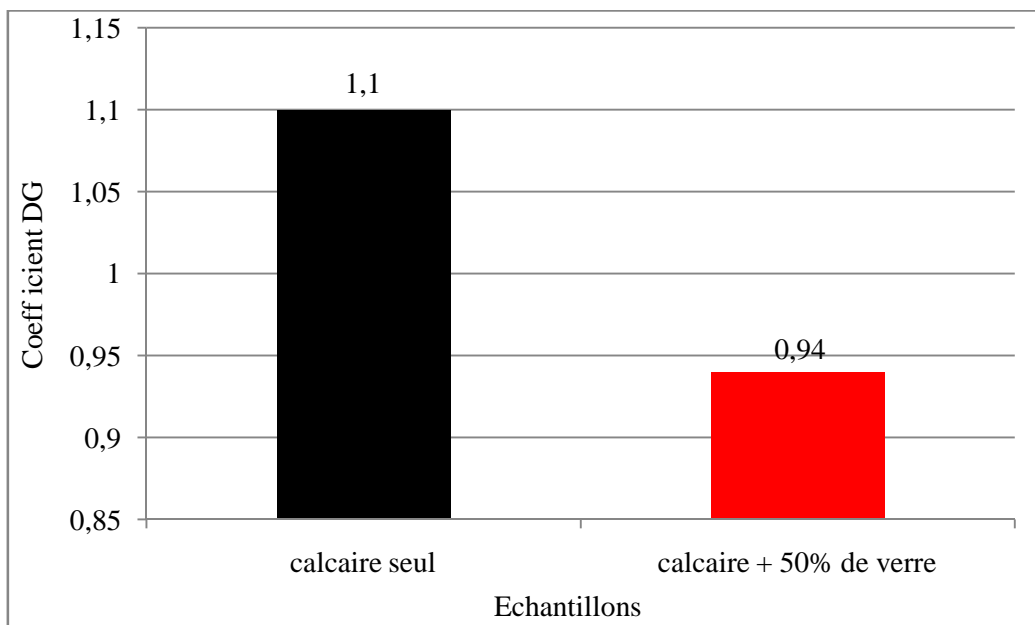


Figure 11.V. Coefficient de dégradabilité des différents échantillons.

### V.5.5 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus pour tous les échantillons sont très intéressants. En effet, les coefficients DR déterminés sont inférieurs à 5, ce qui indique que les matériaux étudiés sont très peu dégradables sous l'effet des agents climatiques.

Le calcaire seul a très bien supporté les cycles séchages / humidification appliqués, toutefois l'ajout du verre a nettement amélioré cette aptitude (voir figure10.V), cela peut s'expliquer par le fait que le verre soit complètement insensible aux agents climatiques.

### V.6 Conclusion

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

En se basant sur les résultats obtenus, nous pouvons conclure que les matériaux étudiés (calcaire seul et le mélange calcaire+50% de verre) ont présenté dans certains cas des comportements très intéressants et peuvent être proposés pour une utilisation en couches inférieures de chaussées (couche de fondations et couche de base) de faible à moyen trafic, à condition d'obtenir des résultats acceptables sous d'autres essais routiers exerçant d'autres types de sollicitations.

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

# CHAPITRE VI

## RESISTANCE AU CISAILLEMENT DES MATERIAUX

### VI.1 Introduction

L'élaboration et l'exécution des projets tel que les structures (bâtiment) ou l'infrastructure en site neuf nécessitent une bonne connaissance des terrains traversés. Pour cela, il est nécessaire de connaître la résistance au cisaillement du sol, qui se traduit en général par deux paramètres très importants qui sont :

L'angle de frottement interne des grains.

La cohésion du sol.

Afin de déterminer ces deux paramètres, nous avons recours à un essai en laboratoire très sollicités par les ingénieurs qui est "L'essai de cisaillement à la boîte" proposé Mr. Alexandre COLLIN (1846) et mise au point par le Pr. CASAGRANDE.

### VI.2 Notion de résistance au cisaillement

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

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

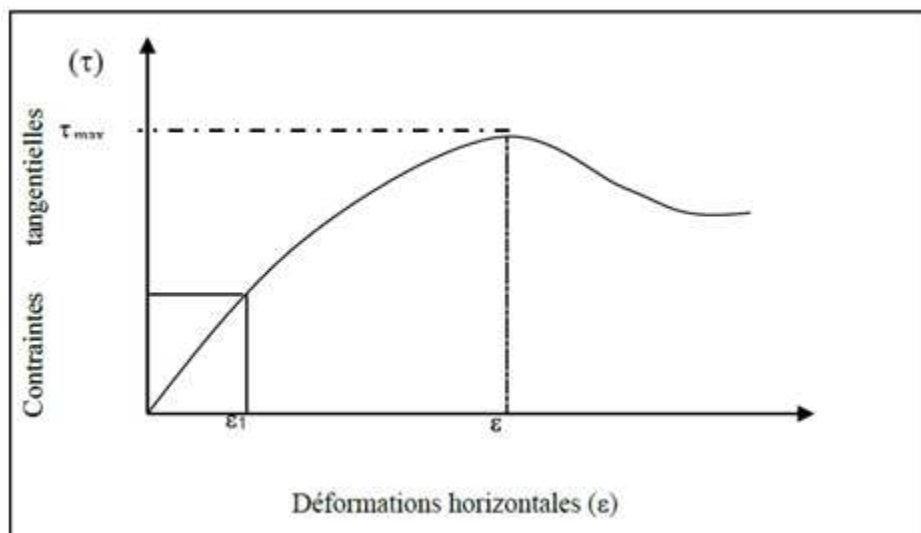


Figure 1.VI. Courbe de contraintes-déformations.

Le LCPC 21 (1987) définit la résistance au cisaillement sur ce graphique, comme étant :

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

### VI.3 Principe de l'essai

L'essai consiste à placer un échantillon de sol (intact, remanié ou reconstitué) entre deux demi-boîtes indépendantes, qui peuvent se déplacer l'une par rapport à l'autre suivant un plan horizontal imposé. L'échantillon est soumis à une contrainte normale  $\sigma$  bien déterminée. La demi-boîte inférieure est entraînée horizontalement à vitesse constante. La force totale de cisaillement  $T$  est mesurée à l'aide d'un anneau dynamométrique fixé à la demi-boîte supérieure. Un comparateur mesure la déformation verticale de l'échantillon au cours du cisaillement.

### VI.4 But de l'essai

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

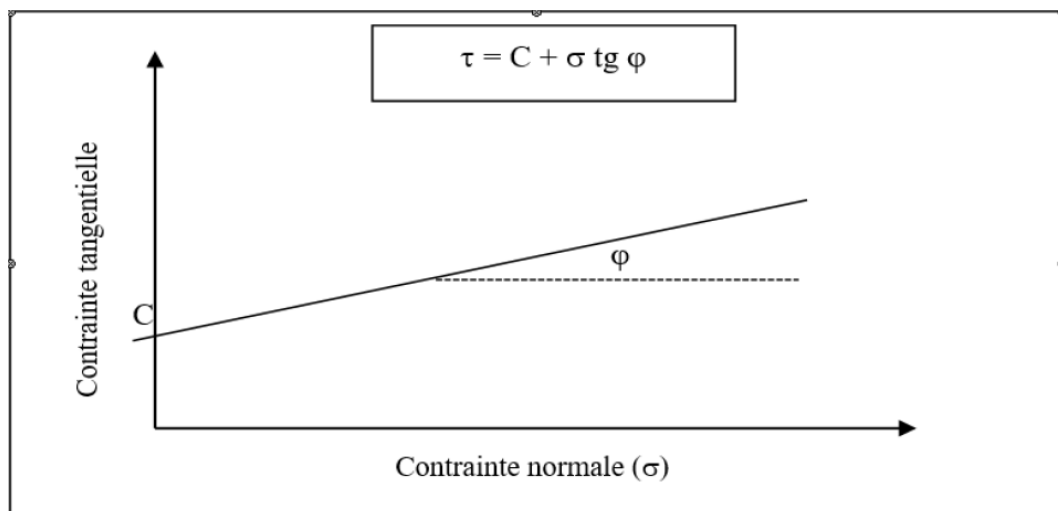


Figure 2.VI. Droite intrinsèque (LCPC, 1987).

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

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

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

## VI.5 Les paramètres intrinsèques

- **L'angle de frottement interne**

L'angle de frottement interne  $\varphi$  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), (Robitaille et Tremblay, 1997).

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

- **La cohésion**

Elle exprime la résistance au cisaillement du sol sous contrainte normale indépendamment de la contrainte normale  $\sigma$ . 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). La cohésion est relativement élevée pour les sols cohérents, surtout dans les sols fortement surconsolidés. Mais celle-ci disparaît dès que les liaisons sont cassées par le cisaillement, ce qui correspond approximativement au maximum de la courbe de rupture (Lerou, 2005).

### VI.5.1 Paramètres $c$ et $\varphi$ pour différents types de sols

**Trois grandes catégories de sols sont couramment rencontrées :**

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

### Cas des Sols pulvérulents

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

L'équation de Coulomb devient :

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

L'angle  $\varphi$  appelé « angle de frottement interne », dépend essentiellement de la compacité du sol, de la forme et de l'état de surface des grains solides. (Schmitt et al, 2008). La résistance au cisaillement pour ces types de sols est assurée par le frottement et l'enchevêtrement des grains.

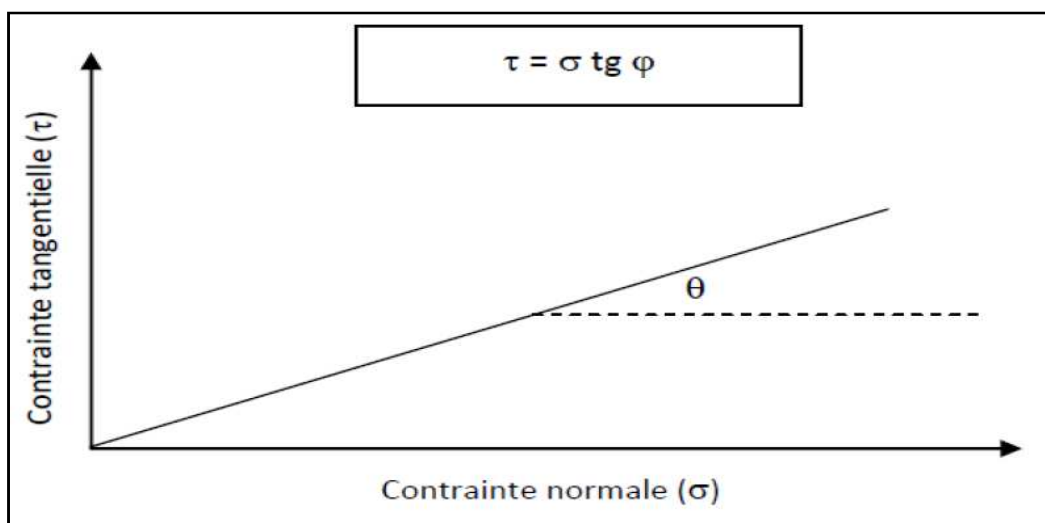


Figure 3.VI. Courbe intrinsèque d'un sol pulvérulent.

### Cas des sols purement cohérents

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

L'équation de Coulomb devient :  $\tau = c$ .

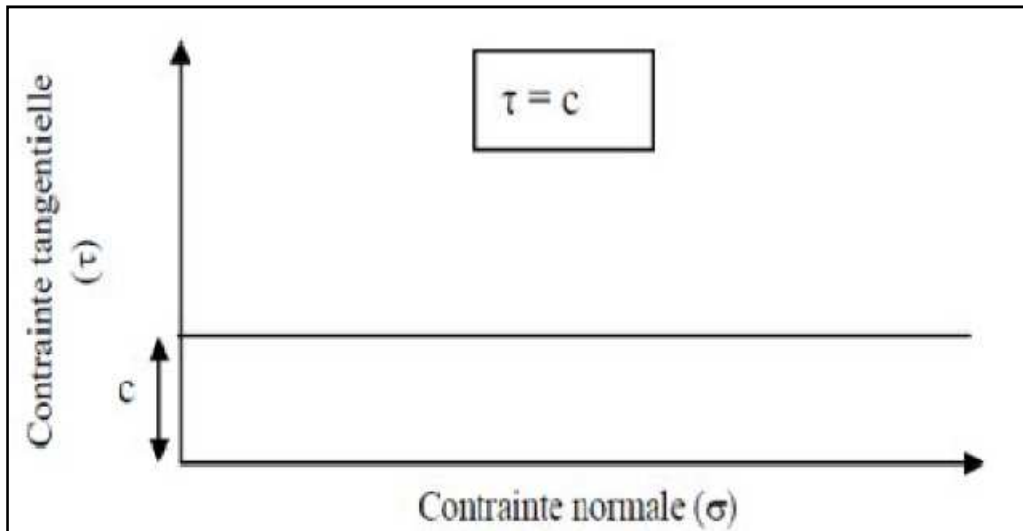


Figure 4.VI. Courbe intrinsèque d'un sol cohérent.

### Cas des sols cohérents et frottants

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

L'équation de Coulomb est exprimée par :  $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$ .

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

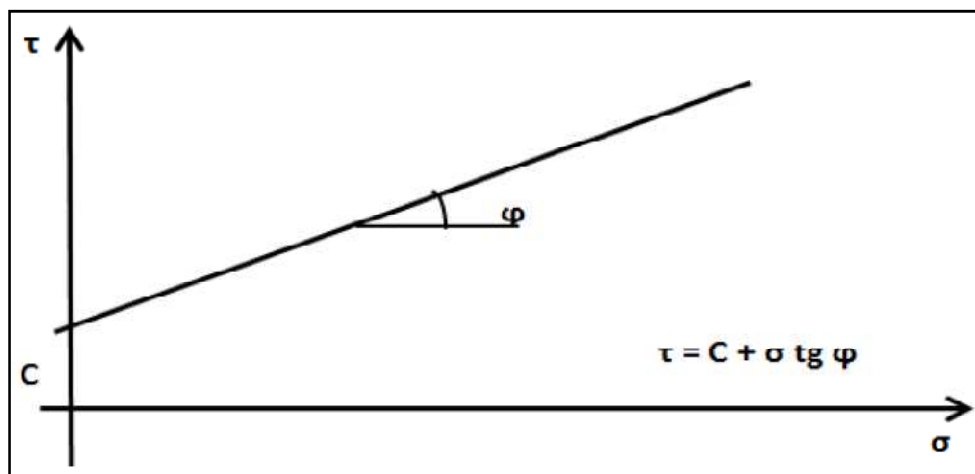


Figure 5.VI. Courbe intrinsèque d'un sol cohérent et frottant.

## VI.6 Type d'essais de cisaillement à la boîte (UU, CU, CD)

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

### VI.6.1 Essai non consolidé non drainé UU (Unconsolidated-Undrained)

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

$$\tau = c_u.$$

### VI.6.2 Essai consolidé non drainé CU (Consolidated-Undrained)

Dans ce cas, l'échantillon est consolidé sous une contrainte normale appliquée avec drainage, l'essai est ensuite effectué avec une vitesse rapide et un drainage fermé. Cet essai est exprimé en contraintes totales, la droite intrinsèque a pour équation :  $\tau = c_u + \sigma \operatorname{tg} \varphi$

### VI-6-3 Essai consolidé drainé CD (Consolidated-Drained)

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

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

Avec :

$\varphi'$  : angle de frottement effectif.

$c'$ :cohésion drainée.

## VI.7 Appareillage

La machine de cisaillement, la boîte de cisaillement ou boîte de Casagrande. Elle comporte essentiellement :

- Une demi-boîte inférieure mobile, munie d'une pierre poreuse plate, striée ou dentée ;
- Une demi-boîte supérieure fixe ; les dimensions intérieures des demi-boîtes sont généralement de 6 x 6 cm, la profondeur de la demi-boîte inférieure est de 2 cm environ. Cette dimension est valable dans le cas des sols dont la dimension des plus gros grains ne dépasse pas 5mm. Dans le cas contraire, il faut passer à des boîtes de dimensions plus grandes (10 x 10, ... 100 x 100).

Une pierre poreuse plate, striée ou dentée, glissant librement dans la demi-boîte supérieure et transmettant à l'éprouvette l'effort verticale exercé, deux goupilles, solidarissant les deux demi-boîtes (avant l'essai) et d'autres appareillages d'usage courant (balance de précision, étuve, ...).

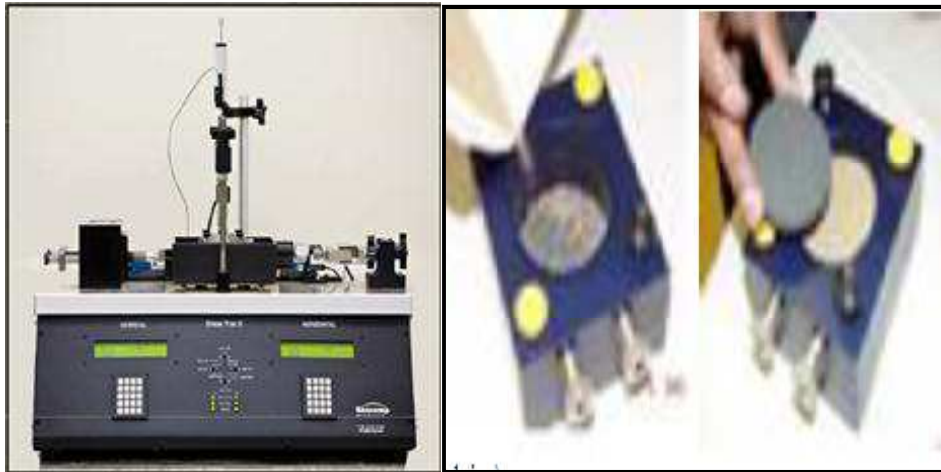


Figure 6.VI. Appareillage et accessoires d'un essai de cisaillement à la boîte.

### Description de la machine de cisaillement rectiligne :

L'appareil consiste en un robuste bâti avec moteur pas à pas qui sert à animer la boîte à eau, avec la partie inférieure de la boîte de cisaillement. La force de cisaillement, de déplacement et de règlement sont mesurées au moyen de capteurs électroniques. La commande de dispositif d'acquisition de données via un PC avec un logiciel PROGRESS.

Pour que l'effort soit bien appliqué au centre de l'échantillon, le poinçon des boîtes de cisaillement est guidé par des douilles à billes. Le joint de cisaillement entre les deux moitiés de la boîte de cisaillement peut être réglé simplement sur la boîte à eau entre 0 et 1 mm.

Les cales de cisaillement et les poids restants doivent être commandés séparément.

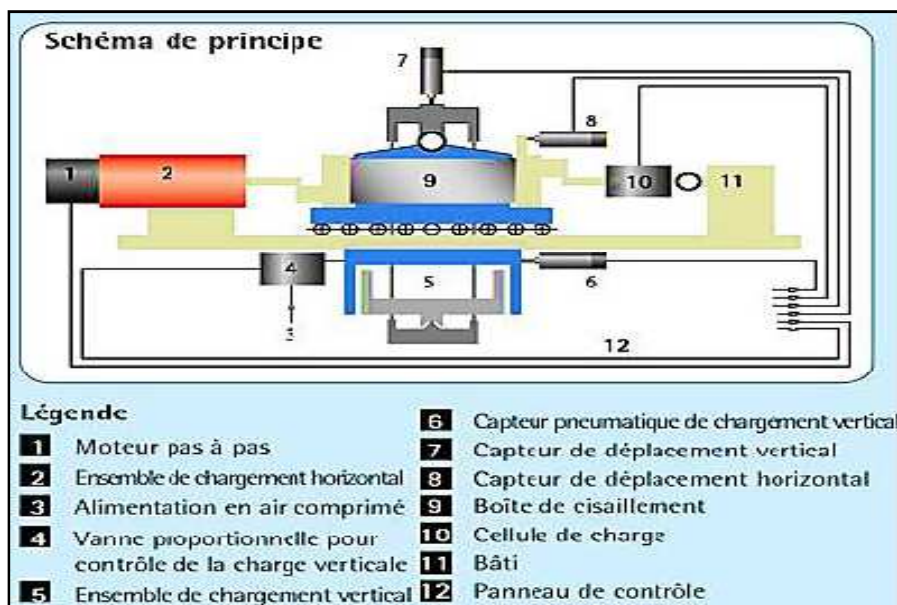


Figure 7.VI. Schéma de la machine de cisaillement rectiligne.

## VI.8 Préparation des échantillons

Les essais de cisaillement comme la plupart des essais de laboratoire peuvent être réalisés sur des échantillons intacts ou des échantillons reconstitués. Pour étudier la résistance au cisaillement d'un sol ou d'un matériau donné, il faut réaliser au moins 3 essais sur des échantillons du même sol, préparés de la même manière, cisailés à la même vitesse, mais à des contraintes normales différentes ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ ).

Les essais sont réalisés selon la norme française (NF P94-071-1) sur des échantillons humidifiés à leurs teneurs en eau optimale.

Densifier l'échantillon dans un anneau où son volume est connu et le mettre dans la boîte de cisaillement ;

Mettre la plaque rainurée et l'autre plaque à la base ;

Fixation des demi-boîtes ;

Mettre la boîte sur le chariot et positionner les comparateurs et capteurs pour faire des lectures (déplacement horizontal, déplacement vertical et force tangentielle).

## VI.9 Expression des résultats

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

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

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

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

Nous avons réalisé une série d'essai de cisaillement sur deux échantillons à savoir :

Calcaire seul ;

Calcaire +50% de verre.

## VI.10 Présentation et discussion des résultats

### Courbes contraintes-déplacements

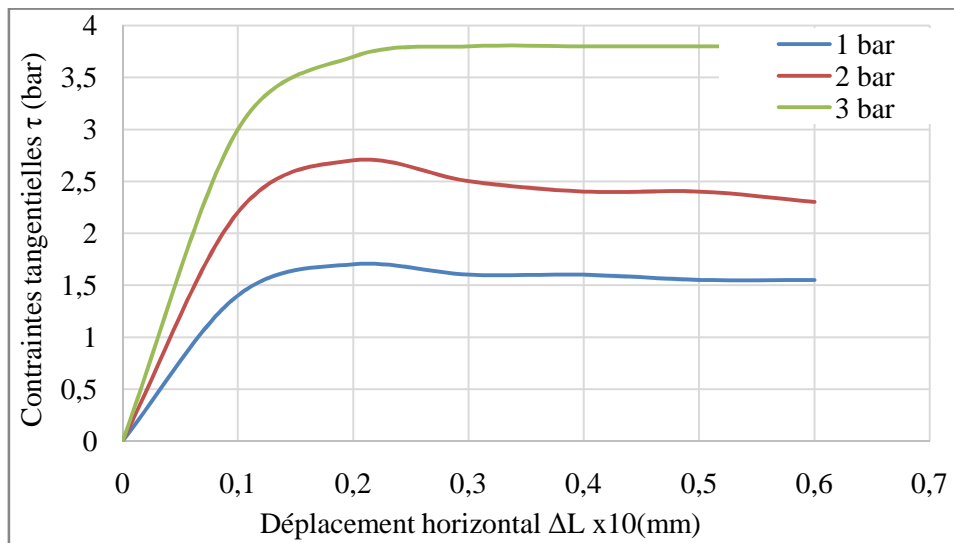


Figure 8.VI. Courbes de contraintes-déformation (calcaire seul).

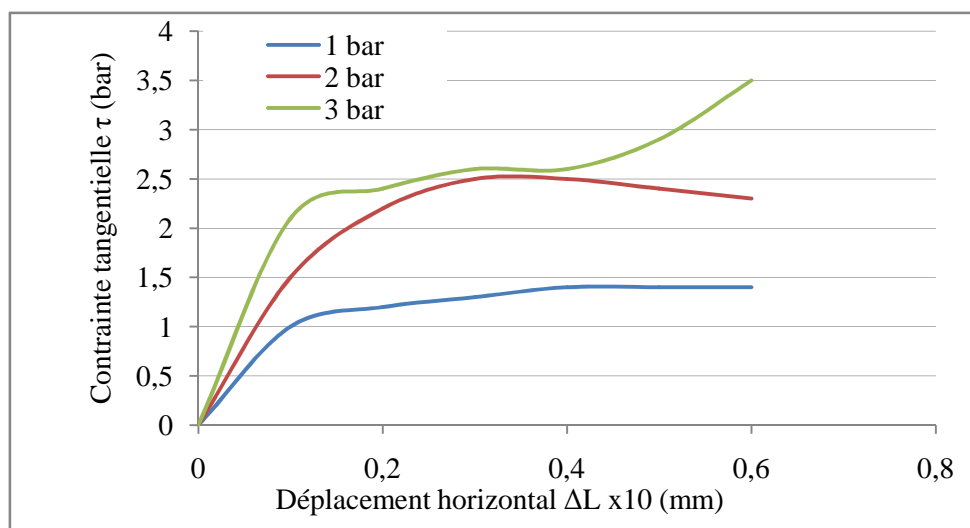


Figure 9.VI. Courbes contraintes déformations (calcaire+50% de verre).

Les courbes présentées sur les figures 8.VI et 9.VI montrent que la résistance au cisaillement des différents échantillons augmente avec l'accroissement des contraintes verticales (normales  $\sigma$ ). En effet, l'augmentation des contraintes normales appliquées accentue la compacité des échantillons, cela conduit à un resserrement des grains et donc, à un frottement et à un enchevêtrement des grains plus important et par conséquent à une résistance plus grande aux efforts de cisaillement.

### Courbes déplacement horizontal-déplacement vertical

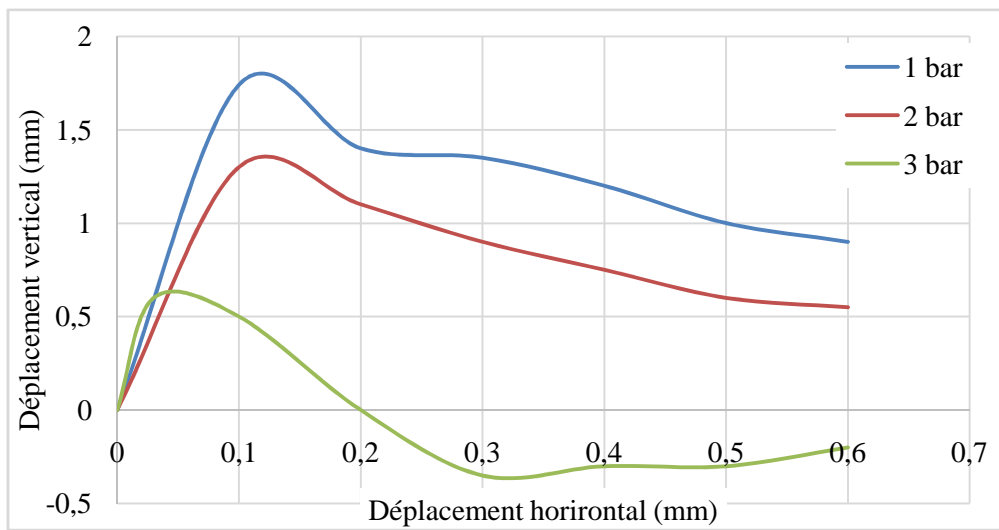


Figure 10.VI. Courbes de variation du volume (calcaire seul).

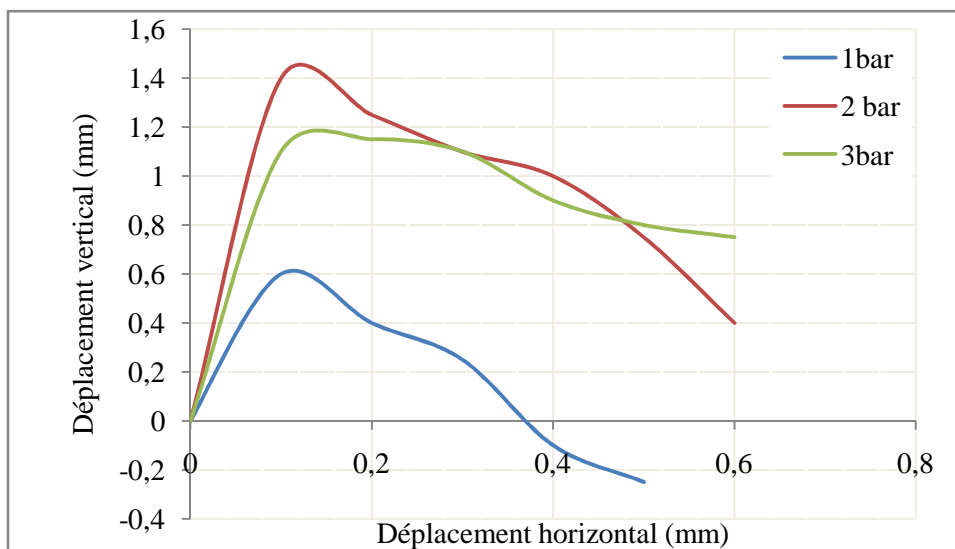


Figure 11.VI. Courbes de variation de volume (calcaire +50% de verre).

La courbe présentée sur les figures 10.VI montre le comportement dans le cas du calcaire seul est légèrement dilatant au début de l'essai, ensuite contractant jusqu'à la fin de l'essai. Toutefois, la phase de contractante s'accroît de plus en plus en fonction de la contrainte normale appliquée. En effet, les grains subissent un réarrangement et un resserrement au cours du déplacement (diminution de volume), notamment sous de fortes contraintes.

Tandis que dans le cas du mélange calcaire +50% de verre (figure 11.VI), on peut dire que le volume des échantillons varie d'une manière aléatoire en fonction des contraintes normales appliquées.

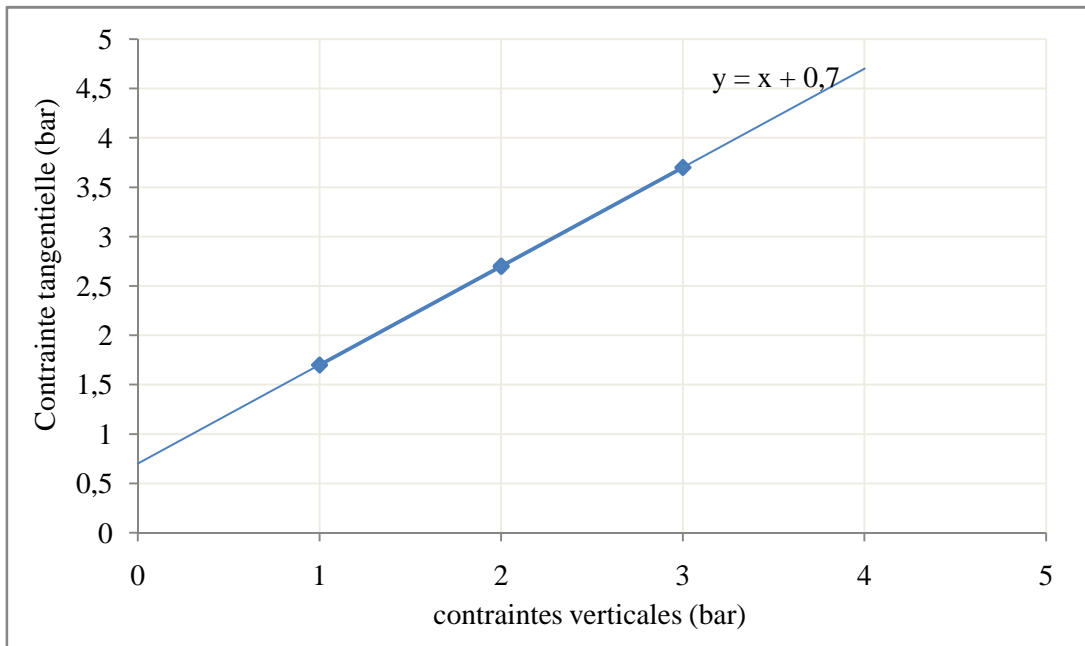
**Droites intrinsèques et caractéristiques de cisaillement  $c$  et  $\varphi$** 

Figure 12.VI. Droite intrinsèque (calcaire seul).

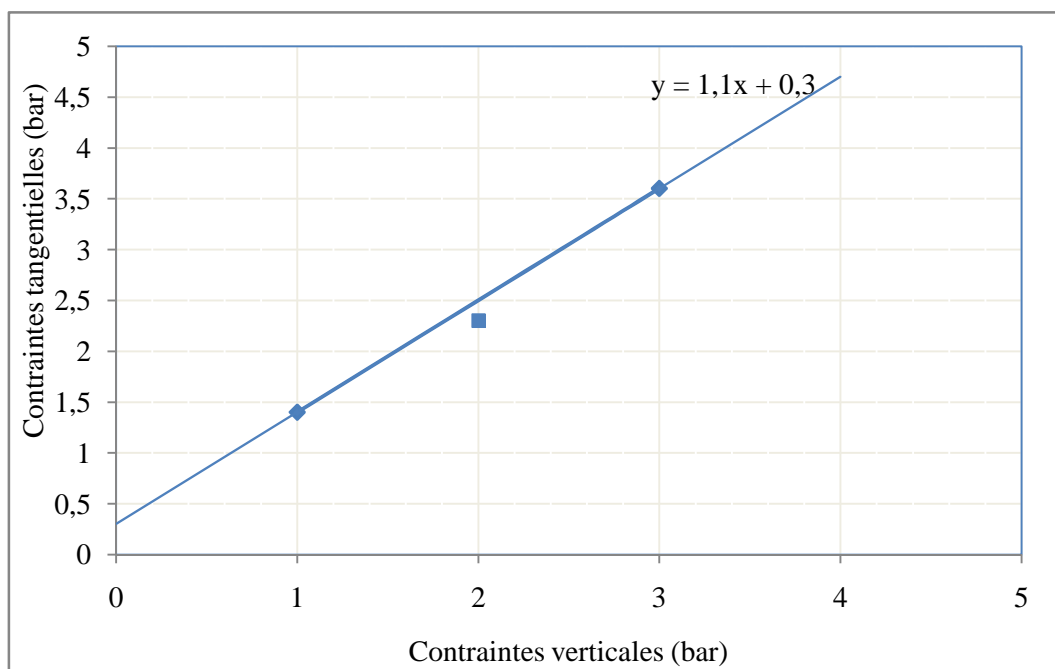


Figure 13.VI. Droite intrinsèque (calcaire+50% de verre).

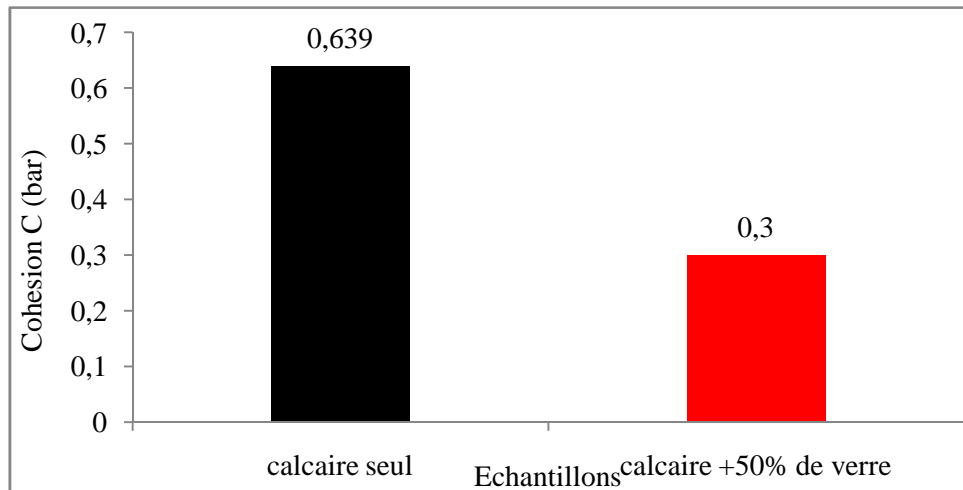


Figure 14.VI. Cohésion des différents mélanges.

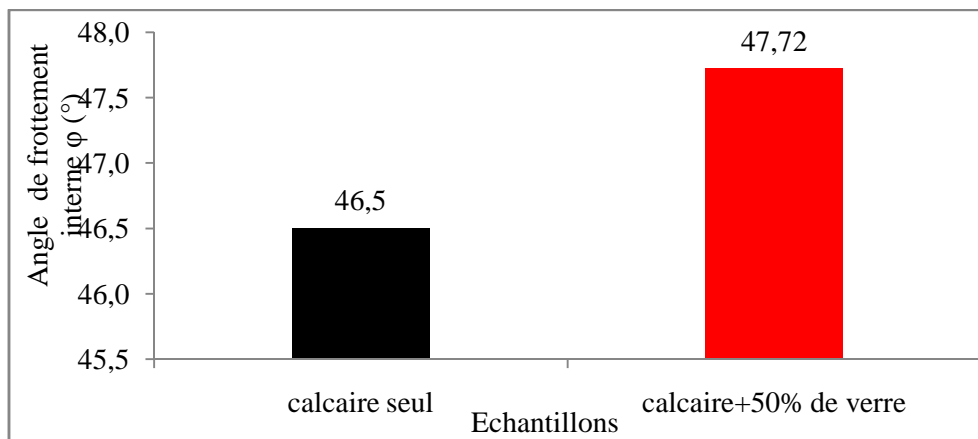


Figure 15.VI. Angle de frottement interne des différents mélanges.

Les figures 14.VI et 17.VI permettent de constater une hausse de l'angle de frottement avec l'ajout des débris de verre, cet accroissement s'explique par leur forme anguleuse qui augmente l'enchevêtrement des grains au cours du cisaillement. Ces paramètres (frottement et enchevêtrement) sont les paramètres essentiels de résistance au cisaillement pour un matériau granulaire.

Tandis qu'on remarque une baisse de la cohésion dans le cas des mélanges. Cette baisse s'explique par la forme plus ou moins aplatie du verre qui crée des discontinuités dans la structure granulaire des échantillons.

### VI.11 Comparaison entre le mélange étudié (calcaire + débris de verre) et les autres mélanges (schiste et marne)

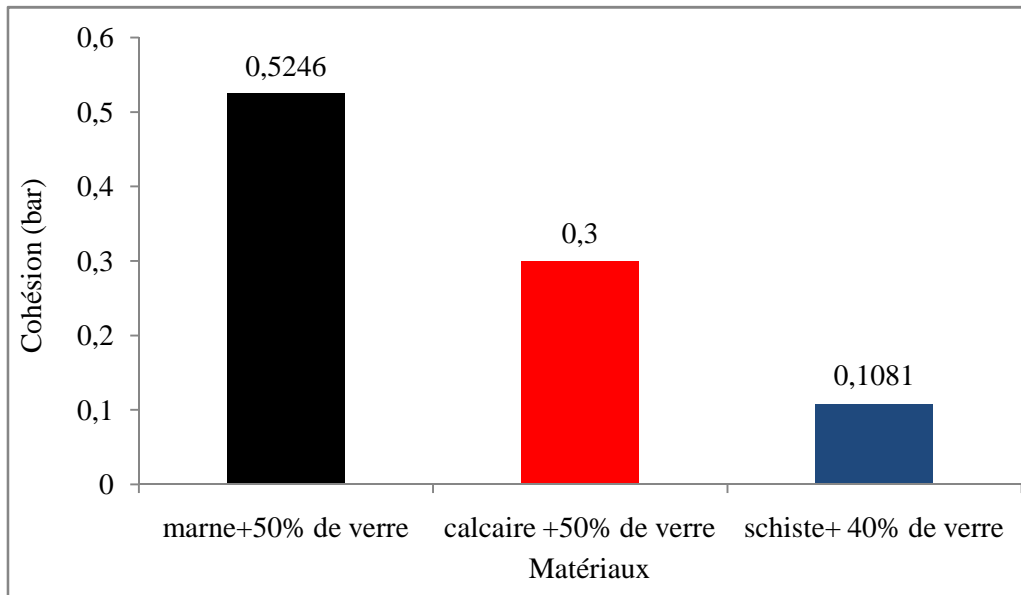


Figure 16.VI. Cohésion des différents matériaux.

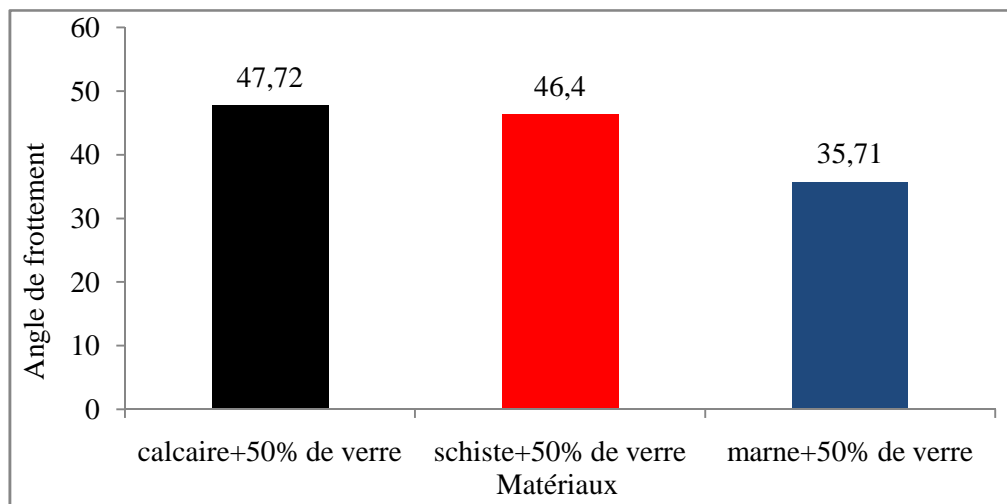


Figure 17.VI. Angle de frottement des différents matériaux.

En se basant sur la figure 16.VI, on constate que la cohésion du calcaire+50% de verre ( $C=0.3$  bar) est moins importante que la marne+50% de verre ( $C=0.5$  bar) vu que la marne est connue comme un matériau cohérent. Par contre, elle est plus importante que le schiste+50% de verre ( $C=0.1$  bar).

Tandis que, le mélange (calcaire+50%de verre) développe les angles de frottement les plus importants ( $\varphi=47.72^{\circ}$ ) que les mélanges de schiste ( $\varphi = 46.40$ ) et les mélanges de marne ( $\varphi=35.71^{\circ}$ ) respectivement.

Tableau 1.VI. Résultats moyens de résistance au cisaillement. (Atlan, 1978)

	C (bar)	$\varphi$ (°)
Granite	100-400	51-58
Calcaire	4-360	37-58
Grés	4-430	48-50

### VI.12 Conclusion

L'étude du comportement des mélanges au cisaillement nous a permis de conclure que le calcaire seul présente le meilleur comportement mécanique comparé à celui du mélange (calcaire +50% de verre).

D'après les valeurs indiquées dans le tableau 1.VI on constate que les résultats obtenus pour le mélange avec ajout de verre sont tolérables.

## Conclusion générale

La valorisation de nouvelles sources de granulats naturels (calcaire) et recyclés (débris de verre) dans la construction routière devient indispensable et paraît une solution d'avenir assurant le développement durable des pays.

En effet, cette étude expérimentale s'inscrit dans deux contextes ; économique et écologique ; elle présente plusieurs avantages, à savoir :

- Facilité d'extraction ou de collecte dans le cas du verre ;
- Facilité de préparation ;
- Economie de transport et de temps (matériaux locaux) ;
- Préservation des ressources naturelles, notamment les gisements alluvionnaires ;
- Libérer les espaces occupés par les décharges anarchiques de déchets.

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons reconstitués à base de mélanges de calcaire et des débris verre permettent de tirer les conclusions suivantes :

-Les mélanges développent des densités sèches réduites comparativement à celles développées par le calcaire seul, néanmoins, elles restent assez importantes (supérieures à 1.8) et satisfaisantes pour un matériau routier et vérifie les plages de densités exigées par les normes en vigueur.

- L'ajout du verre améliore sensiblement la portance des mélanges même en présence d'eau avec des gonflements pratiquement nuls.

- Les mélanges présentent des indices CBR avant et après immersion très importants (>250 dans les mélanges avec ajout de 50% de verre).

- Le mélange avec ajout de 50% de verre développe une résistance au cisaillement réduite comparativement à celles développées par le calcaire seul, néanmoins, elles restent importantes et satisfaisantes pour un matériau routier.

- On ce qui concerne la résistance à l'usure et aux chocs les résultats obtenus pour les échantillons étudiés présente des résistances bonnes à moyennes.

En se basant sur l'ensemble des résultats obtenus, nous pouvons conclure que les mélanges étudiés ont présenté des caractéristiques mécaniques très intéressantes sous les différentes sollicitations appliquées, pouvant autoriser leur utilisation en couches de chaussées (couches de forme, couches de fondations et couches de base éventuellement) sous faible à moyen trafic. Ainsi, l'utilisation des débris de verre dans la technique routière peut être une alternative fiable et rentable sur le volet économique et environnemental des pays notamment en voie de développement tels que l'Algérie.

# Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les chaussées .....</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Définition de la chaussée.....	3
I.3 Les caractéristiques d'une chaussée .....	3
I.4 Structure de chaussées.....	3
I.5 Les éléments géométriques d'une chaussée .....	5
I.6 Les différentes catégories de chaussée .....	5
I.7 Les dégradations des chaussées.....	8
I.8 Les granulats et mélanges routiers .....	11
I.8.1 Les granulats routiers .....	11
I.8.2 Caractéristiques géométriques des granulats routiers.....	12
I.9 Les matériaux utilisés dans les couches d'assise .....	13
I.9.1 Les graves non traités (NF P 98-129).....	13
I.9.2 Les graves et les sables traités aux liants hydrauliques.....	13
I.9.3 Les graves et les sables traités aux liants hydrocarbonés (ou liants noirs).....	14
I.9.4 Bétons de ciment (NF P 98-170).....	15
I.10 Conclusion.....	15
<b>Chapitre II : Recyclage et valorisation des déchets.....</b>	<b>16</b>
II.1 Introduction .....	16
II.2 Définition de recyclage .....	16
II.3 Les chiffres du recyclage dans le monde.....	17
II.4 Les types de recyclage.....	17
II.5 Les étapes du recyclage.....	18
II.6 Les avantages et les inconvénients du recyclage.....	18
II.6.1 Les avantages du recyclage .....	18
II.6.2 Les inconvénients notables du recyclage .....	19
II.7 Les matériaux recyclés .....	20
II.8 Le recyclage du verre .....	22
II.9 Origines du verre recyclé .....	23

II.10	Le cycle de recyclage de verre .....	23
II.11	Valorisation des matériaux recyclés en Génie Civil .....	24
II.11.1	Pneus usagés.....	24
II.11.2	Déchets des chantiers de BTP .....	25
II.11.3	Laitiers sidérurgiques .....	25
II.11.4	Les déchets plastiques .....	26
II.12	Utilisation de verre recyclé dans la construction routière .....	27
II.12.1	Utilisation des résidus de verre dans les enrobés bitumineux .....	27
II.12.2	Utilisation des résidus de verre dans la structure des chaussées .....	27
II.13	Autres utilisations envisageables.....	29
II.14	Conclusion.....	29
<b>Chapitre III : Identification des matériaux.....</b>		<b>30</b>
III.1	Introduction .....	30
III.2	Les matériaux à identifier.....	30
III.2.1	Le calcaire .....	30
III.2.1.1	Définition des roches calcaires.....	30
III.2.1.2	La formation des roches calcaire.....	30
III.2.1.3	Les origines des roches calcaires.....	32
III.2.1.4	L'utilisation des roches calcaires .....	32
<b>III.2.1.4.1</b>	<b>L'utilisation des roches calcaires dans la construction.....</b>	<b>32</b>
III.2.1.5	Les gisements de calcaire et la production des agrégats à Tizi-Ouzou .....	33
III.2.1.6	Localisation géographique du calcaire de la région de Tizi-Ouzou .....	33
III.2.1.7	Site d'extraction du calcaire étudiée.....	33
III.2.2	Le verre .....	35
III.2.2.1	L'histoire du verre .....	35
III.2.2.2	Définition du verre .....	35
III.2.2.3	La fabrication du verre .....	35
III.2.2.4	Les propriétés physiques des débris de verre en géotechnique .....	36
III.2.2.5	L'analyse chimique du verre .....	36
III.2.2.6	Origine du verre utilisé.....	37
III.3	Concassage et tamisage du calcaire.....	37
III.4	Essais d'identification .....	38
III.4.1	La teneur en eau naturelle (NF P94-050) .....	38
III.4.2	Les masses volumiques .....	39

III.4.2.1	La masse volumique sèche $\rho_d$ par pesée hydrostatique (NF P 94-064).....	39
III.4.2.2	La masse volumique humide.....	41
III.4.2.3	La masse volumique des particules solide $\rho_s$ (pycnomètre)(NF P 94 – 054)...	41
III.4.3	Indice des vides, degré de saturation Et porosité .....	42
III.4.4	Limites d'Atterberg (NF P94-051).....	43
III.5	Conclusion.....	45

## **Chapitre IV : Compactage des matériaux étudiés.....46**

IV.1	Introduction.....	46
IV.2	Définition du compactage .....	47
IV.3	Les objectifs du compactage .....	47
IV.4	Les engins de compactage.....	48
IV.4.1	Classement des engins.....	48
IV.4.1.1	Rouleaux à bandage lisse .....	48
IV.4.1.2	Rouleaux à pneu .....	48
IV.4.1.3	Rouleaux vibrants.....	48
IV.4.1.4	Rouleaux à pieds dameurs.....	49
IV.5	Les paramètres influençant le compactage.....	49
IV.5.1	Influence de la teneur en eau.....	50
IV.5.2	Influence de la nature du sol.....	50
IV.5.3	Influence de l'énergie de compactage .....	51
IV.6	Le compactage in situ .....	52
IV.6.1	Notion de planche d'essai .....	52
IV.6.2	.Influence de la vitesse de l'engin .....	52
IV.6.3	Influence du nombre de passes.....	53
IV.7	Contrôle de la compacité.....	53
IV.7.1	Densitomètre à membrane (NF P94-061-2) .....	53
IV.7.2	Gamma (Nucléo) densimètre (NF P98-241-1).....	53
IV.7.3	Le soildensity gauge (SDG) .....	54
IV.7.4	L'essai à la plaque NF P 94-117-1 .....	54
IV.8	Les essais de compactage au laboratoire.....	54
IV.8.1	Les essais Proctor (NF P 94-093).....	55
IV.8.1.1	L'essai Proctor normal .....	55
IV.8.1.2	L'essai Proctor modifié .....	55
IV.8.1.2.1	Principe de l'essai .....	56

---

IV.8.1.2.2	Matériels utilisés .....	57
IV.8.1.2.3	Exécution de l'essai .....	57
IV.8.1.2.4	Essais Proctor réalisés.....	58
IV.8.1.2.5	Expression des résultats .....	58
IV.9	Comparaison avec les études antérieures (Marne et Schiste + verre) .....	64
IV.10	Essai de portance Californien (California Béring Ratio ; CBR) (NF P 94-078) .....	66
IV.10.1	Définition .....	66
IV.10.2	But de l'essai .....	66
IV.10.3	Principe de l'essai.....	66
IV.10.4	Matériel utilisé.....	67
IV.10.5	Mode opératoire .....	68
IV.10.6	Expression des résultats .....	69
IV.10.7	Interprétation des résultats.....	71
IV.10.8	Comparaison entre le mélange étudié (calcaire+débris de verre) et les autres mélanges (schiste et marne) .....	72
IV.11	Conclusion.....	73
<b>Chapitre V : Essais routiers .....</b>		<b>74</b>
V.1	Introduction .....	74
V.2	Essai Micro Deval (NF P18-572) .....	74
V.2.1	Définition .....	74
V.2.2	But de l'essai .....	74
V.2.3	Principe de l'essai.....	75
V.2.4	Mode opératoire .....	75
V.2.5	Matériaux utilisés .....	76
V.2.6	Résultats et interprétation.....	76
V.2.7	Interprétation des résultats.....	77
V.3	Essai Los Angeles (NF P 18-573) .....	77
V.3.1	Définition .....	77
V.3.2	But de l'essai .....	77
V.3.3	Principe de l'essai.....	77
V.3.4	Mode opératoire .....	78
V.3.5	Matériaux utilisés .....	78
V.4	Essai de fragmentabilité (NF P 94-066) .....	81
V.4.1	Définition .....	81

V.4.2	Appareillage .....	81
V.4.3	Mode opératoire .....	81
V.4.4	Résultats des essais.....	82
V.4.5	Présentation graphique des résultats.....	83
V.4.6	Interprétation des résultats.....	84
V.5	Essai de dégradabilité (NF P 94-067).....	84
V.5.1	Appareillage .....	84
V.5.2	Mode opératoire .....	84
V.5.3	Résultats des essais.....	86
V.5.4	Présentation graphique des résultats.....	87
V.5.5	Interprétation des résultats.....	87
V.6	Conclusion.....	87

## **Chapitre VI : Résistance au cisaillement des matériaux .....88**

VI.1	Introduction.....	88
VI.2	Notion de résistance au cisaillement .....	88
VI.3	Principe de l'essai.....	89
VI.4	But de l'essai .....	89
VI.5	Les paramètres intrinsèques .....	90
VI.5.1	Paramètres $c$ et $\phi$ pour différents types de sols.....	90
	Cas des sols purement cohérents .....	91
	Cas des sols cohérents et frottants.....	92
VI.6	Type d'essais de cisaillement à la boîte (UU, CU, CD).....	93
VI.6.1	Essai non consolidé non drainé UU (Unconsolidated-Undrained).....	93
VI.6.2	Essai consolidé non drainé CU (Consolidated-Undrained).....	93
VI.7	Appareillage .....	93
	Description de la machine de cisaillement rectiligne : .....	94
VI.8	Préparation des échantillons.....	95
VI.9	Expression des résultats .....	95
VI.10	Présentation et discussion des résultats .....	96
VI.11	Comparaison entre le mélange étudié (calcaire + débris de verre) et les autres mélanges (schiste et marne) .....	100
VI.12	Conclusion.....	101

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES

Figure 1.I. Constitution d'une structure de chaussée type (LCPC, 1994).....	4
Figure 2.I. Profil en travers type d'une route (Joseph Abdo et al, 2009). ....	5
Figure 3.I. Structure type d'une chaussée souple. ....	6
Figure 4.I. Construction d'une chaussée en béton de ciment. ....	6
Figure 5.I. Constitution d'une chaussée à structure mixte. ....	7
Figure 6.I. Constitution d'une chaussée à structure semi-rigide. ....	7
Figure 7.I. Dégradation d'arrachement.....	9
Figure 8.I. Remonté des fines: dégradation franche, significative et étendue (LCPC ,1998). 9	
Figure 9.1. L'orniérage (LCPC, 1998). ....	10
Figure 10.I. Fissures dans une chaussée. ....	11

## CHAPITRE II : RECYCLAGE ET VALORISATION DES DECHETS

Figure 1.II. L'anneau de Moebius, logo officiel indiquant le caractère recyclable d'un produit.....	16
Figure 2.II. Le recyclage dans le monde. ....	17
Figure 3.II. Les types de recyclages. ....	18
Figure 4.II. Les différentes filières du recyclage.....	21
Figure 5.II. Bouteilles de verre jetées sur les bords de routes. ....	23
Figure 6.II. Cycle du recyclage du verre. ....	24
Figure 7.II. Pneus usagés.....	25
Figure 8.II. Déchets des chantiers de BTP. ....	25
Figure 9.II. Laitier d'aciérie de conversion. ....	26
Figure 10.II. Déchets en plastique ( www.emwelt.lu).....	26
Figure 11.II. Équipement nécessaire au broyage du verre. ....	28

## CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX

Figure 1.III. Les zones les plus favorables pour la formation du calcaire.....	31
Figure 2.III. Situation géographique du site de prélèvement des échantillons.....	34
Figure 3.III. Carrière d'extraction du Calcaire. ....	34

Figure 4.III. Débris de verres concassés.....	37
Figure 5.III. Fuseau granulométrique de matériaux routiers selon la norme NF EN 13-85(2010). .....	37
Figure 6.III. Matériau calcaire après concassage et tamisage. ....	38
Figure 7.III. Appareillage utilisée pour peser hydrostatique.....	40
Figure 8.III. Echantillons soumis à l'essai. ....	40
Figure 9.III. Plages des limites d'Atterberg. ....	43
Figure 10.III. Détermination de la limite de liquidité wl.....	44
Figure 11.III. Détermination de la limite de plasticité wp.....	44
<b>CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES</b>	
Figure 1.IV. Compactage.....	47
Figure 2.IV. Objectifs du compactage.....	47
Figure 3.IV. Rouleaux à bandage lisse. ....	48
Figure 4.IV. Courbe de compactage et Optimum Proctor.....	50
Figure 5.IV. Influence de la nature du sol. ....	51
Figure 6.IV. Influence de l'énergie de compactage.....	51
Figure 7.IV. Domaine d'emploi des principaux engins de compactage.....	52
Figure 8.IV. Différentes méthode pour mesurer la compacité. ....	54
Figure 9.IV. Matériels utilisés pour l'essai Proctor.....	57
Figure 10.IV. Exécution de l'essai Proctor. ....	58
Figure 11.IV. Courbe Proctor du calcaire seul. ....	59
Figure 12.IV. Courbe Proctor du calcaire+ 20% de verre.....	60
Figure 13.IV. Courbe Proctor du calcaire+30% verre.....	61
Figure 14.IV. Courbe Proctor du calcaire+50% de verre.....	62
Figure 15.IV. Courbe Proctor comparative de tous les échantillons. ....	62
Figure 16.IV. Évolution des teneurs en eau optimales en fonction du pourcentage de verre. 63	
Figure 17.IV. Évolution des masses volumiques sèches maximales en fonction du pourcentage de verre.....	64
Figure 18.VI. Teneurs en eau optimales des différents matériaux. ....	65
Figure 19.IV. Masses volumiques sèches des différents matériaux.....	65
Figure 20.IV. Confection de l'éprouvette pour essai CBR.....	67
Figure 21.IV. Presse CBR. ....	68
Figure 22.IV. Etape d'immersion, cas du CBRimm. ....	68

Figure 23.VI. Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immédiat.....	69
Figure 24.IV. Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immersion.....	69
Figure 25.IV. Évolution des indices CBR immédiat.....	70
Figure 26.IV. Courbes enfoncements-forces de l'essai CBR immersion.....	71
Figure 27.IV. Indice CBR immédiat et CBR immergé des différents mélanges.....	72
Figure 28.IV. Indice CBR immédiat et CBR immergé des différents matériaux.....	73

## **CHAPITRE V : ESSAIS ROUTIERS**

Figure 1.V. Appareillage Micro Deval.....	74
Figure 2.V. Résultats graphiques des essais Micro Deval.....	77
Figure 3.V. Résultats graphiques des essais Los-Angeles.....	79
Figure 4.V. Différentes étapes de l'essai de fragmentabilité.....	81
Figure 5.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire seul.....	82
Figure 6.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire + 50% de verre....	83
Figure 7.V. Coefficients de fragmentabilité des différents échantillons.....	83
Figure 8.V. Différentes étapes de l'essai de dégradabilité.....	85
Figure 9.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire seul.....	86
Figure 10.V. Courbes granulométriques avant et après essai du calcaire +50% de verre...	86
Figure 11.V. Coefficient de dégradabilité des différents échantillons.....	87

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

Figure 1.VI. Courbe de contraintes-déformations.....	88
Figure 2.VI. Droite intrinsèque (LCPC, 1987).....	89
Figure 3.VI. Courbe intrinsèque d'un sol pulvérulent.....	91
Figure 4.VI. Courbe intrinsèque d'un sol cohérent.....	92
Figure 5.VI. Courbe intrinsèque d'un sol cohérent et frottant.....	92
Figure 6.VI. Appareillage et accessoires d'un essai de cisaillement à la boîte.....	94
Figure 7.VI. Schéma de la machine de cisaillement rectiligne.....	94
Figure 8.VI. Courbes de contraintes-déformation (calcaire seul).....	96
Figure 9.VI. Courbes contraintes déformations (calcaire+50% de verre).....	96
Figure 10.VI. Courbes de variation du volume (calcaire seul).....	97
Figure 11.VI. Courbes de variation de volume (calcaire +50% de verre).....	97
Figure 12.VI. Droite intrinsèque (calcaire seul).....	98
Figure 13.VI. Droite intrinsèque (calcaire+50% de verre).....	98
Figure 14.VI. Cohésion des différents mélanges.....	99

Figure 15.VI. Angle de frottement interne des différents mélanges. ....	99
Figure 16.VI. Cohésion des différents matériaux.....	100
Figure 17.VI. Angle de frottement des différents matériaux.....	100

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES CHAUSSEES

Tableau 1.I. Familles de structures de chaussées. ....	8
--	---

## CHAPITRE II : RECYCLAGE ET VALORISATION DES DECHETS

Tableau 1.II. Quantité recyclée des emballages (verre, plastique, aluminium).....	22
---	----

## CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX

Tableau 1.III. L'analyse chimique des débris du verre (Dyer et Dhir, 2001). ....	36
Tableau 2.III. Détermination de la teneur en eau. ....	38
Tableau 3.III. Résultats de la détermination de la masse volumique sèche. ....	40
Tableau 4.III. Classification de la densité en fonction de la masse volumique sèche (NF P 94-064). ....	41
Tableau 5.III. Résultats de la masse volumique des particules solides .....	42
Tableau 6.III. Détermination du degré de saturation. (D'après TERZAGHI) .....	43

## CHAPITRE IV : COMPACTAGE ET PORTANCE DES MATERIAUX ETUDIES

Tableau 1.IV. Modalités d'exécution des essais Proctor normal et modifié (NF P 94-093,1999) .....	56
Tableau 2.IV. Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire seul.....	59
Tableau 3.IV. Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire+ 20% du verre. ....	60
Tableau 4.IV. Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 30% du verre. ....	61
Tableau 5-IV: Résultats de l'essai Proctor du matériau calcaire + 50% du verre. ....	61
Tableau 6.IV. Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales.....	63
Tableau 7.IV. Tableau comparatif des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales des différents matériaux. ....	64
Tableau 8.IV. Résultats d'essai CBR pour le calcaire + débris de verre. ....	70
Tableau 9.IV. Les classes de portance des sols (CEBTP, 1984). ....	71
Tableau 10.IV. Tableau comparatif des indices CBR avant/après immersion des mélanges étudiés et des autres mélanges .....	72

## CHAPITRE V : ESSAIS ROUTIERS

Tableau 1.V. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire (NF P18-572, 1990)	75
Tableau 2.V. Appréciation des résultats de l'essai Micro Deval (NF P18-572, 1990). ....	76
Tableau 3.V. Calcul du coefficient Micro Deval.....	76
Tableau 4.V. Calcul du coefficient Micro Deval.....	76

Tableau 5.V. Charge de boulet suivant le type de classe granulaire (NF P18-572, 1990)..	78
Tableau 6.V. Calcul du coefficient Los-Angeles (calcaire seul).....	78
Tableau 7.V. Calcul du coefficient Los-Angeles (calcaire+ 50% de verre).....	79
Tableau 8.V. Appréciation des résultats de l'essai Los Angeles (NF P18-572, 1990) .....	79
Tableau 9.V. Coefficients LA et MDE pour les différents échantillons. ....	79
Tableau 10.V. Catégories des granulats selon la résistance aux chocs et à l'usure (Moron,BRGM).....	80
Tableau 11.V. Coefficients LA et MDE des différents matériaux.....	81
Tableau 12.V. Valeurs de références NF P 94-066. ....	82
Tableau 13.V. Classification des matériaux rocheux selon le coefficient DG NF P 94-067	85

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

Tableau 1.VI. Résultats moyens de résistance au cisaillement. (Atlan, 1978).....	101
--	-----