

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET

---



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES  
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :

MESTOUR Abdehafid

TAIBI Younes Ridha

*Sujet du mémoire*

Influence de la forme des particules de verre recyclé sur la portance des matériaux  
granulaires de chaussée

*Soutenu publiquement le 02/07/2022 devant le jury composé de :*

M<sup>lle</sup> RENNAK Zohra

Président

M. BEKKI Hadj

Rapporteur

M<sup>me</sup> DRAOUI Aicha

Examineur

M. SERBAH Boumediene

Examineur

**PROMOTION : 2021/2022**

## *Remerciements*

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le clément et le miséricordieux, de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail.

Je remercie également ma chère famille qui était mon bras de force.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur BEKKI Hadj, Maître de conférences, pour ses conseils judicieux, pour ses qualités scientifiques et humaines, pour la disponibilité dont il a toujours fait preuve à mon égard, et pour m'avoir fait profiter de son expérience dans le domaine.

J'adresse mes plus vifs remerciements à M<sup>elle</sup> RENNAK qui m'a honoré d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je tiens également à remercier Monsieur SERBAH et M<sup>me</sup> DRAOUI pour avoir accepté de juger ce travail.

## Résumé

L'exploitation de nouvelles sources de granulats et la recherche de nouveaux matériaux naturels tels que les carrières, pose un véritable problème d'amenuisement des sources qui influence l'approvisionnement des projets dans l'avenir, notamment les projets routiers. Le recyclage du déchet en général et particulièrement le recyclage de verre représente une solution alternative très intéressante pour ce défi d'une part, et une contribution pour l'économie et la protection de l'environnement du pays d'autre part.

Cette étude expérimentale s'inscrit dans ce contexte, elle a pour objectifs, l'exploitation et la valorisation des déchets de verre recyclés dans le domaine des travaux publics, particulièrement, dans les corps de chaussées.

Les résultats obtenus à l'issue des essais réalisés sur des échantillons formés à base de mélanges du débris de verre avec la GNT permettent de confirmer la valorisation des déchets de verre dans les couches granulaires de chaussée. En effet, il a été trouvé que la substitution de la partie sableuse de la GNT à travers les deux fractions 0.63/2 mm et 2/3.15 mm par des particules de verre de forme arrondie à une proportion de 20% du mélange donne des bons résultats en terme de portance, à condition que le compactage soit intense, soit 56 coups par couche. Ce même pourcentage offre une bonne perméabilité du mélange par rapport à la GNT de référence. On peut aussi conclure que les particules de verre de forme arrondie donnent des performances mécaniques et de drainages meilleurs par rapport à celles de forme angulaire.

**Mots-clés** : Chaussée routière, Grave non traité (GNT), Recyclage de verre, Forme des grains, CBR, Perméabilité.

## Abstract

The exploitation of new sources of aggregates and the search for new natural materials such as quarries, presents a real problem of dwindling sources which influences the supply of projects in the future, in particular road projects. The recycling of waste in general and particularly the recycling of glass represents a very interesting alternative solution for this challenge on the one hand, and a contribution for the economy and the protection of the environment on the other hand.

This experimental study is part of this context; its objectives are the exploitation and recovery of recycled glass waste in the field of public works, particularly in road construction.

The obtained results at the end of the tests carried out on samples formed by mixtures of crushed glass with GNT make it possible to confirm the recovery of glass waste in the granular pavement layers. Indeed, it has been found that the substitution of the sandy part of the GNT through the two fractions 0.63/2 mm and 2/3.15 mm by rounded glass particles at a proportion of 20% of the mixture gives good results in terms of bearing capacity, provided that the compaction is intense, i.e. 56 blows per layer. This same percentage offers a good permeability of the mixture compared to the reference material. It can also be concluded that rounded-shaped glass particles give better mechanical and drainage performances compared to angular-shaped ones.

**Keywords:** Road pavement, Untreated Gravel (GNT), Glass recycling, grains shape, permeability.

## ملخص

ان اعادة تدوير النفايات تمثل أولوية استراتيجية خاصة للدول النامية في ضل المشاكل التي اصبحت تشكلها هذه الظاهرة و ذلك باستحداث مناهج و حلول فعالة تشمل بعدين أساسيين متمثلين في حماية البيئة و المحيط من جهة و التسيير العقلاني للموارد الطبيعية من جهة اخرى .

لذلك فإن هذا العمل التجريبي يمثل حلا فعالا للاستغلال الامثل للنفايات و خاصة حبيبات الزجاج القابلة للرسكلة في الطبقات المشكلة للطريق ، و لقد تبين لنا من خلال التجارب التي اجريه وفق معايير جزائرية فرنسية ان الخليط المتكون من حبيبات الزجاج مع الحصى الغير معالج انه يمكن استغلال بقايا قطع الزجاج في الطبقات المشكلة للطريق.

ان تعويض الاجزاء الرملية للحصى الغير معالج المتمثلة في ([2\0.63], [3.15\2]) مم بحبيبات الزجاج ذات الشكل الشبه دائري من نفس القسم بنسبة 20% تعطي نتائج جيدة من جانب قدرة التحمل ، بشرط ان تكون بشكل مكثف ، اي 56 ضربة لكل طبقة ، كما ان هذه نسبة المقدره ب 20% من الخليط تقدم نفاذية جيدة للماء بالمقارنة مع الحصى الغير معالج المرجعي.

و في الاخير نستنتج ان حبيبات الزجاج ذات الشكل الشبه دائري تقدم مردود افضل بالمقارنة مع الحبيبات ذات الشكل الشبه محدب.

**كلمات مفتاحية:** الزجاج القابل للرسكلة ، الحصى غير المعالج، قدرة تحمل، الطبقات المشكلة للطريق.

# SOMMAIRE

Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Liste des principales notations et indices.	
INTRODUCTION GENERAL.....	01

## Chapitre I: Structures de chaussées

1.1 Introduction .....	04
I.2 Définition de la chaussée .....	04
I.3.LES PRINCIPALES COUCHES D'UNE CHAUSSEE.....	04
I.3.1.Le sol support.....	06
I.3.2.La Couche de forme.....	06
I.3.3. Les couche d'assise.....	06
I.3.3.1.Couche de fondation .....	06
I.3.3.2.Couche de base.....	06
I.3.4. La couche de surface.....	06
I.3.4.1. La couche de roulement .....	07
I.3.4.2. La couche de liaison.....	07
I.5 Les différentes catégories de chaussée .....	08
I. 5.1 Les chaussées classiques : chaussées souples et chaussées rigides.....	08
I.5.1.1 Les chaussées souples .....	08
I .5.1.2. Les chaussées rigides.....	08
1.5.2.Les chaussées inverses : chaussées à structure mixte et chaussées semi-rigides.....	09
I .5.2.1 Les chaussées à structure mixte.....	09
I.5.2.2 Les chaussées semi-rigides.....	10
I.6 Conclusion .....	10

## Chapitre II : valorisation des déchets

II .1Introduction.....	11
II .2Définition.....	11
II .3 Les classement des déchets.....	12
II .3.1. Introduction.....	12

II .3.2 Déchets dangereux.....	13
II .3.2.1 Déchets dangereux des ménages (DDM) .....	13
II .3.2.2 Déchets industriels spéciaux (DIS).....	13
II .3.2.3 Déchets radioactifs.....	13
II .3.3 Déchets non dangereux.....	13
II .3.3.1 Déchets industriels banals .....	13
II .3.3.2 Déchets inertes et du BTP (Bâtiments et Travaux Publics) .....	14
II .3.3.3 Déchets ménagers et assimilés .....	14
II .4 Pourquoi la valorisation .....	15
II .4.1 Les filières et les stratégies de valorisation.....	15
II .5 Les avantages et les inconvénients du recyclage du déchet .....	17
II .5.1 Les avantages.....	17
II .5.2 Les inconvénients .....	17
II.6 Politique nationale d'exploitation de déchet .....	18
II.7 Conclusion.....	22

### **Chapitre III : recyclage de verre**

III.1 Introduction .....	23
III.2 Définition du verre .....	23
III.3 Historique de verre.....	24
III.4 Composition chimique de verre.....	24
III.5 Caractéristique physique.....	25
III.6 Le recyclage du verre.....	25
III.7 Domaine d'utilisation du granulat pour le verre recycle .....	28
III.7.1 Utilisation dans la technique routière.....	28
III.7.1.1 Utilisation des résidus de verre dans la structure des chaussées...	28
III.7.1.2 Utilisation des résidus de verre dans les enrobés bitumineux.....	29
III.8. Disponibilité du verre a recyclé en Algérie.....	29
III.9 Conclusions.....	30

### **Chapitre IV: identification des matériaux**

IV.1 Introduction .....	32
IV.1.2 Essais d'identification des matériaux utilisés .....	32
IV.1.2.1. L'essai caractéristique de la fabrication	34
IV.1.2.1.1. Analyse granulométrique (NA 2607) .....	34
IV.1.2.1.2. Les fuseaux granulométriques (NA 2607) .....	36
IV.1.2.1.3. Le coefficient d'aplatissement (NA 256/1990).....	37

IV.1.2.1.4.L'équivalent de sable à 10% (NFP 18-597) .....	38
IV.1.2.1.5.Propreté superficielle (NA 18-591) .....	39
IV.1.2.2. L'essai caractéristique de la propriété intrinsèque (NA 255-1990)..	39
IV.1.2.2.1.Masse volumique apparente .....	39
IV.1.2.2.2. Masse volumique absolue .....	39
IV.1.2.3.Résistance à l'usure et aux chocs .....	40
IV.1.2.3.1.Essai los Angeles (NA 458/1990) .....	40
IV.1.2.3.2.Essaie micro-Deval (NA 457/1990).....	41
IV.1.2.4.L'essai chimique .....	41
IV.1.2.4.1 Essai de bleu méthylène (P 18.592).....	41
IV.1.2.4.2Taux de carbonates (NA-2789) .....	43
IV.2 Récapitulation des résultats des Essais d'identification des matériaux utilisés .....	44
IV.2.1 Matériau GNT .....	44
IV.2.2 Matériau Verre .....	45

### **Chapitre V : les essais de portance et de perméabilité**

V.1 Introduction .....	46
V.2 Définition du compactage.....	47
V.3 Rôle du compactage sur la durée de vie des ouvrages.....	48
V.4 Effet de compactage sur la perméabilité .....	48
V.5 Essais de portance et de perméabilité .....	49
V.5.1 Essai Proctor (NF P 94-093) .....	49
V.5.2 Expression des résultats des essais Proctor.....	52
V.5.3 Essais CBR.....	63
V.5.4 Essais de perméabilité (NF x30-442) .....	67
A- Exécution de l'essai .....	68
B- Expression des résultats .....	71
V.5.5 Analyse granulométrie après compactage .....	72
V.6 Conclusion .....	74



## **Liste des figures :**

### **Chapitre I**

Fig. I.1 : Profil en travers type d'une route (Joseph Abdo et al, 2009).

Fig. I.2 : Constitution d'une structure de chaussée type (LCPC, 1994).

Fig. I.3. Les éléments géométriques d'une chaussée

Figure I.4. Les couches d'une chaussée souple.

Figure I.5 : Construction d'une chaussée en béton de ciment.

Figure I .6 : Les couches d'une chaussée à structure mixte.

### **Chapitre II**

Figure II.1 : Circuit de production- génération de déchet (BOUZIDI, 2020)

Figure II.2 : la Classification des déchets .

Figure II.3 : Catégories-déchets-dangereux.

Figure II.4 : des déchets nucléaires

Figure II.5 : Déchets chantier BTP.

Figure II.6 : Déchets ménagers et assimilés.

Figure II.7 : Valorisation organique sur les sols

Figure II.8 : Plastique recyclé

Figure II.9 : l'incinération du déchet

### **Chapitre III**

Figure III.1 : Processus de recyclage de verre.

## **Chapitre IV**

Figure IV.1 : Echantillons de GNT de la carrière de l'entreprise Fillali (Rechaiga)

Figure IV.1 : Broyage des déchets de verre : (a) avec l'appareil Los Angeles ; (b) concasseur de laboratoire

Figure IV.2 : Particules de verre après broyage : (b) Forme Arrondie ; (a) Forme angulaire

Figure IV.3 : série de tamis pour l'analyse granulométrique des matériaux utilisés

Figure IV.4 : Courbe et fuseaux granulométriques de GNT utilisée.

Figure IV.6 : grille à fente pour déterminer le coefficient d'aplatissement

*Figure IV.7 : balance hydrostatique.*

Figure IV.8 : Appareillage utilisé pour l'essai de la valeur au bleu de méthylène

## **Chapitre V**

Figure V.1 : préparation du mélange (GNT+ verre) pour les deux formes angulaire et arrondie.

Figure V.2: Le compactage de couches d'assise de chaussée avec un compacteur cylindrique et pneumatique.

Figure V.3 : influence de compactage sur les grains de sol.

Figure V.4: Matériel utilisés pour l'essai Proctor.

Figure V.5: courbe Proctor modifié de la GNT de référence.

Figure V.6: courbe Proctor modifié de la GNT + 10% de verre de forme arrondie.

Figure V.7: courbe Proctor modifié de la GNT + 20% de verre de forme arrondie.

Figure V.8: courbe Proctor modifié de la GNT + 30% de verre de forme arrondie.

Figure V.9 : Courbes Proctor Modifié des différents mélanges de GNT + verre de forme arrondie.

Figure V.10: courbe Proctor modifié de la GNT + 10% de verre de forme angulaire

Figure V.11: courbe Proctor modifié de la GNT + 20% de verre de forme angulaire

Figure V.12: courbe Proctor modifié de la GNT + 30% de verre de forme angulaire

Figure V.13: Courbes Proctor Modifié des différents mélanges de GNT + verre de forme angulaire

Figure V.14 : Evolution des densités sèches en fonction du pourcentage de verre.

Figure V.15 : Évolution des teneurs en eau optimales en fonction du pourcentage de verre.

Figure V.16 : Dispositif expérimental pour l'essai CBR<sub>imbb</sub>

Figure V.17: Valeurs CBR à 56 c/c pour les différents mélanges.

Figure V.18: Valeurs CBR à 10 c/c pour les différents mélanges.

Figure V.19 : le moule du perméamètre.

Figure V.20 : l'exécution et l'appareillage d'essai de perméabilité.

Figure V.21 : Coefficient de perméabilité K pour les différents mélanges

Figure V.22 : l'analyse granulométrique des échantillons utilisés après compactage d'un moule Proctor Modifié

Figure V.23: Courbes granulométriques des Mélanges (GNT + particules de verre arrondie et angulaire) après compactage dans le moule Proctor Modifié

# Liste des Tableaux

## Chapitre II

Tableau II.1 : Volume des déchets produits annuellement en Algérie (Benabdeli, 2020)

Tableau II.2 : Typologie des déchets domestiques valorisables (Benabdeli, 2020)

## Chapitre III

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

Tableau III.2: Quantité recyclé de verre. (<http://www.bafu.admin.ch/>,2019)

Tableau III.3 : quantité de verre valorisé et les type de verre reproduit par des entreprises locales.

## Chapitre IV

Tableau IV.1: Coefficient d'aplatissement global de chaque granulat élémentaire

Tableau IV.2: les mesures de H1 et H2 pour les deux prélèvements de GNT.

Tableau IV.3 : Résultat de l'essai de valeur au bleu de méthylène

Tableau IV.4: Résultat de l'essai de taux de carbonates

Tableau IV.5 : Tableau Récapitulatif des résultats des Essais d'identification de la GNT

Tableau IV.6 : Tableau Récapitulatif des résultats des Essais d'identification du verre broyé

## Chapitre V

Tableau V.1 : Résultat de l'essai Proctor modifié sur la GNT

Tableau V.2: GNT + 10% de verre (2/3.15)

Tableau V.3 : GNT + 20% de verre [(2/3.15) ;(0.63/2)].

Tableau V.4 : GNT + 30% de verre [(2/3.15) ;(0.63/2) ;(0.08/0.63)].

Tableau V.5: GNT + 10% de verre (2/3.15)

Tableau V.6 : GNT + 20% de verre [(2/3.15mm) ;(0.63/2mm)].

Tableau V.7: GNT + 30% de verre [(2/3.15mm) ;(0.63/2mm) ;(0.08/0.63mm)].

Tableau V.8: Évolution des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales en fonction du pourcentage du verre

Tableau V.9 : Résultats de l'essai de CBR 56 C/C et 10 C/C.

Tableau V.10: Résultats de l'essai de perméabilité **K** à charge variable

## Liste des principales notations et indices

W : Teneur en eau naturelle (%) ;

Wopt : la teneur en eau de l'optimum Proctor (%)

Mh : Masse humide (g);

H : hauteur initiale de l'éprouvette (mm) ;

CBRimm : l'indice CBR après immersion(%) ;

$\gamma_d$  : masse volumique sèche de l'échantillon (g/cm<sup>3</sup>) ;

$\gamma_w$  : masse volumique humide de l'échantillon (g/cm<sup>3</sup>) ;

$\gamma_d$  max : la densité sèche maximale

La : force de cisaillement (dan) ;

$\gamma_{dopt}$  : masse volumique sèche de l'optimum Proctor (g/cm<sup>3</sup>).

CBR : California Bearing Ratio

GNT : grave non traité

GB : Grave traitée au liant Hydrocarboné

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

K : coefficient de perméabilité

S : section d'échantillon.

L : Hauteur de l'échantillon.

Q: volume recueilli pendant un temps

H: charge hydraulique

t : temps nécessaires pour la charge passe

a : section de tube

s : section d'échantillon.

$h_1$  : charge hydraulique initiale.

$h_2$  : charge hydraulique final.

$M_e$  : Masse du passant de la grille à fentes correspondante au granulat élémentaire.

$M_g$  : Masse de chaque granulat élémentaire.

$A_i$  : Le coefficient d'aplatissement

C.A : Le coefficient d'aplatissement global

$M_1$  : Somme des masses des granulats élémentaires

$M_2$  : Somme des masses de passants sur les grilles

H : hauteur

ES : équivalons de sable

P : Propreté superficielle

M : la masse

$M_1$  : la masse du récipient

$M_2$  : la masse de l'échantillon et le récipient

V : volume

MVA : Masse volumique apparente

$\rho$  : Masse volumique absolue

LA : Essai los Angeles

MDE : Essaie micro-Deval

VB : Essai de bleu méthylène

## INTRODUCTION GENERALE

### *Introduction générale*

La durabilité, qui a suscité un fort intérêt pour le développement ces dernières années dans le monde, il est certainement lié à la construction en particulier dans les travaux routiers.

Cependant, la réalisation de ces travaux nécessite beaucoup et tant de granulats que la carrière est encore parfois incapable de répondre aux besoins nationaux. Dans la construction, la demande augmente de plus de 17 millions de tonnes de sable et de gravier. Ce nombre est certainement, fondamentalement obsolète dans les travaux publics.

La chaussée est une structure composée de couches empilées de matériaux granulaires traités et non traités.

Aujourd'hui, la communauté "route" s'engage à réaliser une bonne adhérence inter-faciale de la couche de chaussée pour assurer l'intégrité de la chaussée, car la structure de la chaussée se poursuit tout au long de son cycle de vie et après les travaux de restauration et de renforcement. Atteindre ces objectifs nécessite une sélection rigoureuse des matériaux utilisés en vue de respecter le fameux rapport qualité/prix.

Dans le monde entier, le secteur de TP consomme de plus en plus de matériaux ; à titre d'exemple, en France et Selon l'UNICM (étude réalisée par l'Union Nationale de l'Industrie en 2000 sur les carrières et matériaux de construction), 200 millions de tonnes de granulats naturels sont utilisés par l'industrie routière en France chaque année, en croissance de 4% par an. Les ressources naturelles diminuent tandis que la demande augmente. C'est ainsi que nous sommes, face à une situation de surexploitation dans les carrières, qui entraîne de réels problèmes environnementaux.

Plusieurs matériaux tels que les débris de béton, les mâchefers, les débris de verre, ont fait l'objet du recyclage dans les pays développés notamment, dans le domaine du génie civil. Notre projet s'inscrit dans ce contexte, il s'intéresse particulièrement au recyclage des débris de verre, en vue de leur utilisation dans le domaine routier.

La valorisation locale du verre s'inscrit dans un schéma de développement durable. Elle présente plusieurs enjeux, à commencer par la suppression des différents déchets mis en décharge et des coûts y afférents, la réduction des inconvénients associés au verre (tessons, incendies de décharge), le développement de nouvelles filières économiques sur le territoire et l'économie de matière première (carrières de grave).

## INTRODUCTION GENERALE

Cette valorisation permet de :

- Répondre aux normes environnementales visant à éliminer ou au moins limiter les décharges et les coûts qui lui sont associés;
- Préserver les ressources naturels ;
- Encourager l'utilisation des matériaux recyclés.

Ce mémoire cherche à mettre en évidence, la possibilité d'utiliser les débris de verre industriel, de forme arrondie et angulaire, comme granulats pour les corps de chaussées (couches de fondation). Ceci est fait à base de mélanges de granulats routiers naturels à différentes proportions de verre (0 à 20 %).

Dans ce travail, les mélanges (Grave concassée + verre) préparés sont soumis après identification aux principaux essais mécaniques routiers, à savoir : les essais de compactage au Proctor modifié, les essais de portance avant et après immersion à la presse CBR.

Les résultats obtenus sur les différents mélanges, sont après comparés pour mettre en évidence l'intérêt d'ajout de verre aux matériaux granulaires, d'une part et de voir l'influence de la forme des particules de verre sur la portance et la perméabilité des couches de chaussées.

Le présent mémoire est structuré en cinq chapitres, récapitulés par des conclusions et quelques perspectives.

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

Le deuxième chapitre, définit essentiellement le recyclage des déchets d'une façon générale. Il est focalisé principalement sur le recyclage des déchets.

Le chapitre trois est consacré aux déchets de verre et leurs domaines de recyclage. On s'intéressera particulièrement au verre (les travaux réalisés sur le recyclage de verre et les domaines d'utilisation).



## **INTRODUCTION GENERALE**

Le quatrième chapitre entame la partie expérimentale de ce travail. Il est consacré aux différents essais d'identification sur les matériaux utilisés (granulats naturels routiers et débris de verre industriel), afin de déterminer leurs caractéristiques physiques. Une interprétation des résultats des essais est également donnée à la fin de ce chapitre.

Le cinquième chapitre comporte les essais mécaniques (les essais de compactage Proctor et des essais de portance CBR après immersion). Ces essais permettent d'évaluer l'aptitude des mélanges étudiés au compactage, ainsi que leur portance sous la circulation des engins 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. Il sera présenté, à la fin du chapitre, les essais de perméabilité réalisés sur les différents mélanges de GNT et de verre de différentes formes.

Enfin, le présent mémoire sera terminé par des conclusions générales dans laquelle nous avons synthétisé les principaux résultats de cette étude et donner des perspectives pour de futures recherches.

## Chapitre I: Structures des chaussées

### I.1 Introduction :

L'histoire de la rue est sans aucun doute liée au développement de l'humanité et de la civilisation. Le réveil de la route au tout début de XXème siècle, a suivi directement le développement de l'automobile.

Les romains construisaient les chaussées, pour la circulation impériale, avec un objectif essentiellement militaire, celui de permettre un déplacement rapide des légions en différents points de l'empire, et cela quelles que soient les conditions météorologiques. Les chaussées de cette époque constituaient les dallages d'une superposition de couches d'épaisseurs différentes, Cette superposition a été transmise aux chaussées actuelles qui présentent une structure multicouche surmontant un ensemble appelé plate-forme support de chaussée.

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 composée de trois parties, chaque partie ayant un rôle bien défini.

La chaussée a été définie par Coquand en 1978 comme faisant partie de la rue de communication liée à la circulation des véhicules. Les voies sont essentiellement conçues pour résister aux effets mécaniques du véhicule et les transmettre au terrain, la fondation qui ne provoque pas de déformation permanente au sol ou sur la route elle-même. Cette partie nous intéresse particulièrement dans ce chapitre (Coquand, 1978).

La figure I.1, permet de montrer globalement le profil en travers type d'une route :

### I.3.LES PRINCIPALES COUCHES D'UNE CHAUSSEE

Une chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini dont les épaisseurs doivent être suffisantes de manière à supporter sans dégradation la pression verticale transmise au sol (Chebrek D. 2012).

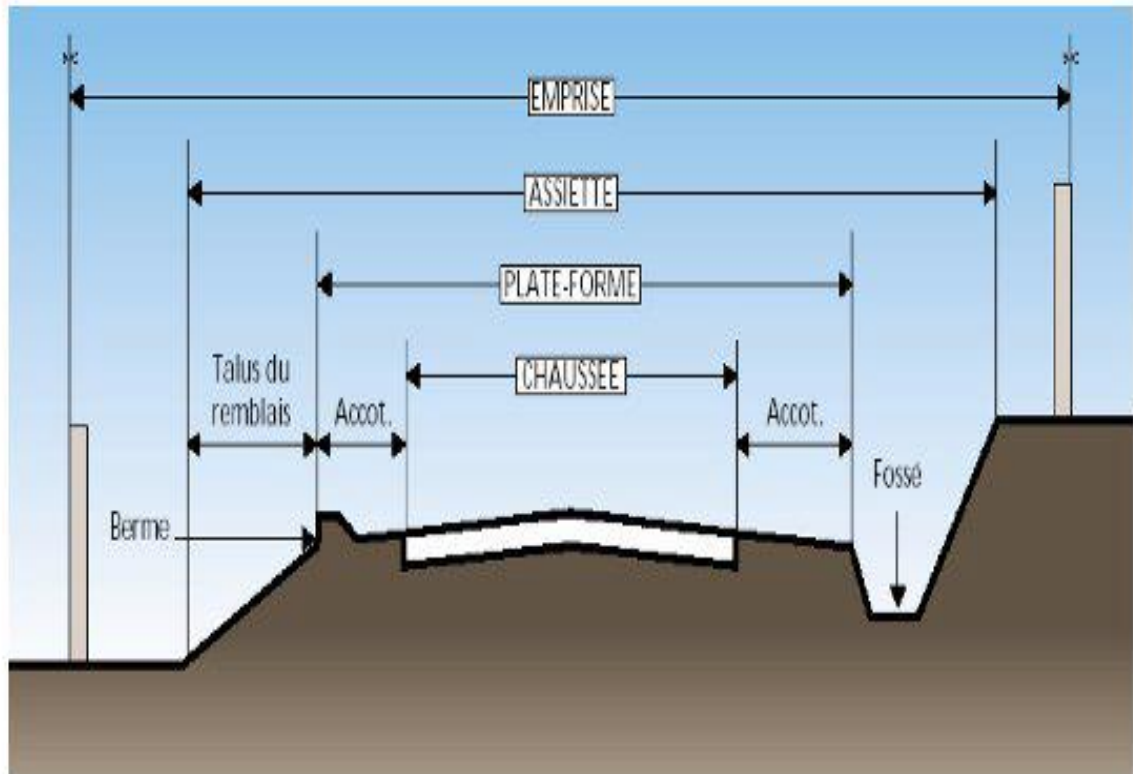


Fig. I.1 : Profil en travers type d'une route (Joseph Abdo et al, 2009).

En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol (Fig. I.2) :

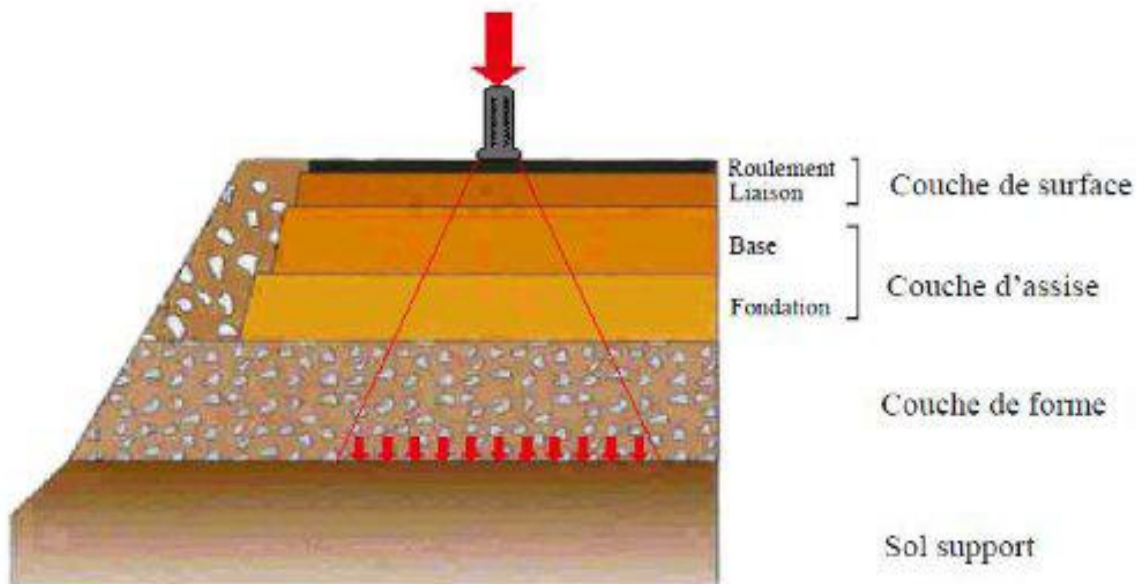


Fig. I.2 : Constitution d'une structure de chaussée type (LCPC, 1994).

**I.3.1. Le sol support :**

Il est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plateforme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de la chaussée.

**I.3.2. La Couche de forme**

La couche de forme est un élément de transition qu'on introduit entre le sol support et les couches de sol afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol.

Cette couche, ne fait pas partie intégrante de la chaussée, elle peut constituer soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Elle a plusieurs fonctions :

- Lors des travaux, elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier.
- Elle permet de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol terrassé et de protéger ce dernier du gel.

**1.3.3. Les couche d'assise :** Elles se composent de deux sous-couches : la couche de fondation, surmontée de la couche de base.

**I.3.3.1. Couche de fondation :**

Elle est constituée, généralement, de Grave Non Traitée (GNT) de classe 0/25 mm ou 0/31,5 mm.

Elle répartit les pressions sur le support, afin de limiter les déformations.

**I.3.3.2. Couche de base :**

Dans le cas d'une chaussée souple, elle est constituée de Grave traitée au liant Hydrocarboné (GB). Cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle les pressions élevées s'atténuent avant d'être transmise à la couche de fondation.

**1.3.4. La couche de surface :**

A son tour la couche de surface a généralement une structure bicouche:

### 1.3.4. 1. La couche de roulement :

C'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. On lui exige des qualités d'usage précises à savoir : une forte adhérence, une bonne drainabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules. Selon les besoins, on utilise soit la technique des enrobés épais, soit celle des enrobés minces ou bien celle des enrobés très minces voire ultraminces.

### 1.3.4.2. La couche de liaison :

L'apport structurel de cette couche est secondaire (sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée), elle est tributaire de la pérennité de la chaussée.

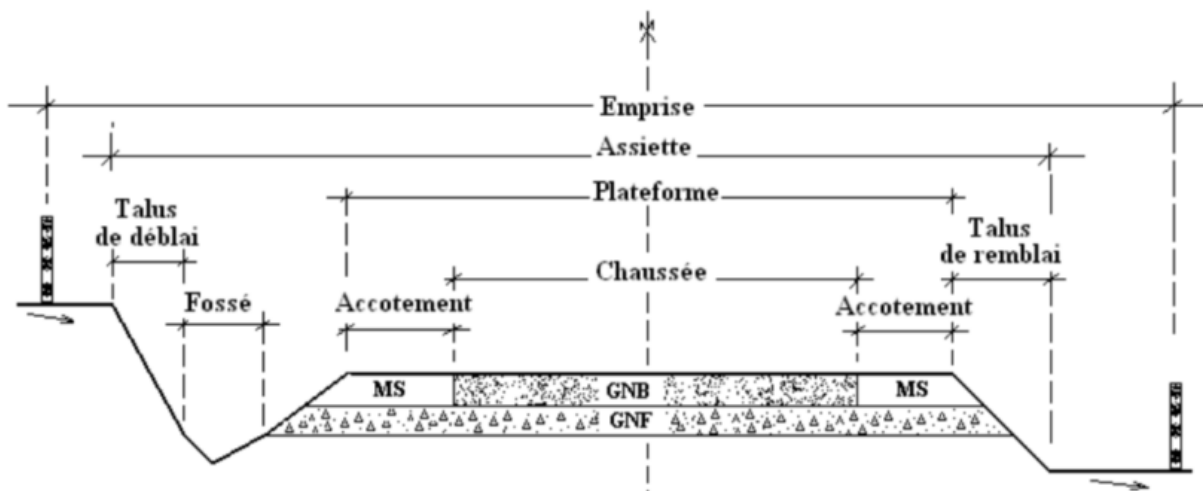


Fig. I.3. Les éléments géométriques d'une chaussée

- ✓ **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.

La chaussée 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.

### I.5 Les différentes catégories de chaussée :

D'après Gidel en 2001, Il existe deux catégories de chaussée : les chaussées classiques et les chaussées inverses et qui sont toutes les deux divisées en plusieurs types :

#### I. 5.1 Les chaussées classiques : chaussées souples et chaussées rigides.

##### I.5.1.1 Les chaussées souples :

Principalement utilisées pour la réalisation des routes secondaires peu empruntées par les poids lourds (moins de 200 poids lourds par jour).

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), 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.

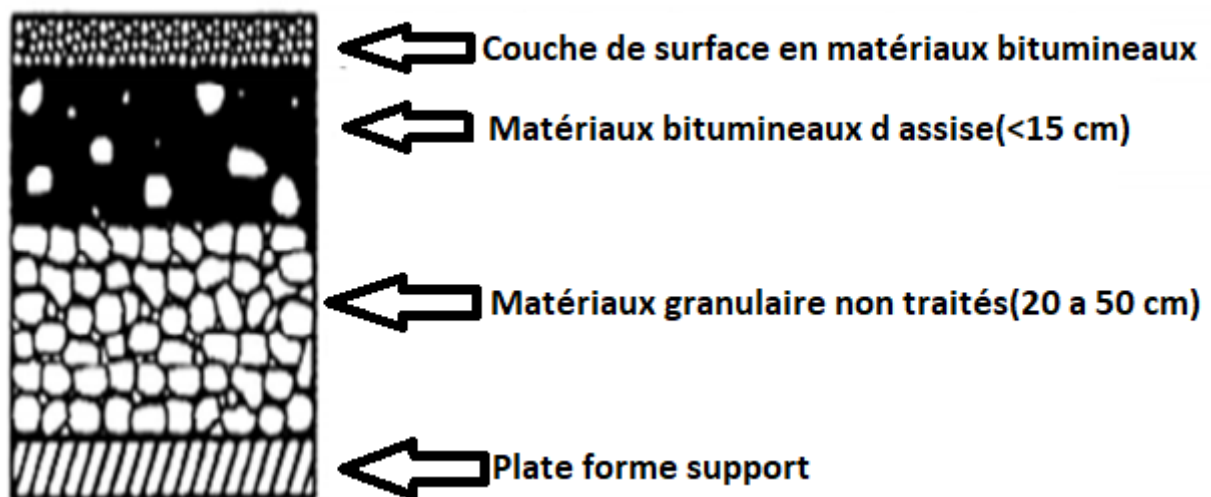


Figure I.4. Les couches d'une chaussée souple.

##### I .5.1.2. 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 I.4. Les couches d'une chaussée souple.

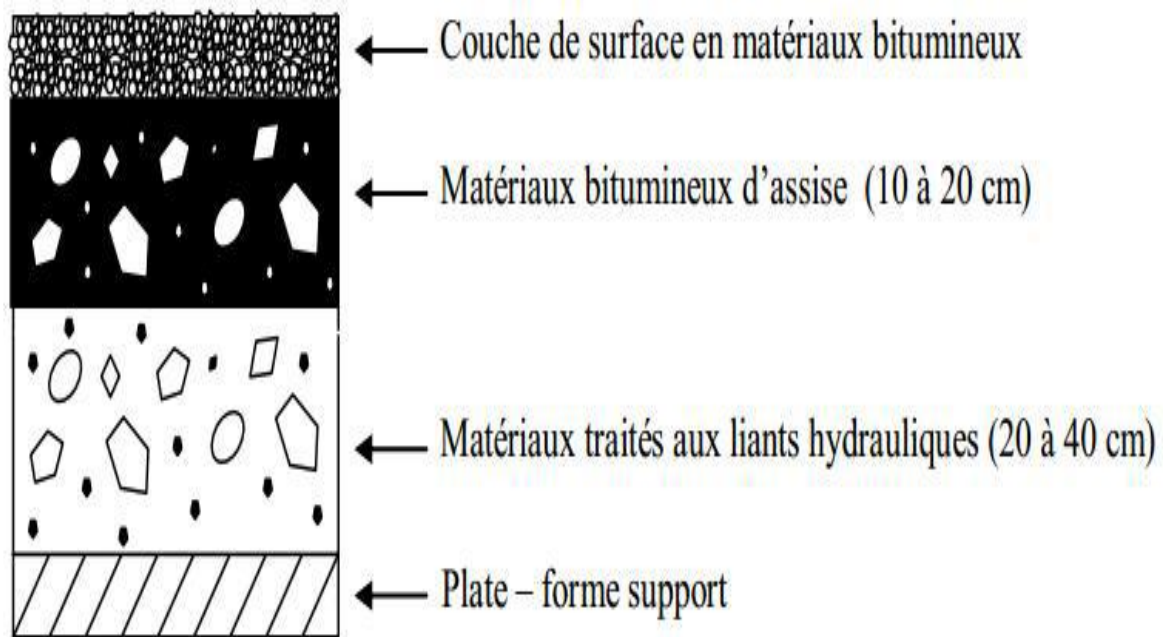


Figure I.5. Construction d'une chaussée en béton de ciment.

## 1.5.2- Les chaussées inverses : chaussées à structure mixte et chaussées semi-rigides.

### I .5.2.1 Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base:10 à 20cm) sur un couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de  $\frac{1}{2}$ .



FigureI.6.Les couches d'une chaussée à structure mixte.

### I.5.2.2 Les chaussées semi-rigides.

Ces chaussées conviennent à des trafics plus conséquents. Par leur nature et leur épaisseur, elles se déforment moins que les chaussées souples ; dont les matériaux d'assise sont traités avec un liant hydraulique (ciment, laitier, cendre Volante) ou un liant hydrocarboné (émulsion de bitume)

### I.6. Conclusion

À cette revue bibliographique sur les structures de chaussées, il s'avère que chaque couche a son importance pour avoir une route résistante et durable, ceci implique l'utilisation de bons matériaux et en grande quantité, d'où la nécessité à utiliser des matériaux recyclés. Dans le chapitre suivant seront présentés les matériaux recyclés dans cette étude, notamment les déchets de verre.



## Chapitre II : valorisation des déchets

### II.1 Introduction

La question des déchets est quotidienne et touche chaque être humaine soit professionnel ou bien familial en tant que consommateur ou producteur, Le citoyen doit être un acteur principal d'une meilleure gestion des déchets.

Parmi les différents modes de gestion des déchets, le recyclage est une technique de traitement tient une place particulière notamment dans les pays développés et dans toutes les civilisations, l'art et la manière de

« Faire du neuf avec du vieux » existent. Il est considéré par les uns comme la voie royale de la valorisation des déchets, il est contesté par d'autres, qui remettent en cause son intérêt, en soulignant d'éventuels effets négatifs, notamment sur le plan économique.

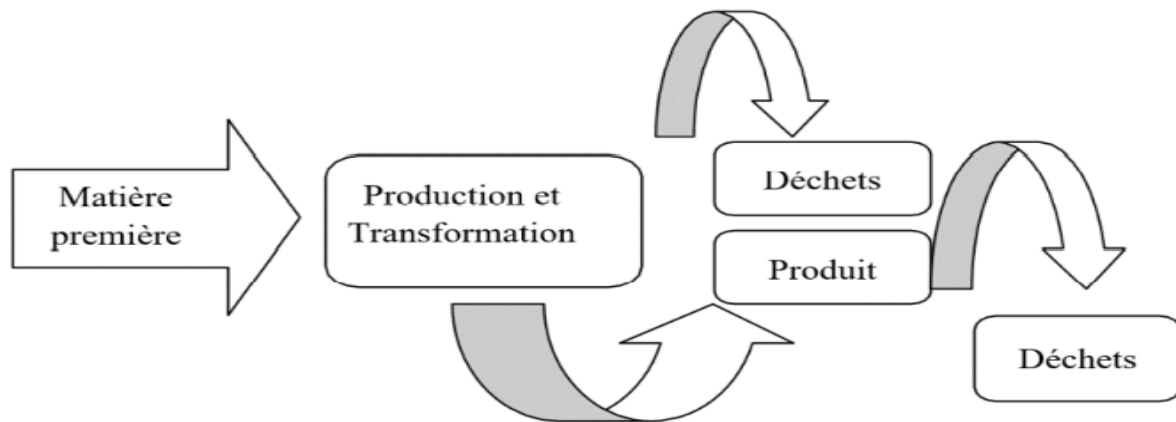
Mais valoriser un déchet dans le domaine du génie civil, exige la connaissance de son état actuel, son origine, analyser et caractériser son comportement dans le temps et son évaluation si il est traitable vue leur utilisation comme une matière secondaire.

Ce chapitre, décrit le contexte de la gestion des différents déchets et les principales techniques de traitement à travers le monde ; ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine des travaux publics.

### II.2 Définition

Les définitions de déchets ou de dispositifs de traitement de déchets ont souvent évolué en l'espace de quelques années jusqu'à 15 juillet 1975, Le législateur définit le déchet par la loi comme «tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon» , en l'état ou après modification, sinon tout élément qui est abandonné , dégradant

les sites ou les paysages, engendrant des bruits ou des odeurs et portant atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement.(GUIDE DES TRAITMENT DES DECHETS .2016)



FigureII.1: Circuit de production- génération de déchet (BOUZIDI, 2020)

### II.3 Les classement des déchets :

#### II.3.1. Introduction :

Les déchets sont de nature variable. Dans la direction de la préservation des ressources de notre planète et limiter au maximum l'enfouissement des déchets qui ne peuvent pas être traités, les centres de tri et déchetterie ne cessent de développer des processus visant à trier, recycler et revaloriser les déchets avec un rendement élevé.

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

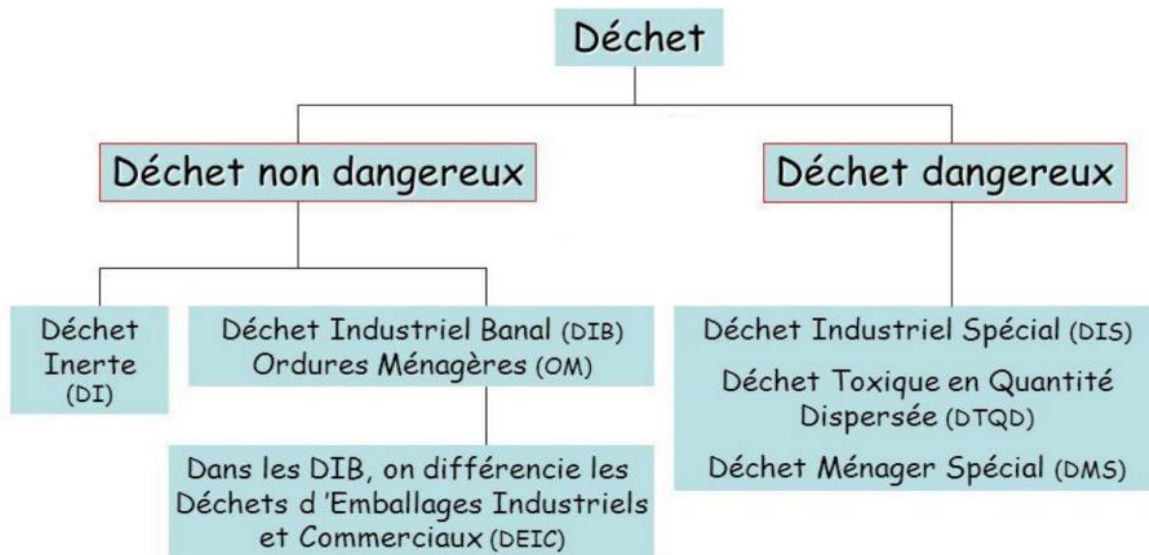


Figure II.2: Classification des déchets.

### II.3.2 Déchets dangereux:

**II.3.2.1 Déchets dangereux des ménages (DDM) :** c'est des déchets de risque qui se trouve dans les environnements ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage.



Figure II.3: Catégories-déchets-dangereux.

**II.3.2.2 Déchets industriels spéciaux (DIS) :** Déchets ayant une relation avec l'activité industrielle qui contiennent en quantité variable des éléments toxiques ou dangereux pour différentes raisons (toxicité chimique, risques d'explosion...), provenant de: l'industrie pétrolière, du plomb d'hydrocarbures, etc....

**II.3.2.3 Déchets radioactifs :** Catégorie à part entière, spécifique par la dangerosité même du produit les particularités de gestion (transport, collecte et

traitement); l'obligation d'une gestion par des organismes spécifiques dès la sortie de lieu de production du déchet. (CANCER-ENVIRONNEMENT.FR)



Figure II.4 : des déchets nucléaires

### II.3.3 Déchets non dangereux:

**II.3.3.1 Déchets industriels banals :** Ils collectionnent l'ensemble des déchets non dangereux, inertes, non toxiques, réalisé par les industriels et par les entreprises participe dans le secteur économique tel le commerce, l'artisanat, services de l'administration, la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin d'utilisation.

**II.3.3.2 Déchets inertes et du BTP (Bâtiments et Travaux Publics) :** Ils sont formés de déblais, de gravats de démolition et d'extraction ou de construction certains déchets de la métallurgie peuvent également être classés dans cette catégorie. Ce sont des déchets minéraux, non susceptibles d'évolution physico-chimique ou biologique.



Figure II.5: Déchets de chantier BTP.

**II.3.3.3 Déchets ménagers et assimilés :** Ce terme réunie l'ensemble des déchets qui se trouve dans le cadre de notre vie quotidienne tel : vieux

vêtements, électroménagers, vieux meubles, déchets verts, restes de repas, emballage etc. Les Déchets ménagères contiennent aussi les déchets des commerçants et artisans.



Figure II.6 : Déchets ménagères et assimilés.

## II.4 Pourquoi la valorisation

La valorisation c'est un terme englobe le recyclage et réutilisation des déchets qui porte une valeur économique et écologique.

Le but principal qui incite à la valorisation du déchet et de sous-produits industriels est lié avec la diminution des ressources mondiales en matières premières, la crise de l'énergie, et enfin à la mise en conformité avec la loi qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement, les arguments peuvent être résumés en :

- La Préservation des ressources naturelles en évitant les activités forestières et minières ;
- maintenir les quantités phénoménales d'eau ;
- Diminuer la demande en énergie dans les processus de fabrication ;
- La mise en garde à la contamination de l'air, de l'eau et du sol par les activités extractrices.
- Faciliter la protection de l'environnement et des écosystèmes ;
- Diminuer la pollution : pour chaque tonne de matières recyclées, c'est 2,8 tonnes de gaz à effet de serre évitées.

### II.4.1 Les filières et les stratégies de valorisation

Malgré les grandes quantités des déchets dans notre pays qui approchant environ 4.892.000 tonnes/an (dont 184.000 tonnes sont considérées dangereux et

toxiques) une gestion des déchets solides n'est pas développée à l'heure actuelle. Parfois, la récupération de certaines matières valorisables est pratiquée, mais la qualité reste très insuffisante. (Zeghichi, 2006)

En distingue trois secteurs fondamentaux pour une valorisation efficace des déchets :

- Valorisation de la matière
  - Rectifier les déchets recyclables pour la reproduction des matières premières secondaires (papier, bois, verre...).
  - Garantie la commercialisation des matières premières secondaires issues des traitements.
- Valorisation énergétique

Constituer, à partir des déchets non recyclables :

- L'électricité et alimenter des réseaux de chauffage.
  - La récupération des fours ou des centrales industrielles à partir des déchets stockés.
  - Du biogaz et fournir des unités de production énergétique ou des véhicules équipées de moteurs à gaz.
- valorisation agronomique  
Le secteur agronomique joue un rôle majeur afin d'offrir une solution assez intéressante pour la réutilisation des déchets organique no nuisible en raison d'amélioration et l'augmentation des caractéristique intrinsèques de sol pour la meilleure production Agronomique possible.



Figure II.7: Valorisation organique des sols



Figure II.8: Echantillon de Plastique recyclé



**Figure II.9 :** Fumées dégagées par l'incinération du déchet

## **II.5 Les avantages et les inconvénients du recyclage du déchet**

### **II.5.1 Les avantages**

- Le recyclage réduit la pollution :

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

- Le recyclage minimise le réchauffement climatique :

Lors de l'élimination des déchets, d'énormes quantités de matériaux sont brûlées, entraînant l'émission du gaz comme le dioxyde de carbone qui contribue au changement climatique après le réchauffement de la planète.

### **II.5.2 Les inconvénients**

- Coûts d'investissement élevés :

La réutilisation du déchet n'est pas toujours lucrative, réalisé une nouvelle unité de recyclage nécessite beaucoup de capital. Les coûts d'accompagnement exigent l'achat de différents types de véhicules de service, entretien d'unité de recyclage, la gestion des déchets, l'évacuation des produits chimiques en organisant des programmes et des institutions utiles.

- Les endroits de recyclage des déchets sont toujours peu hygiéniques et malsaine :

La majorité des sites de recyclage des déchets est dans des conditions insalubres, malsaines et disgracieuses. Les places où tous les types de déchets sont empilés constituent un terrain convenable à la formation de débris et à la propagation de maladies.

Les produits chimiques nocifs provenant de ces déchets peuvent également être grave pour la sante.

### **II.6 Politique nationale d'exploitation de déchet :**

L'Algérie a renforcé son effort dans le domaine de la protection de l'environnement et d'exploitation des déchets depuis 2001, via d'une part, une politique de gestion des déchets qui se marque dans la stratégie nationale environnementale (SNE), et d'autre part dans le Plan national d'actions environnementales et du développement durable (PNAE-DD) qui s'est formé par la promulgation de la loi 01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion et l'annulation des déchets dont des disciplines de :

- Traitement écologique et raisonnable des déchets.
- L'exploitation des déchets par la réutilisation et le recyclage.
- La structuration du classement, de la collecte, du transport et du traitement des déchets.
- la prévention et la réduction de la production et de la nocivité des déchets à la source.
- la sensibilisation des citoyens sur les risques présentés par les déchets et leurs impacts sur la santé et l'environnement d'une part et la création des établissements liés aux déchets D'autre part. (AND, 2013)

La réalisation d'un plan d'action opérationnel dépend d'un grand nombre d'acteur à l'échelle nationale et internationale.

Le Ministère de l'Environnement et Des Energies Renouvelables est responsable principale d'organisme nationale de l'environnement et la exploitation des déchets en Algérie, Plusieurs établissement sont créés sous sa conservation tel que :

- La direction générale de l'environnement et du développement durable.
- L'agence nationale des déchets (AND).



-L'observatoire national de l'environnement et du développement durable(ONEDD).

-Le conservatoire national des formations à l'environnement (CNFE).

-Les Inspections Régionales de l'Environnement.

-Direction de l'Environnement de Wilaya (DEW).

Entre 15 000 et 20 000 tonnes de déchets sont produites quotidiennement avec 5 à 6 000 tonnes de déchets industriels. Les schémas directeurs de collecte et d'élimination de ces déchets qui ont été élaborés ces dernières années n'ont pas pu améliorer ce secteur.

La raison principale est la qualité des études qui n'ont pas permis de bien caractériser le gisement de déchets valorisables en les classant avec les technologies auxquelles ils sont adaptés. Tous les bureaux d'études se sont spécialisés dans la gestion des déchets alors que peu disposent de spécialistes en rudologie (Benabdeli, 2020)

La gestion des déchets solides urbains est avant tout une responsabilité publique. La loi n ° 01- 19 du 12 décembre 2001 (article 32),Propose un système de gestion capable de fonctionner sur le long terme, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets définit le cadre général de la gestion des déchets ainsi que toutes les activités connexes, il est prévu par la loi n ° 90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune. (Benabdeli, 2020)

- Loi n°02-02 du 05 février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.

- Loi n°03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'Environnement dans le cadre du développement durable.

- Loi n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.

- Décret n ° 04-199 du 19/07/2004, qui en approuve le fonctionnement Sur les réseaux spécialisés dans les régions et les classes de matériaux, il n'a pas réussi à résoudre le problème des déchets (Benabdeli, 2020).

- Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.

- Loi n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Pour dépasser les limitations de gestion des déchets en Algérie, des responsables au niveau du ministère de l'environnement ont choisi des schémas de gestion des déchets ménagers et industriels. Cela a conduit à la mise en place de 65 centres techniques d'enfouissement (CET) avec un objectif de cent(100) et l'installation d'unités de tri et la mise en place de centres régionaux spécialisés pour les déchets industriels. Il est à noter que le coût moyen du CET se situe entre 150 et 190 millions de dinars. Pour la seule période 2001-2005, les investissements à travers les différents mécanismes (FSDRS, FEDEP) en termes d'opérations d'enregistrement ont mobilisé environ 22 milliards de dinars, soit 220 millions d'euros. Les résultats restent inférieurs aux attentes, les déchets ménagers et industriels étant très mal collectés puis enfouis sans valorisation, et pour ces derniers, ils sont stockés à tous risques (Benabdeli, 2020)

Tableau II.1 : Volume des déchets produits annuellement en Algérie

(Benabdeli, 2020)

Nature de déchets	Quantités produites en tonne
Déchets d'origine minérale (DM)	80.000 T
Boues minérales (B.M)	30.000 T
Résidus de pétrochimie et de liquéfaction	110.000 T
Boues polluées de Zinc	25.000 T
Solvants organiques, résidus de peinture	15.000 T
Produits Électroniques Divers	10.000 T
Boues métalliques et électroniques	10.000 T
Déchets de verres industriels	10.000
Résidus de fabrication	25.000 T
Divers déchets Industriels	45.000 T
Huiles de vidanges	180.000T

Tableau II.2 : Typologie des déchets domestiques valorisables (Benabdeli, 2020)

Types de déchets	Quantité valorisable
Papier Divers Types (P.D.T)	660.000 T
Matières organiques valorisables (M.O.V)	4.000.000 T
Plastique Facilement Recyclable (P.F.R)	360.000 T
Verre blanc recyclable (V.B.R.)	240.000 T
Métaux et Fer Réutilisable (M.F.R)	180.000 T

## II.7 Conclusion

Les déchets c'est un sujet qui pose beaucoup de problème. Il fait partie à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, la recherche scientifique doit prendre la responsabilité pour trouver des solutions convenable pour toutes les collectivités.

Cette matière n'est pas ordinaire. Elle a une vie, et souvent déplacé au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les centre d'enfouissement. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour baisser les capacités de nuisances.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être valorisés comme granulats. L'utilisation des divers déchets a une relation avec leur capacité d'exploitation et de leurs propriétés.

De nombreux types de déchets sont capables d'être utilisés à une grande échelle en considérant leurs caractéristiques physiques et chimiques.

Dans cette étude on s'intéresse uniquement aux déchets de verre recyclé pour l'utiliser en tant que granulats des chaussées, donc on est dans l'obligation de respecter certains paramètres qui seront exposés au chapitre suivant.

## Chapitre III : recyclage de verre

### III.1 Introduction :

De nombreux déchets sont utilisés comme matériaux de génie civil en particulier dans le domaine des travaux publics, à savoir les débris de démolitions, le plastique et le verre. Le verre est un matériau à plusieurs vies et peut être recyclé plusieurs fois. Le Recyclage de verre est une pratique écologique simple et efficace que l'on puisse faire.

Le recyclage du verre permet, d'une part la récupération d'une partie de cette matière et d'autre part, la préservation de la nature. En réalité, le verre met environ trois ou quatre millénaires à se décomposer dans la nature. Ainsi, selon l'utilisation faite des résidus de verre provenant des déchets domestiques et industriels, son recyclage demande moins d'énergie que lors de sa fabrication originale.

Mais la plupart du temps, le verre récolté est un produit mixte et sa réutilisation peut être devenir difficile. Dans ce cas, il est employé pour d'autres applications telle la construction routière.

### III.2 Définition du verre :

Le verre est un corps dur, homogène, élastique, fragile, qui provient du refroidissement rapide de trois matières premières (le sable, le carbonate de sodium et le calcaire) qui sont fondues ensemble à très haute température. Il est le type du cassant, du transparent, du lisse (miroir) et intransférable. Depuis quelques décennies, il sert de référence aux isolants thermiques. C'est aussi un isolant électrique. Ses formes et ses applications sont innombrables ( Houdaer , 2010).

D'après l'American Society for Testing Materials, le verre est un matériau inorganique produit par fusion, qui a été refroidi dans des conditions qui ont empêché sa cristallisation.(ASTM, 1945)

### III.3 Historique de verre

L'homme a commencé à fabriquer du verre il y a environ 5000 ans. Le verre a été Probablement utilisé pour la première fois dans l'Égypte ancienne, où les articles en verre étaient considérés comme des objets de luxe, que l'on ne trouve que dans les membres de la famille royale.

Le verre qui prendre une forme d'une canne creuse est probablement inventé en Palestine à partir du 1er siècle après JC.

Au 15ème siècle les italiens qui s'installant en Haute Normandie et y créent des ateliers de fabrication de bouteilles en verre avants la propagation de la fabrication mondiale de cette matière.

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.4 Composition chimique de verre

Le travail réalisé par Dyer et Dhir en 2001 a montré que le verre se compose généralement de substances suivantes (Dyer et Dhir, 2001):

Tableau III.1: 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	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.5 Caractéristique physique

L'université de Philadelphie a mené des études sur le comportement physique des débris de verre selon le système de classification unifié (United Soil Classification System). Deux échantillons de verre ont été utilisés dans ce projet. Le premier échantillon était constitué de débris provenant de déchets domestiques provenant d'une carrière de Pennsylvanie, tandis que le second échantillon comprenait des déchets de verre industriels achetés chez un commerçant de la ville dont l'activité consistait à laver et stocker les débris de verre et de les revendre aux industries pharmaceutiques et vitrières de la région.

Les propriétés principales du verre concassé issu de cette étude 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>
- CBR avec 50 % de pierre concassée et 50 % de verre brisé = 42 à 115 %
- 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 Glubb., 2004)

### III.6 Le recyclage du verre

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

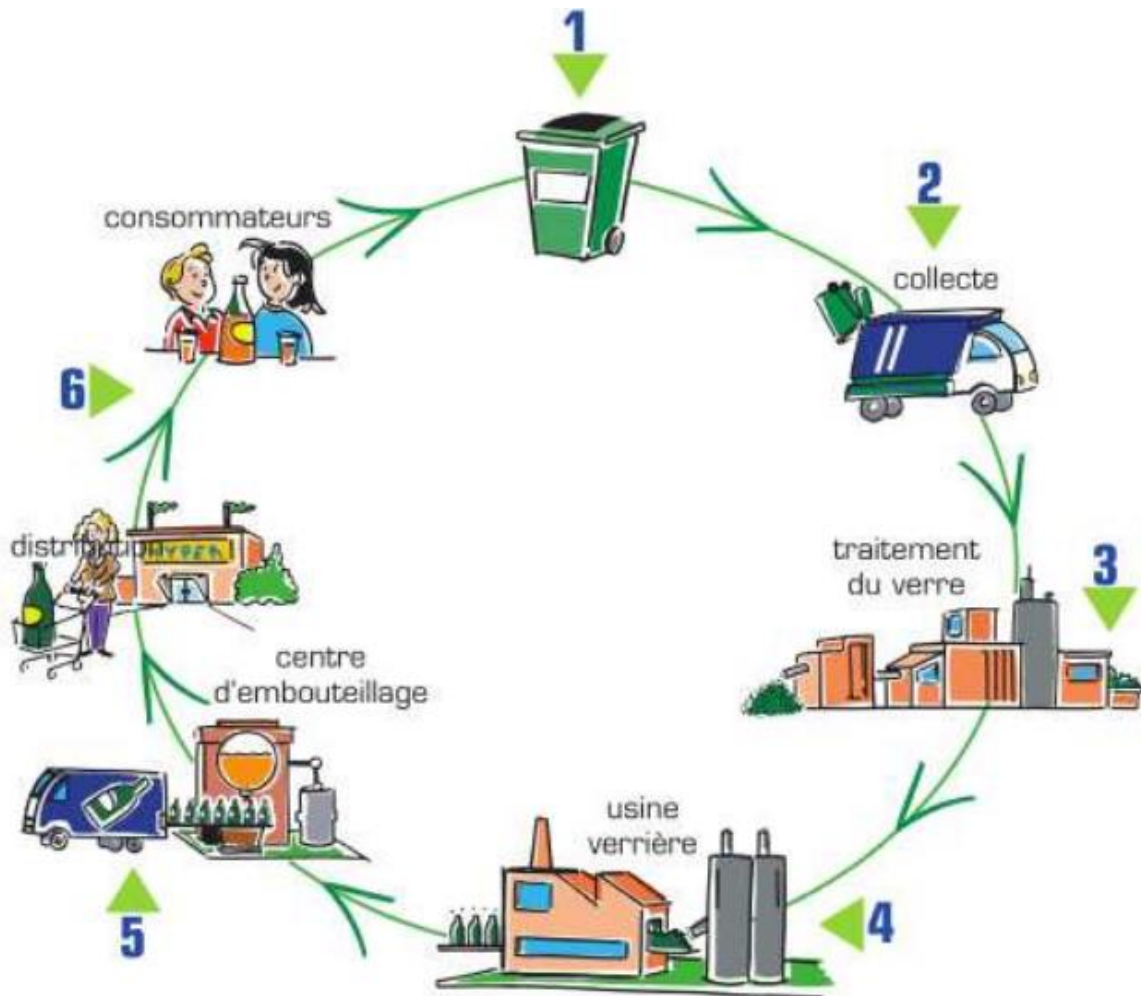
Parmi les qualités du verre est un matériau inerte pour l'environnement par sa recyclabilité, En effet le verre évolue dans un circuit de matières fermé à approximative de 100% sans qu'il perde ses qualités intrinsèques, c'est un cycle perpétuel. A titre d'exemple, le taux de recyclage du verre augmente chaque année (Tableau III.2)

Tableau III.2: Quantité recyclé de verre. (Etude sur l'industrie du verre ; 12/2001)

Année	Quantité recyclé (tonne)	Taux de recyclage(%)
2000	60011	91
2001	246795	91
2002	227300	94
2003	231731	95
2004	209294	95
2005	210204	95
2006	215645	96
2007	226869	95
2008	228390	95
2009	238384	95
2010	236733	94
2011	244733	94
2012	241683	96
2013	244775	96

Lorsque le verre est collecté, il est broyé en petits morceaux dans les industries verrières, appelés calcin. Le calcin est nettoyé de tous déchets autres que du verre, broyé, mélangé à une petite quantité utilisé comme matières premières, il est directement introduite dans le four, il ne faut rien ajouter, la présence d'oxyde de sodium dans le calcin permet de réduire la température de cuisson, donc une dépense énergétique considérable puisqu'il fond à 1000°C au lieu à 1500°C.





**Figure III.1** : Processus de recyclage de verre.

Ce procédé à plusieurs avantages, d'un point de vue économique, le verre qu'il soit brun, vert ou clair, grâce au recyclage, Vetropack (l'un des leaders européens de la fabrication d'emballages en verre) réduit de plus de 20% les besoins en énergie pour la fabrication de nouveaux emballages. En recyclant une seule bouteille, vous contribuez à l'économie d'assez d'énergie pour allumer une ampoule de 100 watts durant 4 heures! De plus, il faut 50% moins d'eau, la pollution de l'air est réduite de 20% et les résidus miniers de 80%. L'utilisation du calcin diminue les émissions de CO<sub>2</sub> issues de l'extraction et limiter l'épuisement des ressources naturelles (1 kg de calcin utilisé remplace 1,2 kg de matières minérales vierges). (Etude sur l'industrie du verre ; 12/2001)

### **III.7 Domaine d'utilisation du verre recyclé comme granulat**

Le verre a des qualités qui lui permettent d'être utilisé dans des applications autres que celles de la fabrication du même produit dont il est issu. En effet, il peut également entrer dans la composition de matériaux de construction et d'isolation, dans les peintures, ainsi que dans de nombreux autres domaines (Cercle National du Recyclage, 2007).

#### **III.7.1 Utilisation dans la technique routière**

La valorisation de déchets de verre broyé dans le domaine des travaux publics peut couvrir plusieurs types, telles :

##### **III.7.1.1 Utilisation des résidus de verre dans la structure des chaussées**

La résistance mécanique des granulats de verre broyé est similaire à celle des granulats conventionnels utilisés dans les couches granulaires. (Arnold et al 2008; Bernard, 2014)

De ce fait, l'incorporation de particules de verre broyé dans les couches granulaires est possible. La première réalisation d'une étude publique de ce sujet a été réalisée par Dames et Moore en 1993 (Dames & Moore, 1993.), subventionnée par les états de New York et de Californie dans le but d'évaluer la pertinence de l'utilisation du verre broyé dans les couches structurales des chaussées. Les aspects environnementaux, économiques, techniques et mécaniques ont tous été abordés dans ce rapport. . D'un point de vue mécanique, différents essais ont été menés sur 2 classes de verre broyé correspondant chacune à une grosseur de particules différentes (retenu 19mm et retenu 6,35mm). Le coté expérimental comprenait les essais suivants : poids spécifique, densité relative, granulométrie, conductivité thermique, perméabilité, résistance au cisaillement direct, CBR (California Bearing Ratio), résistance (norme ASTM D2844), module réversible. Les proportions massiques du granulat de verre broyé analysées ont été de 0%, 15%, 50% et 100%. Les résultats ont montré que pour les différentes dimensions de granulat de verre broyé étudiés, les mélanges à 15% et 50% de granulat de verre broyé donnent des valeurs de module réversible, de résistance à la fragmentation (essai Los Angeles) et de résistance (normes ASTM D2844) conformement aux exigences.

En 2012, le Northern Territory Government a publié un rapport de recherche portant en partie sur le recyclage du verre broyé et son utilisation en génie civil. Traditionnellement le verre broyé ne fut pas considérée par les autorités

routières comme une alternative convenable pour remplacer une partie des granulats naturels. Depuis quelque temps, les recherches et les initiatives pour incorporer le verre broyé dans les chaussées dans des pays tels que les États-Unis, la Nouvelle-Zélande ou Taïwan (Nan Su, 2002) montrent que le verre broyé est un bon matériau pour remplacer une partie des granulats et du sable présent dans la structure routière. D'après le Federal Highway Administration (FHA, 2002), si le verre broyé est concassé et traité de la bonne façon, il peut alors avoir une perméabilité similaire à celle du sable grossier. Cela ouvre alors des possibilités quant à son utilisation dans les couches de base (Lolias et al,2012).

### **III.7.1.2 Utilisation des résidus de verre dans les enrobés bitumineux**

La partie fin du verre broyé peut être utilisée dans l'enrobé bitumineux comme granulats dans une proportion maximale de 15 %.

Pas mal d'expériences ont été effectuées visant l'utilisation du verre concassé comme granulats dans les enrobés bitumineux (L'asphalte). 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 autoroutes. (Federal Highway Administration, 2012)

Le département des transports du Connecticut (Conn DOT), a fini une étude de mise en œuvre technique ainsi qu'une analyse économique de l'utilisation des débris de verre dans les enrobés bitumineux avec des résultats positifs (Larsen, D. A., 1989).

### **III.8 Disponibilité du verre a recyclé en Algérie**

L'Algérie est entrain de connaître un développement économique et démographique remarquable. Le taux élevé d'accroissement de la population a engendré une urbanisation accélérée, Cela ne s'est pas fait sans conséquences sur l'environnement. Face à la gravité des problèmes environnementaux, le gouvernement Algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 Mda, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD)..

Le recyclage de verre c'est l'élément principal qui touche l'enveloppe financière de gouvernement Algérienne en 2001. Il est considéré une véritable solution pour la réduction des gravité des problèmes environnementaux .Il forme une source

de matière première secondaire pour plusieurs applications industrielles. Des études sont fait par des entreprise verrière local montrons que, avec un gisement annuel de 90000 tonne de déchet de verre en Algérie, près de 80% sont non récupérés et les 20% restants sont récupérés et recyclés par les trois grandes entreprises comme le montre le tableau suivant :

Tableau III.3 : quantité de verre valorisé et les type de verre reproduit par des entreprises locales.

Les entreprises	Région d'activité	Quantité (1000tonne/ans)	Type de verre
Alver	Chlef	45	transparent
Nover	Oran	16	Vert
VSI	Constantine	9	transparent

D'après l'agence nationale des déchets AND La composition des déchets solides produits en Algérie se caractérise par une part très significative des produits organiques avec un taux moyen de 72%. Le verre représente 1.36%. Un marché qui encore besoin d'un investissement qui absorbe les déchets de verre recyclable. (AND, 2013)

### III.9 Conclusions

Notre pays comme d'autres en voie de développement souffre des effets négatifs des déchets, Malheureusement, ces milliers de tonnes de déchets issus des différentes activités industrielles sont souvent abandonnés et jetés dans des décharges inappropriées et anarchiques. Ainsi, ils présentent des risques majeurs pour la santé publique (pollution de l'environnement).

Des généralités ont été exposées dans ce chapitre sur le recyclage du verre, une présentation du verre et de ses propriétés permettra une meilleure compréhension de son utilisation comme matériau de construction dans les structures de chaussées (couches de fondations et couches de base).

Cependant, vu les différentes sollicitations auxquelles il sera soumis en pratique tel l'effet du trafic, la connaissance d'autres caractéristiques physiques et mécaniques du verre valider par les conditions exigées des normes est indispensable pour confirmer une éventuelle utilisation dans le domaine routier.

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

## Chapitre IV : identification des matreaux

### IV.1 Introduction :

Le monde des matériaux de construction est très vaste, pour cela, pour étudier le comportement des matériaux, il est évident de définir certains paramètres (physiques, chimiques, ...) qui permettent de caractériser et faciliter la compréhension de son comportement sous différentes sollicitations mécanique. Ces paramètres sont déterminés par des essais simples et rapides, appelés «essais d'identification», et des essais qui nous fournissent des indications plus précises, appelés «essais de comportement mécanique des matériaux», pour une meilleure interprétation des résultats. (Schlosser, 1988)

### IV.1.2 Essais d'identification des matériaux utilisés :

Dans ce travail, les granulats étudiés sont composés de deux matériaux essentiels, à savoir la Grave Non Traitée (GNT) et les débris de verre.

Nous avons utilisé la GNT (Grave Non Traitée) de la carrière de l'entreprise Fillali, située à (RECHAIGUA). La figure IV.1 montre des échantillons de la GNT.



**Figure IV.1 :** Echantillons de GNT de la carrière de l'entreprise Fillali (Rechaiga)

Les déchets de verre ont été récupérés chez un verrier, puis fragmentés au laboratoire afin d'obtenir des particules inf à 3 mm (fraction fine correspondante à la partie sableuse contenue dans la GNT).

Etant donné que notre objectif est d'étudier l'influence de la forme des grains de verre sur le comportement mécanique des couches granulaires dans les chaussées, on a utilisé l'appareil Los Angeles (Figure IV.2.a) pour obtenir des particules de verre de forme arrondie (Figure IV.3.a) et le concasseur de laboratoire (Figure IV.2.b) pour obtenir des particules de verre de forme angulaire (Figure IV.3.b).

\* *Préparation des particules de de verre de forme arrondie :*

- Pour la préparation des particules de verre de forme arrondie, on utilise l'appareil Los Angeles dans lequel on met 15 kg de verre avec 11 boulets, puis on effectue 1000 tours (soit 2 fois 500 tours), cela dure à peu près 35 min.

- Pour la forme angulaire, on fragmente manuellement le verre (pour pouvoir le placer dans le concasseur) pour obtenir des fragments de verre de dimensions comprises entre 6 et 8 cm, puis on place ces derniers dans le bac d'alimentation. Une fois les fragments de verre récupérés dans le bac placé sous la machine, on les réintroduit de nouveau dans le concasseur pour avoir plus de rendement (fractions comprises entre 0 et 3 mm).



**Figure IV.1** : Appareillage de Broyage des déchets de verre : (a) avec l'appareil Los Angeles ; (b) concasseur de laboratoire

(a)



**Figure IV.2 :** Particules de verre après broyage : (b) Forme Arrondie ; (a) Forme angulaire

Pour mieux comprendre le comportement mécanique des matériaux étudiés, ces derniers sont d'abord soumis à une série d'essais d'identification, permettant de déterminer leurs caractéristiques principales:

#### **IV.1.2.1. Les essais d'identification :**

##### **IV.1.2.1.1. Analyse granulométrique (NA 2607) :**

Cet essai consiste à faire passer un échantillon de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures vont en décroissant du haut vers le bas selon la Norme (NA 2607). Les particules les plus grosses restent donc emprisonnées sur les tamis les plus hauts, tandis que les particules plus fines se dirigent vers les tamis inférieurs. Les particules retenues sur un tamis portent le nom de refus, alors que la quantité de sol ayant traversé un tamis s'appelle tamisât ou passant (Robitaille et Tremblay, 1997).

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant les échantillons. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 25 mm, à l'exclusion des fillers.





Figure IV.3 : série de tamis pour l’analyse granulométrique des matériaux utilisés

La courbe granulométrique de la GNT est représentée sur la figure IV.4

Sur la figure IV.5, on représente la courbe granulométrique du verre broyé.

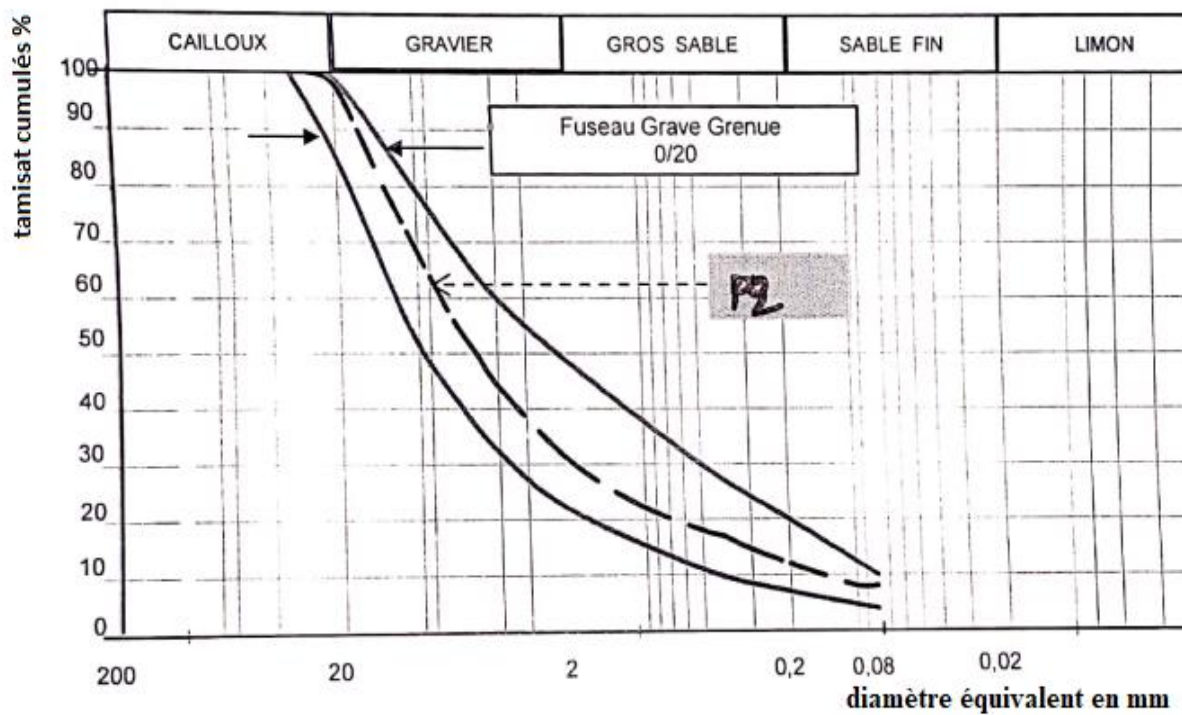
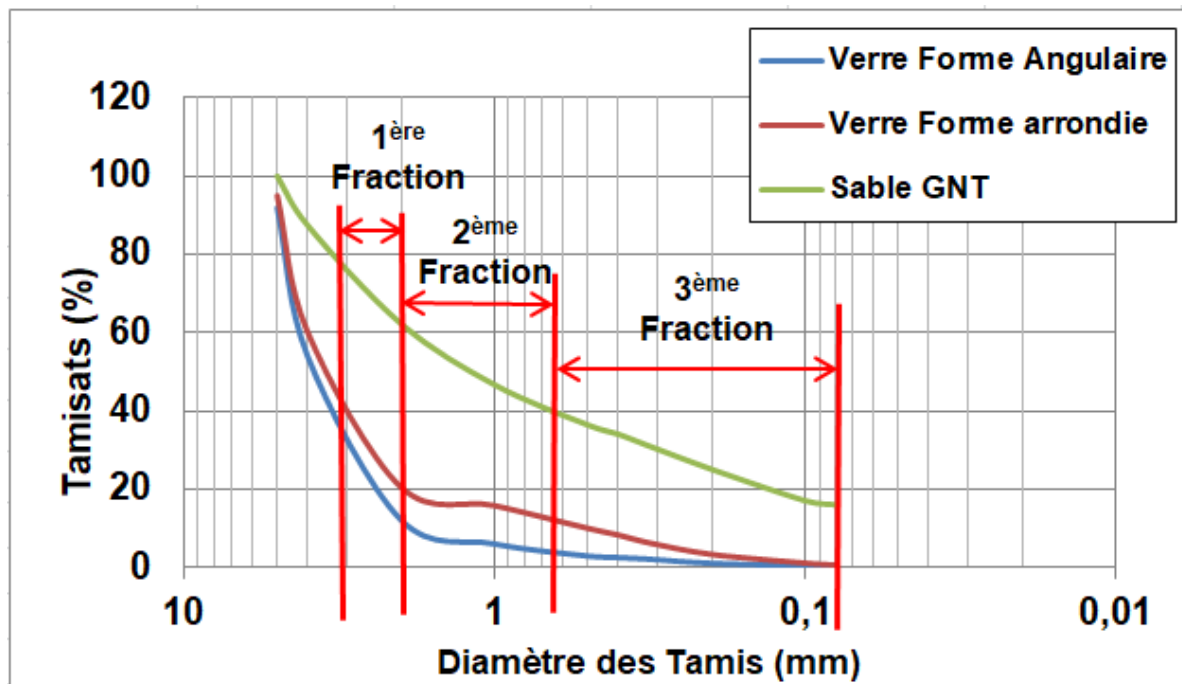


Figure IV.4 : Courbe et fuseaux granulométriques de GNT utilisée.



**Figure IV.5 :** Courbe granulométrique du verre broyé avec l'appareil Los Angeles et le concasseur de laboratoire

#### IV.1.2.1.2. Les fuseaux granulométriques (NA 2607) :

Bien qu'elles soient appliquées dans ce paragraphe à la granulométrie (Figure IV.4), elles doivent être étendues à l'ensemble des propriétés des granulats (Equivalent de sables, etc.).

Le fuseau granulométrique est la zone délimitée par deux courbes granulométriques enveloppes (Jeuffroy, G. ; Sauterey, R., 1991).

On distingue :

- Le fuseau de spécification propre à la technique considérée, qui définit la zone dans laquelle doivent se situer les fuseaux de tolérance,
- Le fuseau de fabrication, qui contient 95 % des courbes granulométriques du matériau fabriqué. Un fuseau de fabrication est entièrement inclus dans le fuseau de régularité.

Sa définition requière au moins 15 valeurs afin d'être suffisamment représentatif et est établi par le producteur de granulats ;

- le fuseau de régularité, ou de tolérance, qui définit l'étendue de la zone dans laquelle doivent se situer 95 % des courbes obtenues au cours du contrôle.

#### IV.1.2.1.3. Le coefficient d'aplatissement (NA 256/1990):

La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 mm et 40 mm par l'essai de double tamisage.

Pour ce faire, on utilisera une série de tamis à maille carrée avec couvercle et fond de tamis et une série de grilles avec couvercle et fond de grille (Figure IV.6).



**Figure IV.6 :** Série de grilles pour déterminer le coefficient d'aplatissement  
Pour réaliser cet essai, on suivra les étapes suivantes :

- prendre une masse de (7000g)
- Laver la masse de prise d'essai dans le tamis 80  $\mu\text{m}$  pour éliminer les fines.
- Sécher la masse lavée dans l'étuve ( $110\pm 5$ ) °C
- Tamiser et peser le refus partiel de chaque tamis à maille carrée.
- Tamiser le refus de chaque tamis par la grille à fente équivalente et mesurer son refus.

Le coefficient d'aplatissement  $A_i$  de chaque granulat élémentaire exprimé en (%) est :

$$A_i = (M_e/M_g) * 100$$

$M_e$ : Masse du passant de la grille à fentes correspondante au granulat élémentaire.

$M_g$ : Masse de chaque granulat élémentaire.

Le coefficient d'aplatissement global A exprimé en (%) est :

$$C.A = (M_2/M_1) * 100$$

$M_1$  : Somme des masses des granulats élémentaires

$M_2$  : Somme des masses de passants sur les grilles

**Tableau IV.1:** Coefficient d'aplatissement global de chaque granulat élémentaire.

Classe granulaire (d/D) (mm)	40- 31.5	31.5- 25	25- 20	20- 16	16- 12.5	12.5- 10	8-10	8-6.3	6.3- 5	5-4
Ecartement	20	16	12.5	10	8	6.3	5	4	3.15	2.5
(Mg) en gramme	00	00	118	389	473	439	367	398	324	314
(Me) en gramme	00	00	00	39	62	42	38	50	47	33

#### IV.1.2.1.4.L'équivalent de sable à 10% (NFP 18-597) :

C'est un indicateur, utilisé en géotechnique, caractérisant la propreté d'un sable ou d'une grave. Il indique la teneur en éléments fins, d'origine essentiellement argileuse, végétale ou organique à la surface des grains. Ce terme désigne également l'essai qui permet de déterminer cet indicateur.

L'Equivalent de sables est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

Cet essai s'applique assez bien aux sols faiblement plastiques et peut s'appliquer à tous les matériaux grenus.

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

- hauteur H1 : sable propre + éléments fins,
- hauteur H2 : sable propre seulement.

Il existe deux types de mesures en fonction du degré d'argilosité du matériau. En effet pour les sols par exemple, la mesure de la hauteur H2 peut être délicate, on substitue à l'essai visuel, l'essai au piston.

$$ES=100 \cdot H2 / H1$$

**Tableau IV.2:** les mesures de H1 et H2 pour les deux prélèvements de GNT.

	ECH 1	ECH 2
Mesure H1	18.7	18.8
Mesure H2	8.60	9.00

**IV.1.2.1.5. Propreté superficielle** (norme NA 18-591) :

La propreté désigne : d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

Pour la réalisation de cet essai, on suit les étapes suivantes :

- On pèse la masse de l'échantillon soit (P1)  $M=3000\text{g}$
- On tamise l'échantillon à l'eau : tamis de 0.5 mm et tamis de 1.6mm, puis on récupère le refus.
- On fait sécher le refus à l'étuve à 105 °C.
- On pèse à la fin le refus de prélèvement :  $M_S = 2972\text{ g}$ .

La propreté se calcule par la formule :  $P = [(M - M_S) / M] \times 100$

**IV.1.2.2. L'essai caractéristique de la propriété intrinsèque** (NA 255-1990) :**IV.1.2.2.1. Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse de l'unité de volume du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

La densité apparente est le rapport de la masse apparente d'une unité de volume du matériau à la masse d'un égal volume d'eau distillée à la même température.

$M_1$  : la masse du récipient ;  $M_2$  : la masse de l'échantillon et le récipient ;  $V$  : volume de récipient utilisé.

Pour notre cas :

$M_1 = 1833\text{ g}$ .

$M_2 = 5315\text{ g}$ .

$MVA = (M_2 - M_1) / V$

**IV.1.2.2.2. Masse volumique absolue :**

La masse volumique absolue d'un matériau est la masse de l'unité de volume de ce matériau, déduction faite de tous les vides, aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

La densité absolue est le rapport de la masse absolue d'une unité de volume du matériau à température donnée à la masse du même volume d'eau distillée à la même température.

$M_s$  : masse sèche d'échantillon ;  $M_a$  : la masse dans l'eau (figure IV.7).

Dans notre cas :  $M_s=500.7$  g et  $M_a=308.7$  g.

$$\rho = M_s / (M_s - M_a)$$



*Figure IV.7 : Balance hydrostatique.*

### **IV.1.2.3.Résistance à l'usure et aux chocs**

#### **IV.1.2.3.Essai los Angeles (NA 458/1990) :**

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

Pour la réalisation de cet essai on suivra la procédure d'essai comme suit :

- Prélèvement de 15000 g de GNT.
- Tamisage et lavage de l'échantillon au tamis de 2 mm.
- Etuvage de l'échantillon à 105 °c.
- Pesée 5000 gr.

- Mettre 11 boulets dans la machine Los Angeles (la masse des boulets devra être proche de 4840 g).
- Introduire la masse d'échantillon et mettre la machine en marche pour 500 tours.
- Récupération du matériau et tamisage au tamis de 1,6 mm.
- Séchage du refus à l'étuve à 105 °c.
- Peser le refus en gr : (M1)= 3510 g

Enfin, On Calcule le pourcentage de:

$$LA = (5000-M1)/5000$$

#### **IV.1.2.3.2. Essai micro-Deval (NA 457/1990):**

L'essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements entre les granulats et une charge abrasive. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient Micro-Deval est faible, meilleur est le matériau.

Dans les cylindres de la machine, introduire chaque prise d'essai M = 500 g et la charge abrasive (billes en acier de 10 mm de diamètre) correspondant à la classe granulaire choisie [10mm-14mm]. Les essais peuvent s'effectuer à sec ou en présence d'eau. Dans ce dernier cas, on ajoutera 2,5 litres d'eau par essai. Après rotation des cylindres à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures, tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm et peser le refus M.

Par définition le coefficient Micro-Deval est le rapport :

$$MDE = (500-M)/500$$

Dans notre cas :

$$(M1)=433 \text{ gr}$$

$$MDE1=14\% < 25\%$$

$$(M2)=429 \text{ gr}$$

$$MDE2=13\% < 25\%$$

#### **IV.1.2.4. L'essai chimique :**

##### **IV.1.2.4.1 Essai de bleu méthylène (P 18.592):**

Cet essai a pour objectif de déterminer la capacité d'adsorption ionique des matériaux granulaire pour connaître le type d'argile qu'ils contiennent. Il permet également d'apprécier

la qualité et la quantité de particules fines présente dans le matériau. Pour réaliser cet essai, il faut déterminer la quantité de bleu de méthylène qui est absorbée par 300 g de matériau. L'argile possédant une structure cristalline en feuillet (grande surface spécifique) est considérée comme un bon adsorbant naturel. Donc, quand l'échantillon est saturé, le bleu de méthylène se combine avec l'eau et permet l'observation d'une auréole bleutée lorsqu'une goutte de l'émulsion (eau, matériau, bleu de méthylène) est déposée sur le papier buvard.



**Figure IV.8 :** Appareillage utilisé pour l'essai de la valeur au bleu de méthylène

L'essai se déroule comme suit :

- Préparation d'échantillon de sable 0/2.
- Préparation de prise de l'essai : 300g.
- Mettre la prise de l'essai dans le bac en plastique
- Ajout de 100 ml d'eau distillé
- Agitation et lavage du sable au tamis 0.08 mm dans un béccher de 3 L
- séchage du refus et pesage
- Agiter la solution de béccher a vitesse de 700 tr/min pendant 5 min
- régler la vitesse à  $V= 450$  tr/min
- Control de la stabilisation de la tâche (positive / négative) après 5 min.
- volume total de bleu introduit de la solution  $v$  (ml)



- calculer la valeur de bleu :

$$VB \text{ (cm}^3\text{/g)} = V/q \quad (q : \text{la masse des fines})$$

**Tableau IV.3 :** Résultat de l'essai de valeur au bleu de méthylène

Echantillon	Nature	Masse de refus (g)	W(%)	Q (g)	V (ml)	V.B
E1	GNT	236	/	64	70	1.09

#### IV.1.2.4.2 Taux de carbonates (NA-2789) :

Le taux de carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) est estimé sur la base de détermination volumique de  $\text{CO}_2$  pour une quantité de prélèvement nécessaire à l'analyse. Ce calcimètre ne nécessite pas de ballon pour éviter le mélange  $\text{CO}_2$  – eau (afin d'éviter toute dissolution de gaz dans l'eau). Ce qui entraîne des résultats de mesures bien plus précis

Pour réaliser cet essai, on suivra les étapes suivantes :

- On prélève une masse m de l'échantillon ;
- Broyage de l'échantillon ;
- Tamisage de l'échantillon au tamis de 0.2 mm
- Pesée d'une masse ( $m_1=4\text{g} / 4.999 < m_1 < 5.001\text{g}$ )
- Versement de la masse  $m_1$  dans la fiole
- Introduction dans le tube contenant le volume  $V= 10\text{ml}$  d'acide chlorhydrique(Hcl).
- Equilibrage de la pression au zéro de la colonne.
- Versement de l'acide contenu dans le tube sur la masse  $m_1$
- Agitation énergiquement de la fiole jusqu'à la stabilisation de dégagement de gaz.
- Prélèvement de volume  $V \text{ cm}^3$
- la lecture de pourcentage sur un tableau(%) selon le volume de dégagement gazeux.

**Tableau IV.4:** Résultat de l'essai de taux de carbonates

Echantillon	Nature	Teneur en calcaire (%)	Remarque
1	GNT	80	Lent (dolomie)

## IV.2 Récapitulation des résultats des Essais d'identification des matériaux utilisés :

## IV.2.1 Matériau GNT :

On présente sur le tableau IV.5 les résultats des Essais d'identification de la GNT

**Tableau IV.5** : Tableau Récapitulatif des résultats des Essais d'identification de la GNT

<b>L'essai caractéristique de la fabrication</b>	<b>résultat</b>	<b>Interprétation des résultats</b>
Propreté superficielle	0.93%	0.93 < 2%. Propre
L'équivalent de sable a 10 %	47% < 70%	Pas argileux
Le coefficient d'aplatissement	11%	Rond < 30%
<b>L'essai caractéristique de la propriété intrinsèque</b>		
Masse volumique apparent	1.74kg/cm <sup>3</sup>	Matériau dense
Masse volumique absolue	2.601g/cm <sup>3</sup>	(peu de vide)
<b>Résistance à l'usure et aux chocs</b>		
Essaie micro-Deval	14% < 25%	La GNT est assez dure
Essai los Angeles	LA= 29% < 30%	La GNT est assez dure

D'après le tableau précédent, on remarque que la GNT analysée est dense, propre et dure.

**IV.2.2 Matériau Verre :**

On présente sur le tableau IV.6 les résultats des Essais d'identification du verre broyé

**Tableau IV.6 :** Tableau Récapitulatif des résultats des Essais d'identification du verre broyé

<b>Essaie d'identification de verre (3.15-0.08)</b>	<b>Les résultats</b>
Equivalent sable	69%
Masse volumique apparent	1.54 g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique absolue	2.45g/cm <sup>3</sup>
MDE	15<25%
Taux de carbonate	0.001
VB	0

D'après le tableauIV.6, on remarque que l'échantillon de verre broyé : propre et moins dens

**Chapitre V : les essais de portance et de perméabilité****V.1 Introduction :**

Après avoir réalisé les essais de caractérisation et d'identification des matériaux granulaires, ce chapitre présente une série d'essais de laboratoire qui servent à évaluer le comportement et l'efficacité des matériaux utilisés en technique routière. La performance mécanique et hydrique des mélanges préparés (GNT + verre) a été évaluée par les trois essais suivants:

**-Essai Proctor**

**-Essai CBR**

**-Essai de perméabilité**

Ces trois essais ont été choisis, car ils permettent d'évaluer les paramètres les plus importants et ayant le plus d'impact lors de la conception d'une route. Dans un premier temps, essai Proctor et CBR d'un matériau permet d'évaluer le comportement mécanique et la rigidité des matériaux utilisés. L'essai de perméabilité mesure la conductivité hydraulique d'un matériau granulaire ce qui permet d'évaluer la capacité de drainage d'une structure de chaussée saturée en période critique.

La réalisation de ce programme d'essais a pour objectif de formuler des mélanges qui contiennent la GNT avec différents pourcentages de verre recyclé pour les deux formes angulaire et arrondie (Figure V.1), et ce afin d'examiner l'influence et l'impact d'utilisation de ces deux formes du verre dans la construction routière.



**Figure V.1 :** préparation du mélange (GNT+ verre) pour les deux formes angulaire et arrondie.

## V.2 Définition du compactage

Le compactage est une réduction de volume du sol presque instantanée due à la réduction des vides remplis d'air. Plus les grains seront resserrés les uns contre les autres, meilleure sera la résistance du sol au cisaillement et meilleur sera le comportement des remblais et couches de chaussées ; on recherche donc l'indice des vides le plus petit possible (correspondant au pic de la courbe Proctor).

Le compactage améliore les propriétés mécaniques du sol remanié (Figure V.2). Il complète l'effet de stabilisation par remplissage des vides par le liant. Le liant augmente la rigidité (répartition des charges) et diminue l'attrition des gros éléments.



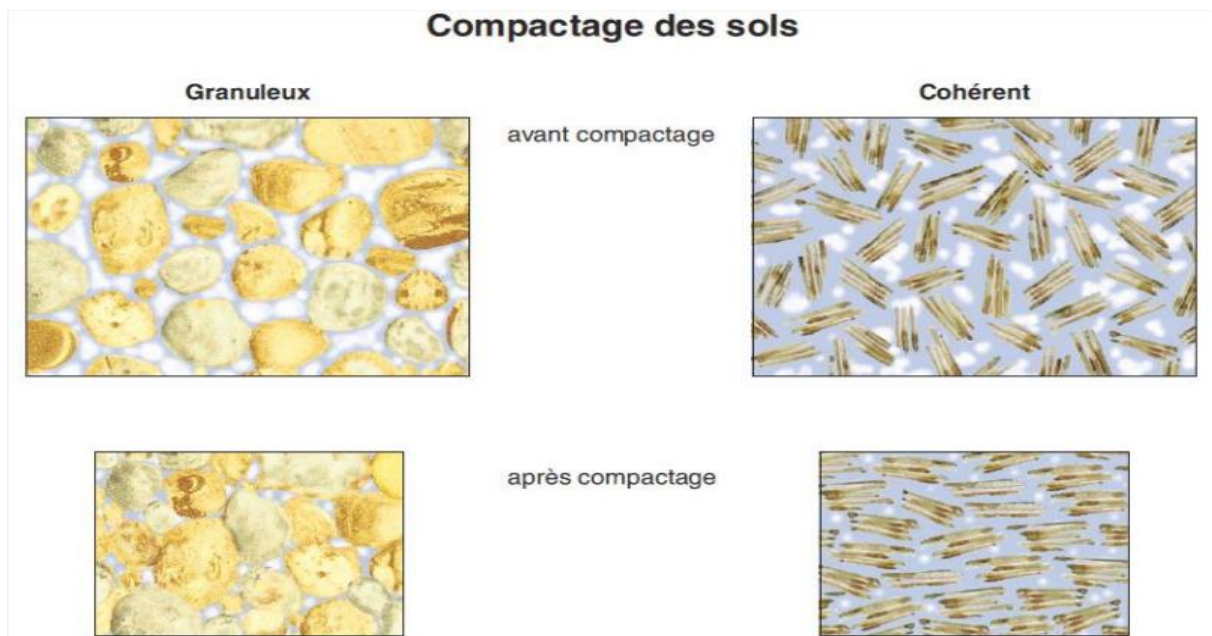
**Figure V.2:** Le compactage de couches d'assise de chaussée avec un compacteur cylindrique et pneumatique.

En général, après le compactage, le sol acquière :

- Une augmentation de de la capacité portante et de la densité sèche.
- Une diminution de la perméabilité.

### V.3 Rôle du compactage sur la durée de vie des ouvrages

Le compactage met le matériau dans un état suffisamment serré de telle sorte qu'un tassement ultérieur soit impossible. Les mouvements relatifs sont réduits ou supprimés. En réduisant le volume des vides, le compactage augmente la densité apparente sèche et diminue la perméabilité qui est fonction de l'indice des vides (Figure V.3).



**Figure V.3** : influence de compactage sur les grains de sol.

Le compactage entraîne une élévation des caractéristiques mécaniques. En effet, le resserrement des grains augmente le nombre de contacts entre eux et par conséquent leur frottement. L'angle de frottement interne et la cohésion en sont accrus. Il y a également augmentation considérable du module de déformation.

### V.4 Effet de compactage sur la perméabilité :

Le compactage fait diminuer la proportion des vides dans le sol, d'où une diminution de la perméabilité, ce qui limite la quantité d'eau qui peut circuler. La diminution de la perméabilité constitue un inconvénient dans le cas des sols pulvérulents, utilisés comme

matériaux de fondations, dont on a besoin d'éliminer l'eau rapidement Il est évident que le volume des interstices joue un rôle important, dans la perméabilité, car plus la structure d'un matériau est lâche, plus les vides entre les grains augmentent, donc la perméabilité est directement proportionnel au compactage, mais l'objectif de diminution de ce facteur (perméabilité), varie suivant la nature de l'ouvrage. Pour les assises de chaussées, il faut noter encore que les exigences d'imperméabilité ne sont pas du tout les mêmes, suivant qu'il s'agit d'une couche de surface qui doit impérativement être étanche, ou d'une couche de fondation qui dans certains cas, pourrait même avoir intérêt à être quelque peu perméable.

### **V.5 Essais de portance et de perméabilité :**

#### **V.5.1 Essai 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 différentes 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 ( $\gamma_d \text{ max}$ ).

Le moule utilisé c'est le moule CBR (California Bearing Ratio) pour des matériaux de dimensions inférieures à 20mm ( $\phi$  moule = 152 mm ; H = 152 mm).

On va effectuer l'essai Proctor modifié, car il est caractérisé par son énergie de compactage plus importante, il est utilisé pour les couches de chaussées, ce qui est le cas de cette étude.

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 sec 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 modifié suivant l'essai réalisé.

Pour la réalisation de l'essai Proctor, on suivra les étapes suivantes :

- Séchage de l'échantillon de sol à l'étuve à 105°C pendant 24h.
- échantillonnage de GNT pour garder l'homogénéité.
- L'élimination d'élément > 20 mm
- Pesage de l'échantillon de 6000 gr
- Préparation de 5 mélanges à des teneurs différentes
- Partage l'échantillon en 5 masses, chacune de 1050 gr.
- Mettre les 5 masses successivement dans le moule en appliquant 56 coups/ couche et en utilisant la dame Proctor automatique.
- Pesage de l'échantillon compacté
- Calcul de la densité Proctor :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w}$$

L'essai Proctor exige l'utilisation du matériel suivant (Figure V.4)

- Moule CBR ;
- Dame automatique Proctor modifié ;
- Règle à araser ;
- Balance ;
- Étuve ;





Figure V.4: Matériel utilisés pour l'essai Proctor.

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

- GNT (matériau de référence) ;
- GNT + 10 % VERRE (arrondie et angulaire), en substituant la fraction 2/3,15 mm.
- GNT + 20 % VERRE (arrondie et angulaire), en substituant les 2 fractions 2/3,15 mm et 0,63/2 mm.
- GNT + 30 % VERRE (arrondie et angulaire), en substituant les 3 fractions 2/3,15 mm, 0,63/2mm et 0.080/0,63 mm.

## V.5.2 Expression des résultats des essais Proctor:

A- Échantillon de GNT de référence:

Tableau V.1 : Résultat de l'essai Proctor modifié sur la GNT

Teneur en eau (W) En %	Poids de sol humide gr	Poids de sol sec gr	Densité sèche (Yd) En KN/m <sup>3</sup>
2.4	4827	4714.22	2.23
4.27	5048	4841.06	2.29
6.21	5052	4756.5	2.25
8.36	5063	4671.94	2.21

On peut retenir que  $Yd_{max} = 2.29 \text{ kN/m}^3$  correspondant une teneur en eau optimale  $W_{opt} = 4.27\%$  (Figure V.5).

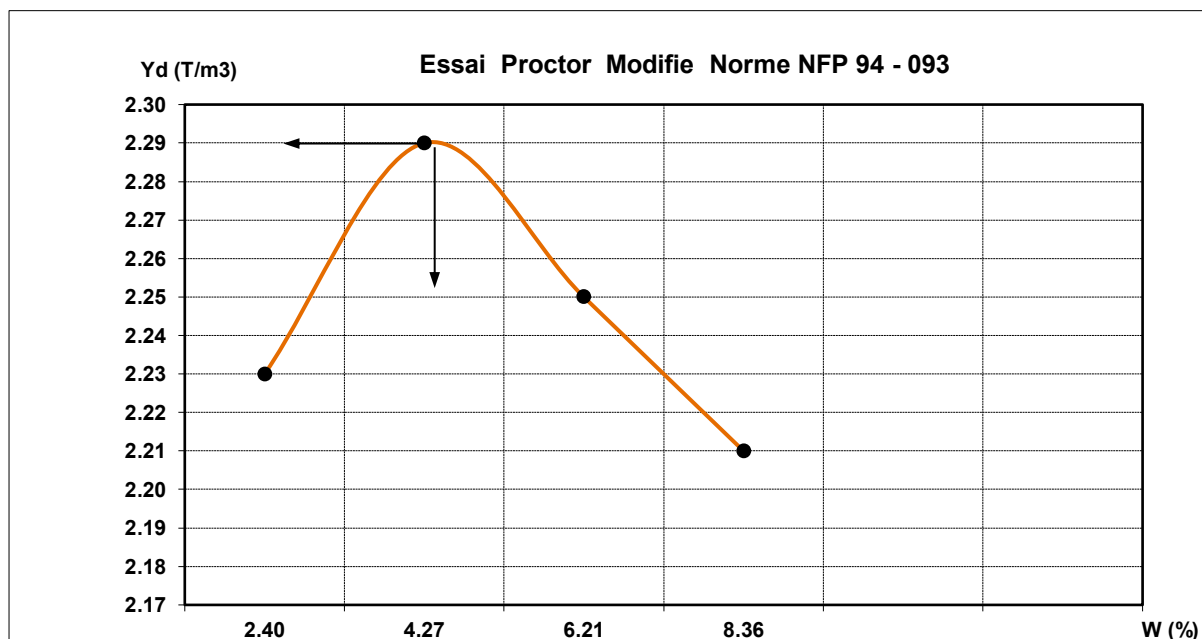


Figure V.5: courbe Proctor modifié de la GNT de référence.

**B- Mélange de GNT + particules de verre de forme arrondie :**

Les résultats des essais Proctor sur les mélanges de GNT + du verre recyclé de forme arrondie sont résumés dans les tableaux V.2, V.3 et V.4 selon le pourcentage de substitution.

**Tableau V.2: GNT + 10% de verre (2/3.15)**

<b>Teneur en eau (W) En %</b>	<b>Poids de sol humide gr</b>	<b>Poids de sol sec gr</b>	<b>Densité sèche (Yd) En KN/m<sup>3</sup></b>
2.4	4827	4714.22	2.23
4.21	5001	4798.78	2.27
6.25	5031	4735.36	2.24
8.33	5015	4629.66	2.19

Les Figures V.6, V.7 et V.8 représentent les courbes Proctor relatives aux différents mélanges de GNT et du verre broyé de forme arrondie.

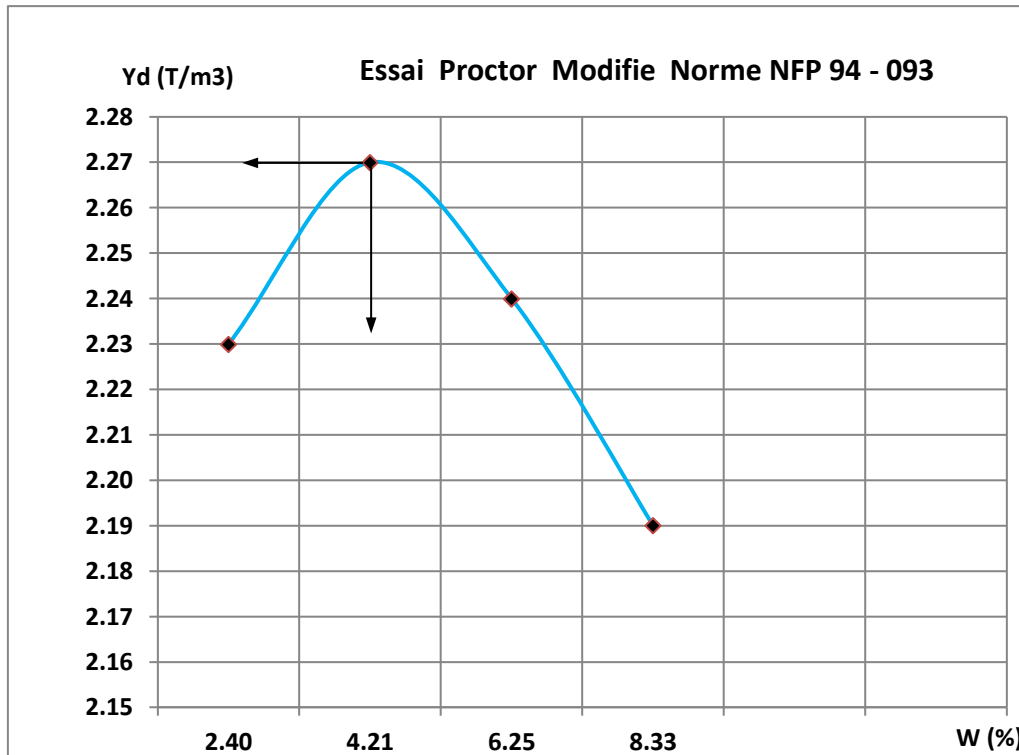


Figure V.6: courbe Proctor modifié de la GNT + 10% de verre de forme arrondie.

Tableau V.3 : GNT + 20% de verre [(2/3.15) ;(0.63/2)].

Teneur en eau (W) En %	Poids de sol humide gr	Poids de sol sec gr	Densité sèche (Yd) En KN/m <sup>3</sup>
1.29	4545	4477.05	2.15
3.32	4722	4570.53	2.19
5.28	4746	4507.92	2.16
7.26	4723	4403.57	2.11

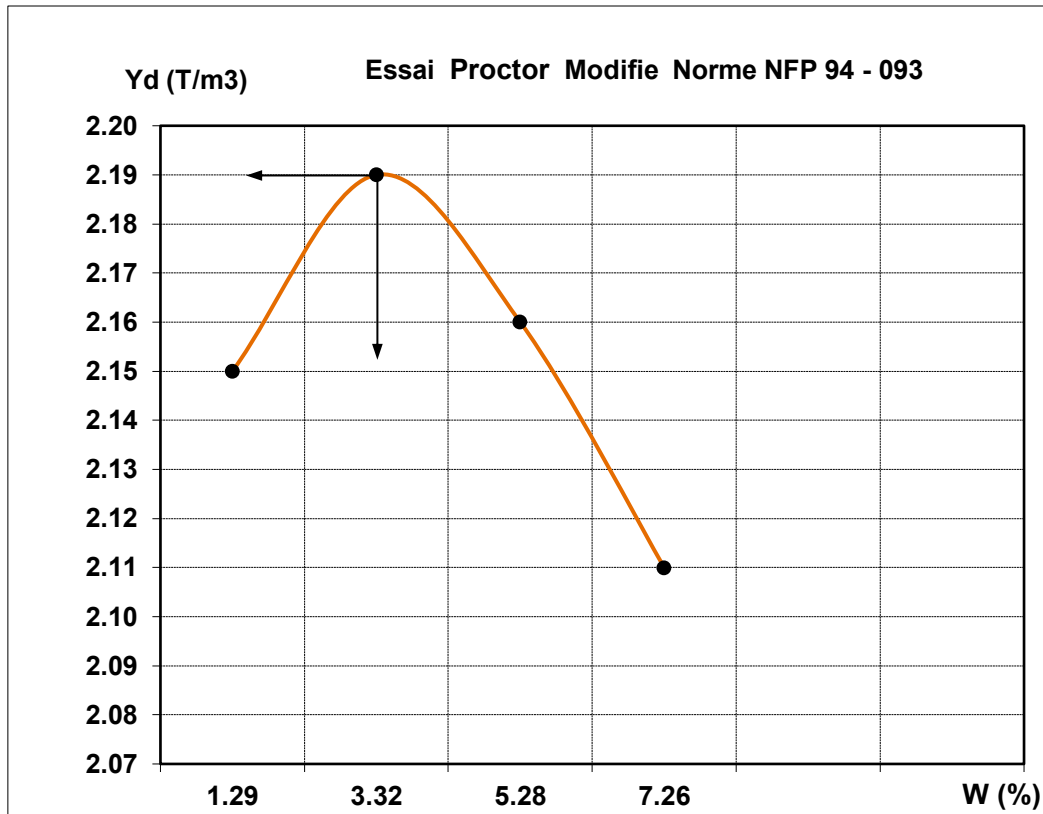


Figure V.7: courbe Proctor modifié de la GNT + 20% de verre de forme arrondie.

Tableau V.4 : GNT + 30% de verre [(2/3.15) ;(0.63/2) ;(0.08/0.63)].

Teneur en eau (W) En %	Poids de sol humide gr	Poids de sol sec gr	Densité sèche (Yd) En KN/m <sup>3</sup>
1.92	4616	4528.79	2.17
3.95	4795	4612.27	2.21
5.96	4843	4570.53	2.19
7.91	4865	4507.92	2.16

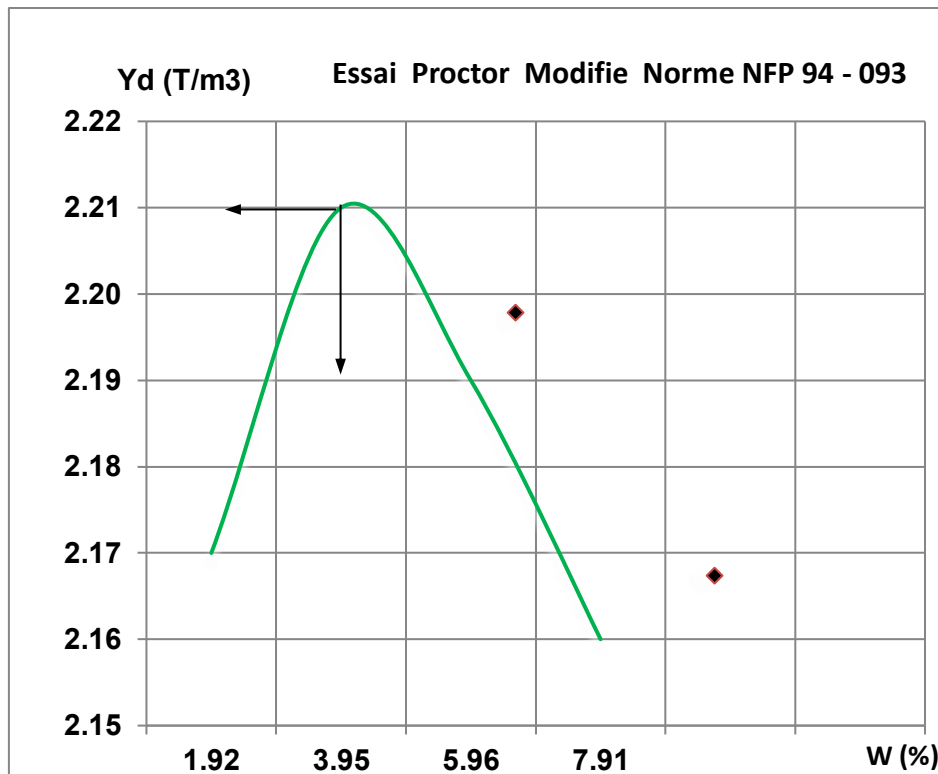


Figure V.8: courbe Proctor modifié de la GNT + 30% de verre de forme arrondie.

On représente sur la figure V.9 les courbes Proctor des différents mélanges de GNT + verre de forme arrondie.

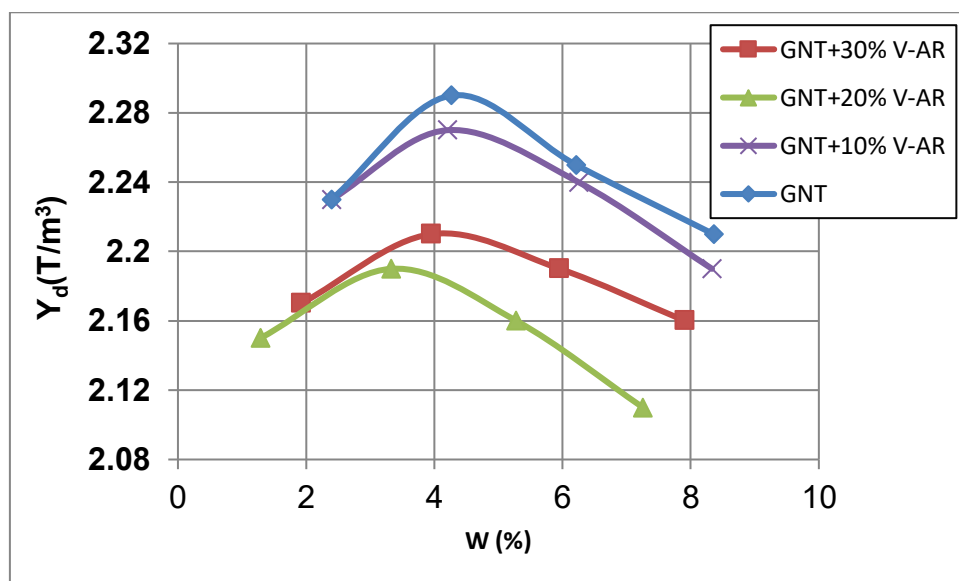


Figure V.9 : Courbes Proctor Modifié des différents mélanges de GNT + verre de forme arrondie.

On remarque que les courbes Proctor des différents mélanges contenant des particules de verre de forme arrondie sont situées toutes en dessous de celle relative à la GNT. Ceci s'explique par le fait que le matériau GNT ( $1,74 \text{ g/cm}^3$ ) est plus dense que le déchet de verre ( $1,4 \text{ g/cm}^3$ ). La légère augmentation de la densité sèche pour le mélange contenant 30% de verre s'explique par l'ajout de la fraction fine (0.080/0.63mm) qui diminue les vides intergranulaires du mélange.

**C- *Mélange de GNT + particules de verre de forme angulaire :***

Les résultats des essais Proctor sur les mélanges de GNT + du verre recyclé de forme angulaire sont résumés dans les tableaux V.5, V.6 et V.7 selon le pourcentage de substitution.

**Tableau V.5:** GNT + 10% de verre (2/3.15)

<b>Teneur en eau (W) En %</b>	<b>Poids de sol humide gr</b>	<b>Poids de sol sec gr</b>	<b>Densité sèche (Yd) En KN/m<sup>3</sup></b>
2.24	4863	4756.50	2.25
4.27	5048	4841.06	2.29
5.25	5031	4735.36	2.24
8.28	5013	4629.66	2.19

Les Figures V.10, V.11 et V.12 représentent les courbes Proctor relatifs aux différents mélanges de GNT et du verre broyé de forme angulaire.

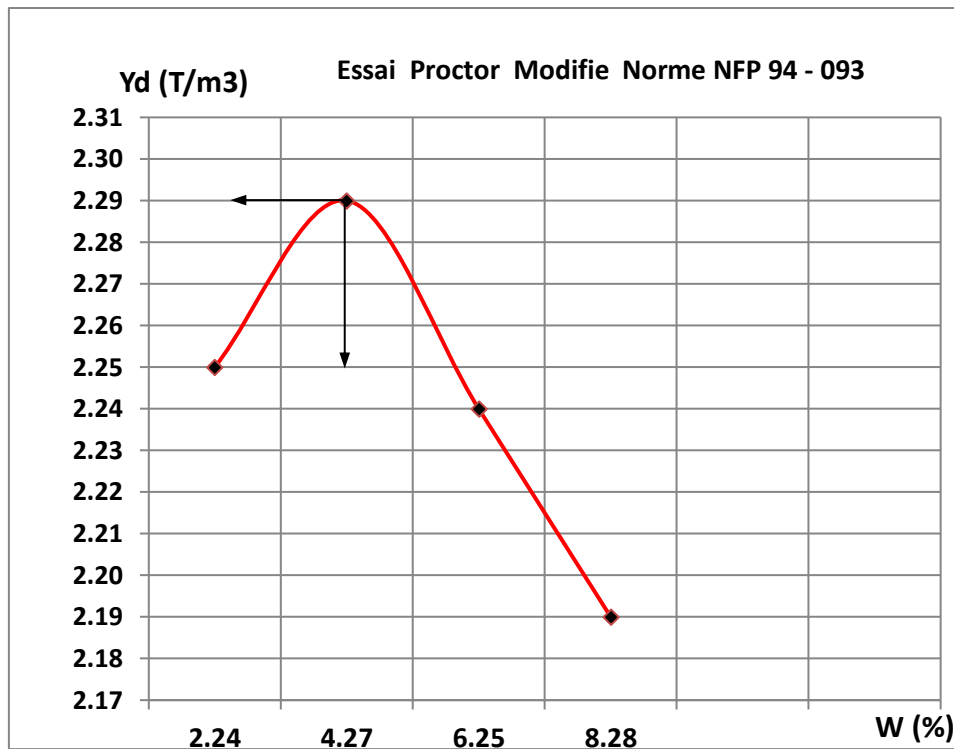


Figure V.10: courbe Proctor modifié de la GNT + 10% de verre de forme angulaire

Tableau V.6 : GNT + 20% de verre [(2/3.15mm) ;(0.63/2mm)].

Teneur en eau (W) En %	Poids de sol humide gr	Poids de sol sec gr	Densité sèche (Yd) En KN/m <sup>3</sup>
1.33	4953	4888.35	2.13
3.32	5146	4980.15	2.17
5.35	5198	4934.25	2.15
7.37	5199	4842.45	2.11



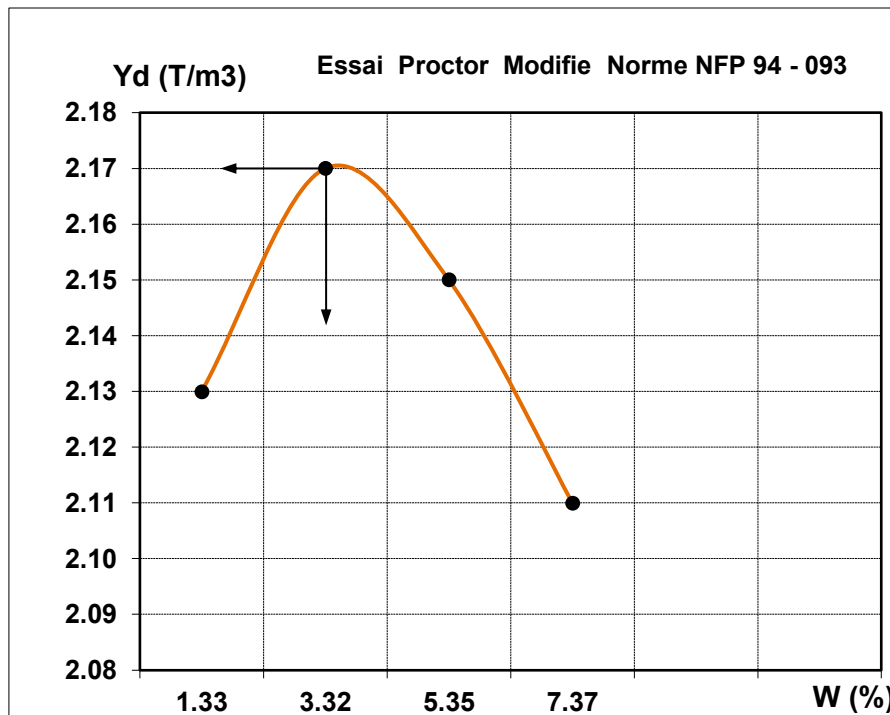


Figure V.11: courbe Proctor modifié de la GNT + 20% de verre de forme angulaire

Tableau V.7: GNT + 30% de verre [(2/3.15mm) ;(0.63/2mm) ;(0.08/0.63mm)].

Teneur en eau (W) En %	Poids de sol humide (gr)	Poids de sol sec gr	Densité sèche (Yd) En KN/m <sup>3</sup>
2.01	4963	4865.4	2.12
3.95	5129	4934.25	2.15
5.97	5132	4842.45	2.11
7.99	5180	4796.55	2.09

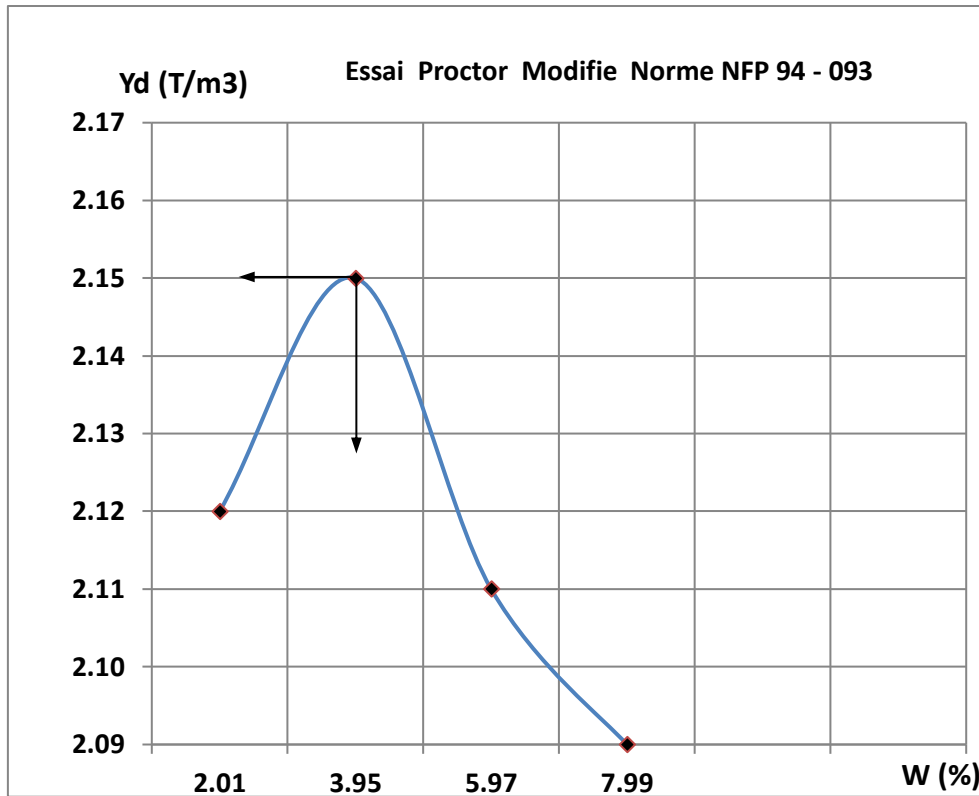


Figure V.12: courbe Proctor modifié de la GNT + 30% de verre de forme angulaire

On représente sur la figure V.13 les courbes Proctor des différents mélanges de GNT + verre de forme angulaire.

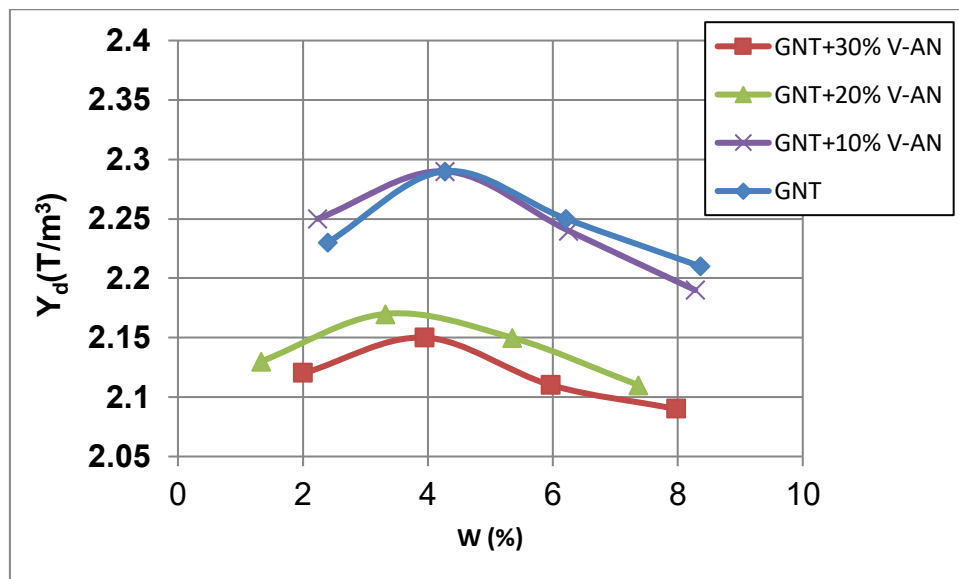


Figure V.13: Courbes Proctor Modifié des différents mélanges de GNT + verre de forme angulaire

On remarque que la substitution de la fraction 2/3.15mm par des particules de verre de forme arrondie n'a pas influé sur la densité sèche du fait que le compactage des grains de verre de forme angulaire provoque la cassure de ces derniers ce qui contribue à une bonne compactabilité du mélange.

Pour les mélanges contenant des particules de verre de forme angulaire à 20% et à 30%, la densité sèche diminue, car la masse volumique apparente du verre est plus faible que celle de la GNT.

Le tableau V.8 récapitule les principaux résultats des essais Proctor (densité sèche max et Teneur en eau Optimale) réalisés sur les différents mélanges.

**Tableau V.8:** Évolution des teneurs en eau optimales et des densités sèches maximales en fonction du pourcentage du verre.

GNT + %verre	Densités sèches Max ( $\gamma_{dmax}$ ) (t/m <sup>3</sup> )	Pourcentage de variation de $\gamma_{dmax}$ (%)	Teneurs en eau optimales ( $W_{opt}$ )
GNT seule	2.29	/	4.27
GNT +10 %verre arrondie	2.27	-0,9	4.21
GNT +10 %verre angulaire	2.29	0,0	4.27
GNT + 20%verre arrondie	2.19	-4,4	3.32
GNT +20 %verre angulaire	2.17	-5,2	3.32
GNT +30 %verre arrondie	2.21	-3,5	3.95
GNT +30 %verre angulaire	2.15	-6,1	3.95

Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes, pour les deux paramètres densité et teneur en eau optimale (Figure V.14 et V.15).

On remarque que la diminution de la densité sèche pour les mélanges contenant 20 et 30% de verre est relativement plus importante pour les particules de verre de forme angulaire que pour les grains de verre de forme arrondie.

Concernant les teneurs en eau optimales pour les différents mélanges, en remarque que ce paramètre diminue légèrement du fait que le verre n'absorbe pas de l'eau, mais il est nécessaire pour la maniabilité du mélange.

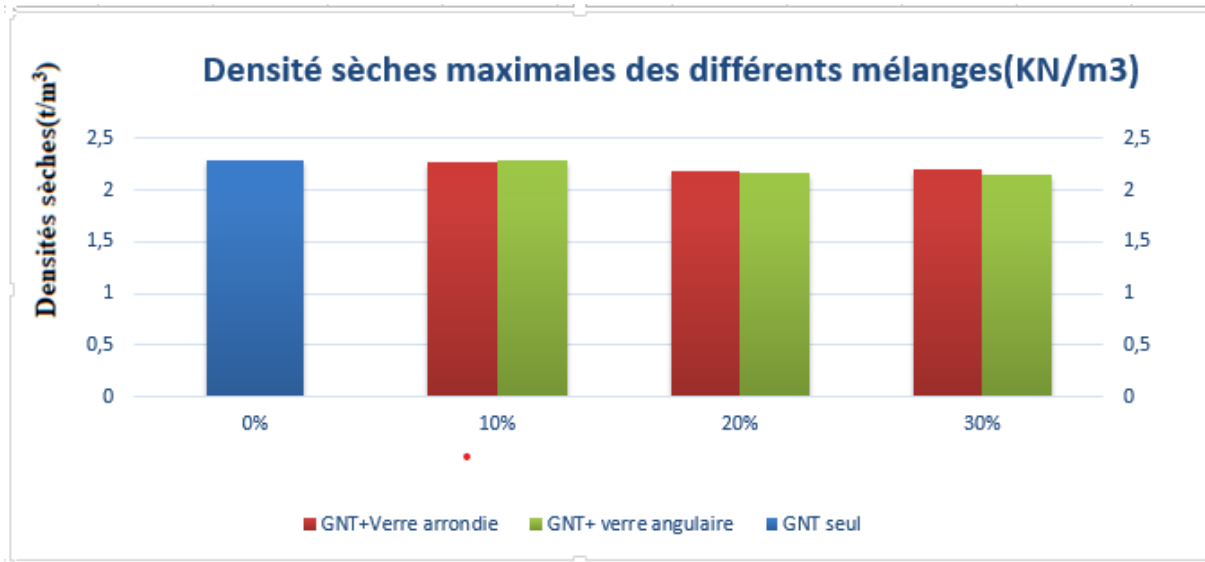


Figure V.14 : Evolution des densités sèches en fonction du pourcentage de verre.

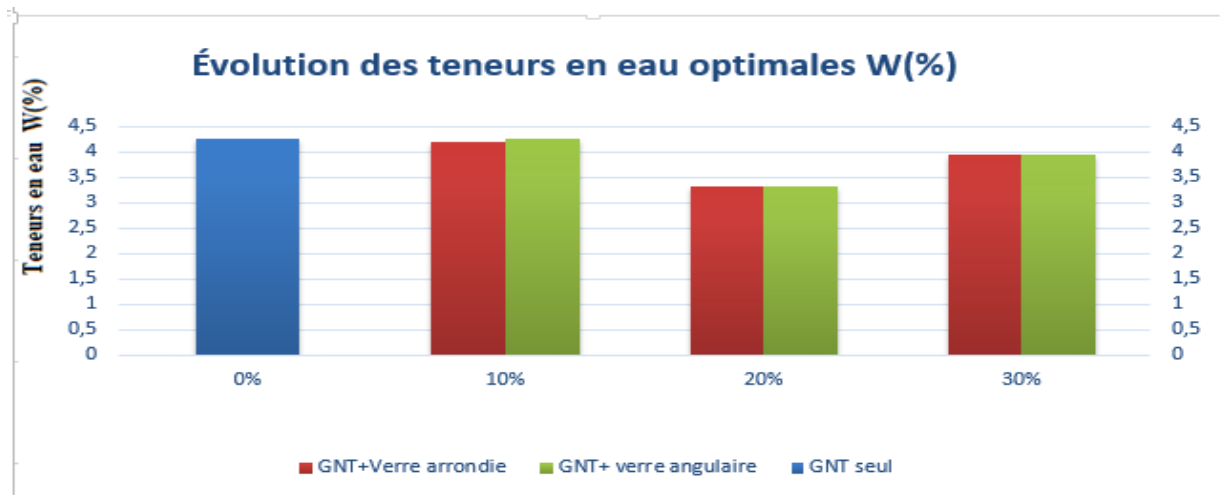


Figure V.15 : Évolution des teneurs en eau optimales en fonction du pourcentage de verre.

**V.5.3. Essais CBR:**

L'essai CBR est l'un des principaux essais routiers, il été développé en 1929 par les ingénieurs Stanton Porter du département des routes de Californie. Cet essai a pour but, d'évaluer la portance (résistance au poinçonnement) du sol ou d'un matériau utilisé dans la construction des ouvrages en terre ou des assises de chaussées, c'est-à-dire sa résistance à la rupture (l'aptitude des matériaux à supporter les charges), cette caractéristique est indispensable dans les travaux routiers, en particulier pour la confection des remblais et les couches de forme, dans lesquels on ne peut admettre que de faibles déformations.

Le matériau est compacté à la teneur en eau optimale suivant les procédures de l'essai Proctor modifié : moule CBR qui sera compacté de 56/25/10 coups par couche (5 couches). On poinçonne ensuite le moule avec un piston de 19,35cm de diamètre à une vitesse de 1,27 mm/min.

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

- ***Indice portant à 2.5mm = Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en kN) \* 100 /13.35.***
- ***Indice portant à 5mm = Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN) \* 100 / 20.***

Pour la réalisation de l'essai, on suivra les étapes suivantes :

- Etuvage de l'échantillon à 105°C pendant 24h.
- Échantillonnage de GNT pour garder l'homogénéité.
- Élimination d'élément > à 20 mm <30%(8%)
- Pesage d'un échantillon de 6000 gr
- Ajout de l'eau correspondant à la Teneur en eau optimale W opt.
- Malaxage de l'échantillon soigneusement pour assurer une humidification uniforme.
- Partage l'échantillon en 5 masses de 1050gr chacune.
- Versement des 5 masses successivement dans le moule sachant que le nombre de (coups/ couche) est 56/25/10 coups avec une machine Proctor automatique.

- Imbibition + 4 kg charge pour 4 jours dans l'eau.

- Mise en place du moule dans la presse CBR et prise des lectures de poinçonnement de piston ( $S=19,35 \text{ cm}^2$ ) pour les instants : ( $t=1 \text{ min}$ ,  $t=1 : 40 \text{ min}$ ,  $t=2 \text{ min}$ ,  $t=4 \text{ min}$ ,  $t=6$ ,  $t=8$ )

- Mesure de la teneur en eau final.

L'essai est réalisé en utilisant le matériel suivant :

- Moule CBR ;
- Dame automatique Proctor modifié ;
- Règle à araser ;
- Balance ;
- Étuve ;
- Appareillage de poinçonnement CBR,
- chronomètre.



**Figure V.16** : Dispositif expérimental pour l'essai CBR<sub>imbb</sub>

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

- GNT de référence.
- GNT + 10 % VERRE (arrondie et angulaire).
- GNT + 20 % VERRE (arrondie et angulaire).
- GNT + 30 % VERRE (arrondie et angulaire).

Le tableau V.9 représente les résultats des essais CBR Immersion à 56 et 10 coups/couches réalisés sur les différents mélanges (GNT+ Particules de verre de forme angulaire et angulaire).

**Tableau V.9** : Résultats de l'essai de CBR 56 C/C et 10 C/C.

Echantillons	L'indice CBR immersion <b>56</b> C/C			L'indice CBR immersion <b>10</b> C/C		
	I(2,5)	I(5)	CBR imm(%)	I(2,5)	I(5)	CBR imm(%)
GNT seul	73.9	109.87	<b>109.9</b>	40.31	47.09	<b>47.1</b>
GNT +10 %verre arrondie	50.39	94.17	<b>94.2</b>	23.51	20.18	<b>20.2</b>
GNT +10 %verre angulaire	33.59	72.87	<b>72.9</b>	23.51	45.96	<b>46</b>
GNT +20 %verre arrondie	80.6	114.35	<b>114.6</b>	36.95	42.60	<b>42.60</b>
GNT +20 %verre angulaire	62.14	94.17	<b>94.2</b>	30.23	34.75	<b>34.8</b>
GNT +30 %verre arrondie	38.6	67.26	<b>67.3</b>	10.08	15.7	<b>15.7</b>
GNT +30 %verre angulaire	16.36	31.39	<b>31.4</b>	3.36	5.61	<b>5.7</b>

Pour analyser les valeurs CBR du tableau précédent, on représente les résultats sous forme d’histogrammes (Figure V.18 et V.18).

On peut remarquer que les valeurs CBR des mélanges contenant des particules de verre sont inférieures à celle de la GNT toute seule, à l’exception du mélange contenant 20% de particules de verre de forme arrondie. En comparant les deux formes de particules de verre, on peut constater que la forme arrondie donne des valeurs CBR plus élevées par rapport à la

forme angulaire. Le pourcentage optimal dans ce cas est 20%, c'est à dire le mélange contenant des particules de verre grossières et moyennes de forme arrondie.

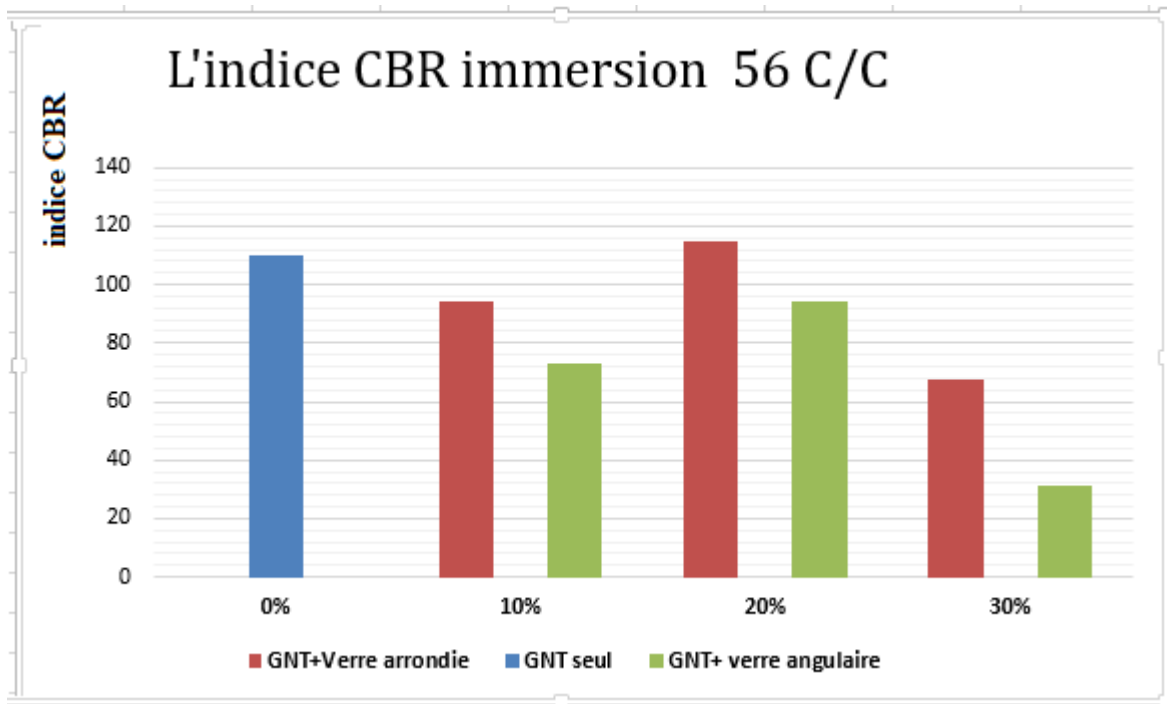


Figure V.17: Valeurs CBR à 56 c/c pour les différents mélanges.

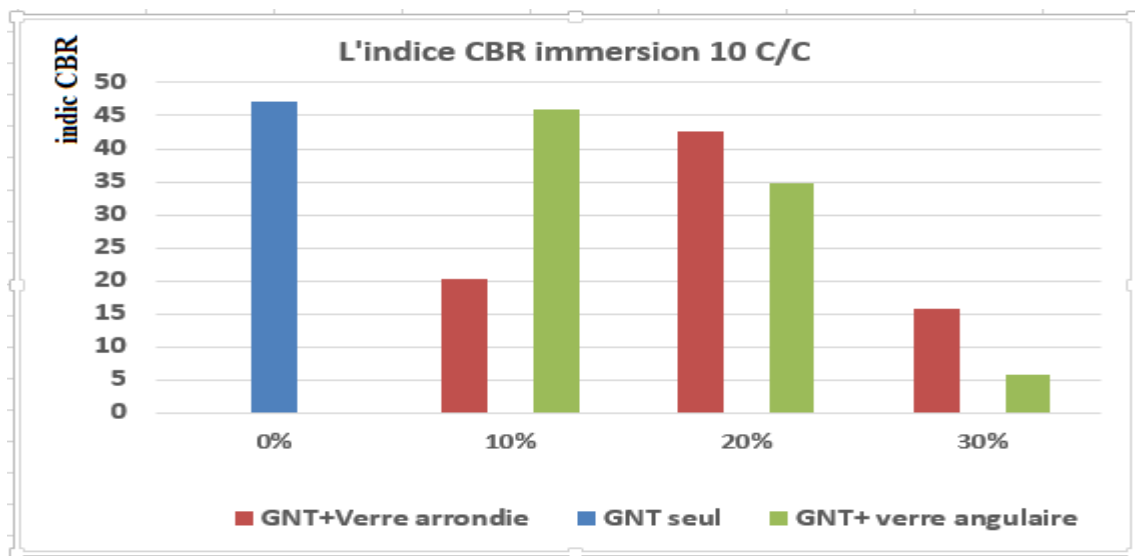


Figure V.18: Valeurs CBR à 10 c/c pour les différents mélanges.



**V.5.4. Essais de perméabilité (NF x30-442) :**

L'une des plus importantes caractéristiques physiques d'un sol est la perméabilité. Afin de déterminer l'effort appliqué au sol, on doit déterminer sa perméabilité. La perméabilité se diffère d'un sol à un autre, l'eau s'installe à l'intérieure des vide qui se trouve entre les grains. L'eau qui peut être expulsé de ce vide à l'aide d'évaporation ou à l'aide de chargement extérieure qui provoque le phénomène de tassement qui évolue dans un temps considérable c'est ce qu'on appelle un tassement de consolidation.

Le coefficient de perméabilité d'un sol saturé est une caractéristique qui dépend de sa granularité, de sa nature, de sa structure, de son indice de vide et de la température. La taille maximale des granulats ne doit excéder 20 mm pour le type de perméamétrie utilisé. L'essai est en général limité aux matériaux contenant moins de 10% de particules fines (passant 80  $\mu\text{m}$ ), de manière à ce que la saturation se fasse dans un temps réaliste et que l'influence de la consolidation ne soit pas ressentie durant l'essai. Plus un sol est fin ou compact, plus les pores sont petits, plus le frottement et la perte de charge sont importants et plus le coefficient de perméabilité est petit.

La perméabilité d'un sol peut-être déterminé en laboratoire ou in situ. La méthode de laboratoire consistent à prélever un échantillon de sol et mesuré sa perméabilité à l'aide d'un perméamètre. Les mesures sont effectuées soit avec une perméabilité à charge constante, quand il s'agit de grandes perméabilités (gravier et sable qui ont généralement une perméabilité  $K > 10^{-5}$  m/s), soit avec un permètre à charge variable, quand il s'agit de mesurer de faible perméabilités des argiles et marnes ou l'on peut avoir une perméabilité  $K < 10^{-8}$  m/s).

La hauteur hydraulique est déterminée de manière à ce que la pression ne provoque pas un écoulement trop brusque qui aurait pour effet d'entraîner des particules fines et donc modifier le comportement de l'échantillon. L'essai s'effectue à charge constante. Il faut toutefois être attentif lors de la saturation car il peut arriver qu'il y ait un écoulement préférentiel, ce qui amènerait une reprise de l'essai. Cet écoulement préférentiel peut être provoqué lors de la compaction de l'échantillon ou dans la préparation du montage. Une mauvaise compaction peut faire varier la proportion de vides dans l'échantillon et créer ainsi des chemins préférentiels au passage de l'eau. Le débit d'eau recueilli suite à la saturation se mesure avec un cylindre gradué et un chronomètre. Lorsque l'eau captée à la sortie est environ égale à

celle qui entre, c'est signe que le niveau de saturation est près de 100%. L'essai s'effectue sur deux moules identiques en même temps et est répété plusieurs fois afin d'assurer la validité du coefficient de perméabilité calculé.

Le coefficient de perméabilité  $k$ , s'obtient à l'aide de la loi de Darcy où seulement le volume d'eau accumulé et le temps varient. L'équation de la loi de Darcy s'applique car le régime d'écoulement dans l'échantillon est lent et laminaire. L'essai s'effectue à charge variable.

$$K:(Q*L)/(t*S*h)$$

**K** : coefficient de perméabilité. / **S** : section d'échantillon.

**L** : Hauteur de l'échantillon. / **Q**: volume recueilli pendant un temps

**H**: charge hydraulique / **t** : temps nécessaires pour la charge passe.

Et on a utilisé la forme suivant pour calculer la perméabilité **K** :

$$K: [(L*a)/(t*S)]*Ln(h_1/h_2)$$

**t**: temps nécessaires pour la charge passe. / **a**: section de tube

**s**: section d'échantillon. / **h<sub>1</sub>** : charge hydraulique initiale.

**h<sub>2</sub>** : charge hydraulique final.

#### A- Exécution de l'essai :

- *Confection de l'échantillon*

- l'échantillon doit remplir la section disponible entre les parois de perméamètre pour mesurer seulement la perméabilité de l'échantillon.

-on monte le corps de perméamètre sur l'un des embases et en protège la pierre poreuse avec une rondelle de papier filtre. Le papier filtre doit recouvrir complètement la pierre poreuse afin d'éviter la fuite de l'eau.

-Par manque de pierres poreuses pour le grand moule (CBR), on a utilisé le petit moule dans lequel on verse progressivement le matériau en 3 couches et en appliquant 25cc/couche, ce qui correspond en fait au Proctor normal et non pas modifié comme ça devrait se faire.

– On place une rondelle de papier sur l'échantillon puis pierre poreuse. Ensuite on pose l'ensemble sur le perméamètre.

-Enfin, on raccorde les canalisations souples au perméamètre de façon que le courant liquide qui traversera ultérieurement l'échantillon soit ascendant.

- ***Saturation de l'échantillon et des circuits de mesure :***

-On met le système de mesure en eau et on chasse les bulles d'air qu'elles apparaissent dans les circuits hydrauliques.

-On laisse l'eau s'écouler librement à travers l'échantillon pour obtenir un régime permanent d'écoulement.

-On débute de prendre les mesures après dix minutes pour avoir une bonne saturation et des résultats de haute précision.

- ***Les mesures au perméamètre :***

-Ouvrir la vanne  $R_2$  afin de faire remonter l'eau dans le tube de mesure jusqu'à un niveau légèrement supérieur à  $h_1$ .

-Referme  $R_2$  puis  $R_1$

-Réouvrir  $R_2$  et lancer un chronomètre.

-laisser descendre le niveau jusqu'au repère  $h_2$ , au-dessous du plan de sortie, et noter le temps  $t_1$  écoulé et fermer  $R_2$

-Recommencer l'essai plusieurs fois.

- ***L'appareillage de l'essai:***

-Le perméamètre utilisé pour la manipulation est de section cylindrique. Il est composé d'une cellule rigide de section constante fermée à chacune de ses deux extrémités par une pierre poreuse avec accessoires : un tube de verre fermé en Bas avec un robinet, des tubes.

-un panneau de tube piézométrique à déficient niveau (Figure V.20).

-un support de perméamétrie avec accessoires.

-chronomètre : pour déterminer le temps de d'écoulement.

-l'échantillon de sol

-un réservoir d'eau

-une éprouvette graduée

-Un panneau de mesure constitué essentielles d'un bac à niveau constant, d'un tube piézométrique et une règle gradué

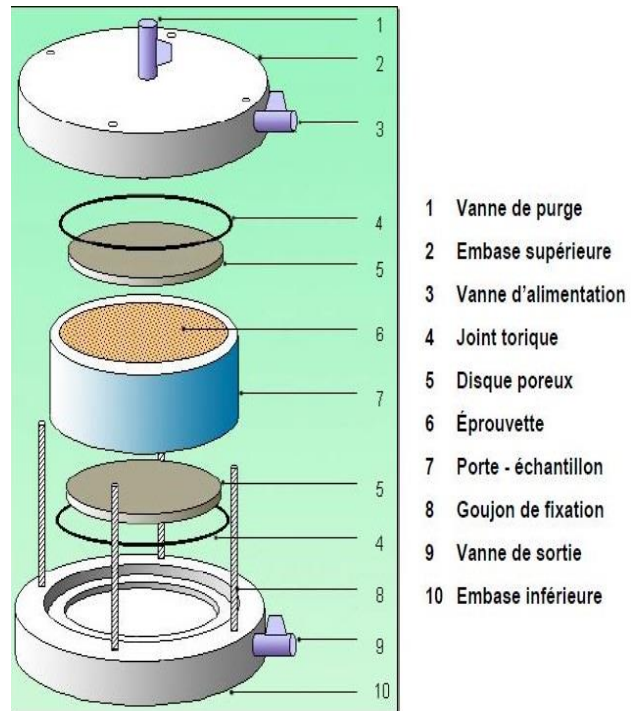


Figure V.19 : le moule du perméamètre.



Figure V.20 : l'exécution et l'appareillage d'essai de perméabilité.

### B- Expression des résultats :

Le tableau V.10 représente les résultats des essais de perméabilité à charge variable réalisés sur les différents mélanges (GNT+ Particules de verre de forme angulaire et angulaire).

Tableau V.10: Résultats de l'essai de perméabilité **K** à charge variable.

échantillon	Temps (s)	H1 (cm)	H2 (cm)	$\Delta H$	Coef de perméabilité K (m/s)
GNT seul	60	126,9	50,8	76,1	0,003581049
GNT +10 %verre arrondie	42,32	126,9	64	62,9	0,00379612
GNT +10 %verre angulaire	60	126,9	96,76	30,14	0,001060682
GNT +20 %verre arrondie	63,2	126,9	44,97	81,93	0,00385241
GNT +20 %verre angulaire	59,3	126,9	59,13	67,77	0,00302237
GNT +30 %verre arrondie	60	126,9	61,22	65,22	0,002851239
GNT +30 %verre angulaire	60	126,9	35,63	91,27	0,004968514

Les résultats sont représentés sous forme d'histogrammes sur la figure V.21.

On remarque que les mélanges contenant des particules de verre de forme arrondie offrent une perméabilité élevée et ce d'autant plus que le pourcentage du verre est plus élevé. Ceci s'explique par le fait que les particules de verre de forme arrondie laissent des vides intergranulaires, ce qui facilite le passage de l'eau.

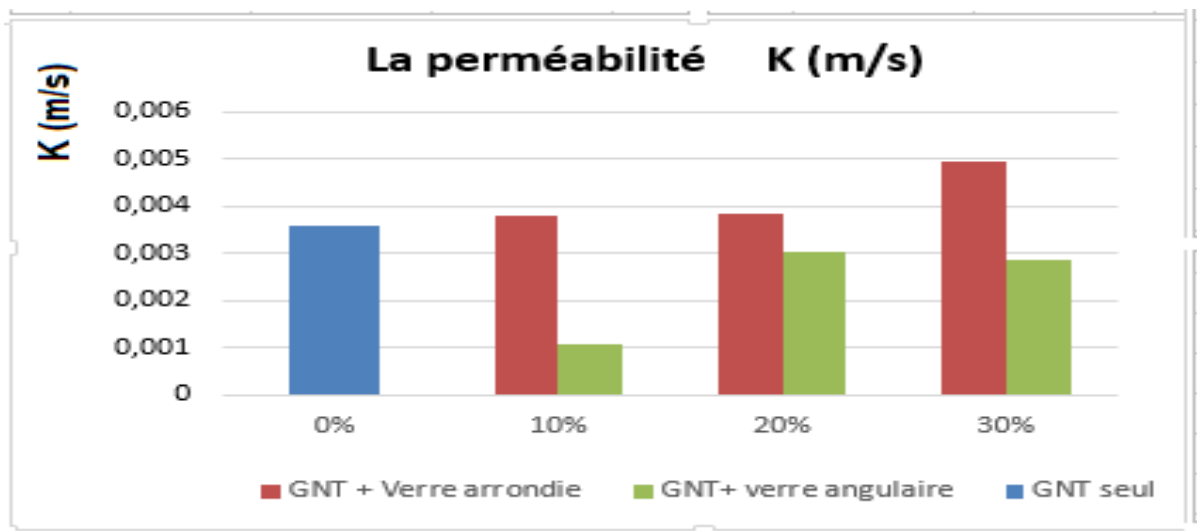


Figure V.21 : Coef de perméabilité  $K$  pour les différents mélanges

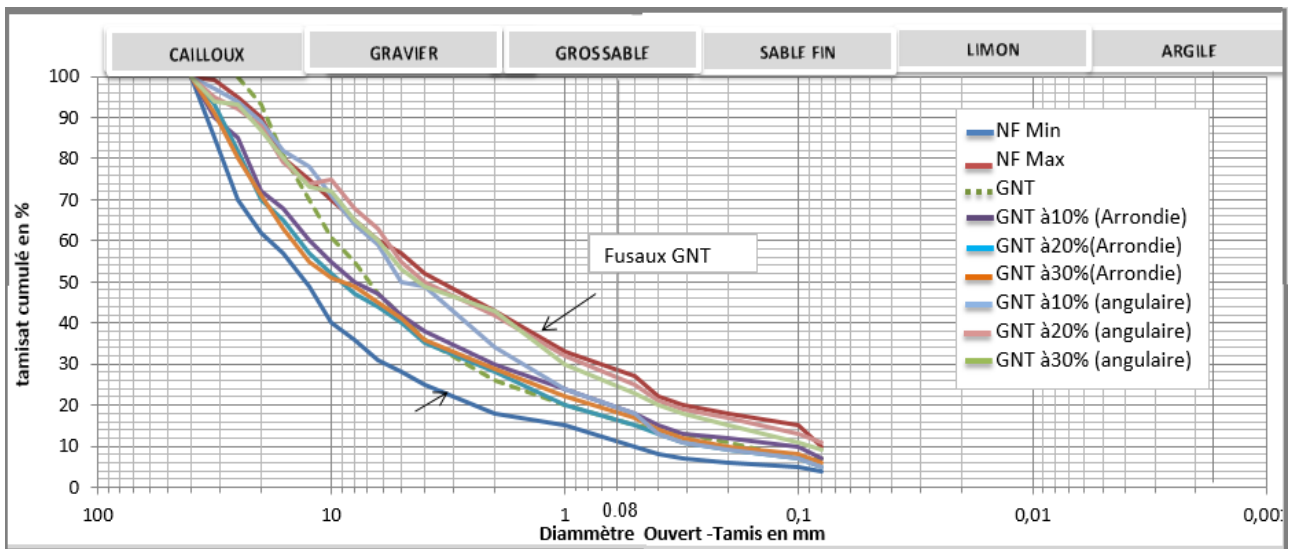
#### V.5.5. Analyse granulométrie après compactage :

Afin de voir l'évolution de la grosseur des grains des particules de verre ajoutés dans la GNT après compactage, on a procédé à l'analyse granulométrique des échantillons utilisés pour la confection des moules Proctor préparés à la teneur en eau optimale.



**Figure V.22 :** l'analyse granulométrique des échantillons utilisés après compactage d'un moule Proctor Modifié

Sur la figure V.23, on montre les courbes granulométriques des différents mélanges (GNT + Particules de verre de forme angulaire et arrondie) obtenus après compactage dans le moule Proctor Modifié.



**Figure V.23:** Courbes granulométriques des Mélanges (GNT + particules de verre arrondie et angulaire) après compactage dans le moule Proctor Modifié

On remarque bien que le compactage engendre des quantités supplémentaires de fines, en particulier pour les particules de verre de forme angulaires puisqu'elles sont plus fragiles.

**V.6. Conclusion :**

À la lumière des résultats présentés ci-dessus, on peut dire que la substitution de la partie sableuse de la GNT, moyennant les fractions grossière et moyenne, par des particules de même taille mais de forme arrondie améliore le drainage des couches de chaussée et garantie en même temps leur portance.

De point de vue densité Proctor, l'utilisation des particules de verre de forme arrondie provoque une légère diminution de la densité sèche comparativement à l'utilisation des particules de forme angulaire.

Quant à la substitution de la partie sableuse de la GNT par des particules de verre de forme angulaire nous semble qu'elle n'est pas intéressante sur le plan portance.



## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

### Conclusions générales et Perspectives

L'exploitation des déchets est sans doute très limitée dans les pays en voie de développement, tandis qu'elle est très avancée dans d'autres pays, notamment les pays de l'union européenne et le Canada. En effet, dans ces pays, le recyclage des déchets a dépassé l'aspect écologique, il est devenu un facteur principal d'économie de pays. Plusieurs matériaux sont concernés (déchet de béton, céramique, papier, verre, plastique ...) et leur emploi se retrouve dans plusieurs domaines à savoir, les enrobés bitumineux, le béton de ciment, les couches de chaussée, etc. L'exploitation des déchets présente plusieurs avantages, outre la préservation des ressources naturelles, notamment les gisements alluvionnaires, il permet d'une part de libérer les espaces occupés par les décharges anarchiques de déchets, et d'autre part de diversifier les sources de granulats afin de compenser le manque de matériaux dont souffrent certaines régions. Le travail réalisé est purement expérimental, il fait partie d'une étude globale sur la valorisation des matériaux recyclés. Il vise particulièrement, l'exploitation et la valorisation de nouvelles sources de granulats industriels (débris de verre), en vue de leur utilisation dans le domaine routier (les couches de chaussées). Les mélanges reconstitués à base de la GNT à différents pourcentages de débris de verre de forme arrondie et angulaire, sont soumis aux principaux essais routiers (Proctor, CBR et perméabilité). Le but de travail est d'étudier l'influence des formes des particules de verre (forme arrondie ou bien angulaire) de dimensions comprises entre [3.15mm-0.08mm] sur la performance mécanique et hydrique de GNT (grave non traité) prise comme matériau de référence. Les essais exécutés sont principalement les essais Proctor, CBR et l'essai de perméabilité. Les particules de verre de forme arrondi ont été préparées en utilisant l'appareil Los Angeles, tandis que la forme angulaire a été obtenue en utilisant un concasseur de laboratoire. La prise de photos sur les deux échantillons montre bien la différence des deux formes. La GNT utilisée a été ramené de Rechaigua dont la roche mère est une dolomie. Concernant l'essai Proctor, on a trouvé que l'utilisation des particules de verre de forme arrondie provoque une légère diminution de la densité sèche maximale par rapport à l'utilisation des particules de verre de forme angulaire. Ceci influe sur la portance des mélanges après 4 jours d'imbibition simulant des situations défavorables de comportement des couches de chaussées. Les essais de perméabilité ont été réalisés en utilisant le petit moule correspondant à celui de Proctor Normal et cela par manque de dispositifs nécessaires au moule CBR. Ainsi, les résultats trouvés ne reflètent pas le comportement réel des couches de chaussées qui sont compactées à l'Optimum Proctor Modifié, mais vont servir à une comparaison entre les deux formes de particules de verre dans

## CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

l'étude de la perméabilité des matériaux granulaires. En fonction de ce qui précède, nous pouvons recommander, dans la valorisation du verre recyclé, d'utiliser des grains de forme arrondie plutôt que de forme angulaire et ce pour assurer à la fois une bonne portance et une bonne perméabilité des couches de chaussée. Quant à la continuité de ce travail, nous proposons d'étudier les aspects suivants : - Influence des différentes fractions séparées du verre sur le comportement hydromécanique des couches de chaussées ; - Etude de la perméabilité des couches granulaires contenant des particules de verre en utilisant le moule CBR

## Références bibliographiques

- **Arnold, G., Werkmeister, S., Alabaster, D. & NZ Transport Agency.** (2008). The effect of adding recycled glass on the performance of basecourse aggregate. Wellington, N.Z. : NZ Transport Agency.)
- **Bernard, W. (2014).** Etude et caractérisation du granulat de verre de postconsommation comme matériaux du corps de chaussées. Montréal.)
- **Cercle National du Recyclage. 2007.** La collecte le tri et le recyclage du verre des déchets ménagers et assimilés.
- **Chebrek D., 2012.** Étude du phénomène de l'orniérage des chaussées bitumineuses : cas d'une route nationale dans la wilaya de Tizi-Ouzou, mémoire de magistère, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- **Coquand R., 1978.** Routes (Circulation – Tracé – Construction), livre II, Construction et Entretien, 6eme éditions, Eyrolles.
- **DYER, T. D. et DHIR, R. K.** chemical reaction of glass cullet used as cement component, journal of materials in civil engineering , november/december 2001.
- **Dames and Moores, I. (1993).** Glass Feedstock Evaluation Project (Rapport n°B6). Seattle.
- **Etude sur l'industrie du verre ; décembre 2001,** ([www.indris.fr](http://www.indris.fr))»
- **Federal Highway Administration(2012),** U.S. Department of Transportation. À jour au 23 Avril 2012. User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction
- **Gunther Gidel M, (2001).** Comportement et valorisation des graves non traitées calcaires utilisées pour les assises de chaussées souples, thèse doctorat, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur.
- **GUIDE DU TRAITEMENT DES DÉCHETS,** Alain Damien, 2016, page 3
- **Joseph Abdo., réédité en 2009.** Voiries et aménagements urbains en béton tom1. Conception et dimensionnement.
- **K. Benabdeli, Gestion des déchets en Algérie : Entre stockage et valorisation,** [en ligne] ,30/10/2019, consulté le 27/07/2020.
- **LCPC., 1994 .**Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide Technique.

- **Leila Zeghichi**, étude des bétons basiques à base des différents granulats, thèse de doctorat, université Mohammed khider – bistra, 2006, p 7.

- **Lolias, Y., Cameron, L., Cielo, A., Cordelia, M., Gethin, B., Josefa, T., Kenneth, K. & Matthew, S. (2012)**. Research Report on the Recycling and Reuse of Materials within Civil Construction. Palmerston, Northern Territory.

- **Larsen, D. A. (1989)**. Feasibility of utilizing waste glass in pavements

- **Mme BOUZIDI .N Née BOUZIDI**, Techniques de tri des déchets, mémoire Licence en (Gestion de l'environnement minier),2020page 16.

- **Nan Su, J. S. C. (2002)**. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. Resour Conserv Recycl. Resources, conservation and recycling,

- **Wartman J, Grubb D G ET Nasim S M, (2004)**. Select Engineering, Characteristics of Crushed Glass, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE.

Les Norme:

Norme **Analyse granulométrique** (NA 2607)

Norme **Les fuseaux granulométriques** (NA 2607)

Norme **Le coefficient d'aplatissement** (NA 256/1990)

Norme **L'équivalent de sable à 10%** (NFP 18-597)

Norme **Propreté superficielle** (NA 18-591)

Norme **L'essai caractéristique de la propriété intrinsèque** (NA 255-1990)

Norme **Essai los Angeles** (NA 458/1990)

Norme **Essaie micro-Deval** (NA 457/1990)

Norme **Essai de bleu méthylène** (P 18.592)

Norme **Taux de carbonates** (NA-2789)

Norme **Essai Proctor** (NF P 94-093)

Norme **Essais de perméabilité** (NF x30-442)

Site web:

-<http://www.bafu.admin.ch>,2019

-[www.educauto.org](http://www.educauto.org)

-<http://www.vetropack.com>

-Déchets et Santé | Cancer et environnement ([cancer-environnement.fr](http://cancer-environnement.fr))

- **Jean Pierre Houdaer**, Le verre fiche informative .recyc-québec  
([www.recyquebec.gouv.qc.ca](http://www.recyquebec.gouv.qc.ca)) (10, avril).