

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20Aout 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département : Génie Civil
Ref : D012120028D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع: D012120028D

Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de
Doctorat (LMD)
En Génie Civil
Option : interaction sol structure et risque

**Réutilisation des déchets de fabrication de carrelage
dans la construction des chaussées**

Présentée par : **Loubna Belakhdar**

Soutenue publiquement le 14 /12/2020

Devant le jury composé de :

Président	Messast Salah	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur	Belachia Mouloud	Professeur	Université de Skikda
Examineurs	Rouaigia Ammar	Professeur	Université de Guelma
	Djbien Rachid	M.C.A	Université de Skikda
Invitée	HebhoubHouria	Professeur	Université de Skikda

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Cette thèse n'aurait vu le jour sans la confiance et la générosité de mon encadreur, le Professeur, Mouloud BELACHIA que je veux vivement remercier. Je voudrais le remercier d'avoir cru en mes capacités et de m'avoir laissé une grande liberté dans mon travail. La pleine confiance qu'il m'a accordée dès l'admission au programme.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mme le Dr Houria HABHOUB qui m'a toujours soutenue et m'a fait profiter de son enthousiasme sur à termine ce travail.

Je tiens à remercier monsieur le Pr Salah MESSAST qui a accepté d'être le président du jury. Aux membres de Jury, Monsieur le Pr Rouaigia Ammar Monsieur le Dr DjbienRahid . Je leur suis reconnaissante d'avoir accepté de juger ce travail en effectuant un examen attentif de cette thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement Mme le Dr kharefliela.

Je tiens à remercier vivement et infiniment, toute l'équipe de L.T.P. EST – SKIKDA – ANNABA et toute l'équipe de service matériaux de laboratoire L.N.H.C. SKIKDA.

En fin, je dois remercier à tout qui a participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce Thèse, à tous ceux qui m'ont procure main forte pendant les moments difficiles.



Dédicaces

Avant tout propos

Je dédie mon simple travail a ceux qui me courages toujours avec leurs amours et ces pence à mes chères parents pour leurs affectations, que ce travail soit notre témoignage de reconnaissance à leur efforts fournis depuis notre enfance jusqu'à ce jour-là.

A mes frères

A Iyed et Carolina et tasnim rahaf et léa

A mon mari

A toute ma famille

A tous mes enseignants

Sans exception

Résumé

Ces dernières années ont vu une inquiétude d'ordre social croissante concernant le problème des déchets, notamment leur gestion d'une manière générale, que ce soit les déchets industriels publics ou les déchets de l'industrie du secteur privé. D'ailleurs ce problème devient de plus en plus aigu en raison de la quantité croissante de déchets industriels, de construction et de démolition

Les usines de fabrication de carrelage, céramique, marbre, tuile et brique génèrent des quantités importantes de déchets, leur valorisation répond à des objectifs économiques et environnementaux.

L'objectif de notre recherche est d'étudier la possibilité de la réutilisation des déchets de fabrication de carrelages comme granulats dans la construction des chaussées. Pour réaliser cette étude expérimentale nous avons fait des essais de caractérisation sur l'ensemble des matériaux utilisés. L'étude porte sur l'influence de substitution des granulats recyclés de déchet de carrelage dans des mélanges bitumineux avec des taux de 10, 20 et 30%, sur les performances mécaniques (stabilité Duriez) et comparer les résultats obtenus avec des échantillons témoins composés de granulats ordinaires (0%). Les résultats obtenus montrent que l'introduction des déchets de carrelage dans la formulation d'un grave bitumineux influe positivement sur les performances mécaniques.

On constate que l'incorporation de déchets de carrelage dans le squelette granulaire des enrobés, est une étude pratique, économique et performante.

Mots clés : Valorisation - Carrelage – Duriez – Corps de chaussée – Déchet

Abstract

In recent years, there has been growing social concern about the problem of waste, particularly its management in general, whether it is public industrial waste or wastes from industry in the private sector. Moreover, this problem is becoming more and more acute due to the increasing amount of industrial, construction and demolition waste.

The factories manufacturing tiles, ceramics, marble, tiles and bricks generate large quantities of waste; their recovery meets economic and environmental objectives.

The objective of our research is to study the possibility of reusing the waste from the manufacture of tiles as aggregates in the construction of pavements. To carry out this experimental study, we performed characterization tests on all of the materials used. The study focuses on the substitution influence of recycled aggregates from tiling waste in bituminous mixtures with rates of 10, 20 and 30%, on the mechanical performance (Duriez stability) and compares the results obtained with control samples composed ordinary aggregates (0%). The results obtained show that the introduction of tiling waste in the formulation of bituminous gravel positively influences the mechanical performance.

It can be seen that the incorporation of tiling waste into the granular skeleton of asphalt is a practical, economical and efficient study.

Keyword: Valorization- Tiling - Duriez - Body of roadway –Waste

الملخص

في السنوات الأخيرة، كان هناك قلق اجتماعي متزايد حول مشكلة النفايات، وخاصة إدارتها بشكل عام، سواء كانت نفايات صناعية عامة أو نفايات من القطاع الخاص. ، أصبحت هذه المشكلة أكثر حدة بسبب زيادة كميات النفايات الصناعية والبناء والهدم.

تنتج المصانع التي تصنع البلاط والسيراميك والرخام والطوب كميات كبيرة من النفايات ، واستعادتها تلبية الأهداف الاقتصادية والبيئية.

الهدف من بحثنا هو دراسة إمكانية إعادة استخدام النفايات الناتجة عن إنتاج البلاط كركام في بناء الطرق. لإجراء هذه الدراسة التجريبية ، أجرينا اختبارات توصيف على جميع المواد المستخدمة. تركز الدراسة على تأثير الاستبدال للركام المعاد تدويره من نفايات التبليط في الخلائط البيتومينية بمعدلات 10 و 20 و 30٪ ، على الأداء الميكانيكي (ثبات دوري) ومقارنة النتائج المتحصل عليها مع عينات التحكم المكونة من الركام العادي (0٪). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن إدخال نفايات المستعملة في التبليط في تشكيل الحصى البيتومين يؤثر بشكل إيجابي على الأداء الميكانيكي

الكلمات المفتاحية: استعادة - تبليط - دوريان - جسم الطريق - النفايات

Sommaire

Sommaire	
Liste des figures	1
Liste des tableaux	3
Liste des photos	4
Liste des abréviations	5
Introduction générale	6
Chapitre I Généralité Sur Les Chaussées	
I.1 Introduction	11
I.2 Généralités sur les routes	11
I.2.1 Définition	11
I.2.2 Les composants d'une route	12
I.3 Généralités sur le corps de chaussée	13
I.3.1 Constitution et rôle d'une chaussée	13
I.3.2 Corps de chaussée	13
I.3.2.1 Couche de surface	13
I.3.2.2 Couche de base	14
I.3.2.3 Couche de fondation	14
I.3.2.4 Couche de forme	14
I.3.2.5 La partie supérieure des terrassements	14
I.4 Les Différents types des chaussées	14
I.4.1 Chaussées souples	14
I.4.2 Les chaussées bitumineuses épaisses	15
I.4.3 Chaussées Semi-Rigides	16
I.4.4 Chaussées Rigides	17
I.4.5 Les chaussées à structure mixte	19
I.4.6 Les chaussées à structures inverse	19
I.4.7 Les chaussées à structures composite	20
I.5 Le Trafic	21
I.6 Matériaux constructifs des chaussées	22
I.6.1 Béton Bitumineux	22
I.6.1.1 Définition	22
I.6.1.2 Domaine d'utilisation	22
I.6.2 Grave-Bitume	22
I.6.2.1 Définition	22
I.6.2.2 Domaine d'utilisation	23
I.6.3 Béton de Ciment	23
I.6.3.1 Définition	23
I.6.3.2 Domaine d'utilisation	23
I.6.4 Grave non traitée	23
I.6.4.1 Définition	23
I.6.5 Tufs Calcaires	24
I.6.5.1 Définition	24
I.6.5.2 Domaine d'utilisation	24
I.6.6 Sable bitume	24

Sommaire

I.6.6.1 Définition	24
I.6.6.2 Domaine d'utilisation	24
I.6.7 Grave-ciment	25
I.6.7.1 Définition	25
I.6.7.2 Domaine d'utilisation	25
I.6.8 Sables gypseux	25
I.6.8.1 Définition	25
I.6.8.2 Domaine d'utilisation	25
I.7 Choix de type du corps des chaussées	25
I.8 Principales méthodes de dimensionnement des chaussées	26
I.8.1 Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio)	26
I.8.2 Méthode du catalogue des structures	27
I.8.3 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves	28
I.9 Conclusion	29

Chapitre II Bitume, Granulats Et Les Enrobés Bitumineux

II.1 Introduction	32
II.2 Bitume	32
II.2.1 Définition	32
II.2.2 Provenance	33
II.2.3 Structure physico-chimique	33
II.2.4 Fabrication	34
II.2.5 Propriétés	36
II.2.6 Principaux types des bitumes	36
II.2.7 Les spécifications des bitumes	37
II.2.8 Principales caractéristiques des bitumes routiers	39
II.2.8.1 La mesure de pénétrabilité	39
II.2.8.2 La Température de ramollissement Bille et Anneau	40
II.2.8.3 La densité relative	40
II.3 Granulats	41
II.3.1 Définition	41
II.3.2 Classification des granulats selon la provenance	41
II.3.3 Classification des granulats routiers	42
II.3.4 Principaux essais propres aux granulats	42
II.3.4.1 Analyse granulométrique d'un sable et d'un gravier	43
II.3.4.2 Essai au bleu de méthylène	43
II.3.4.3 Essai d'aplatissement	44
II.3.4.4 Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats	44
II.3.4.5 Résistance au choc	44
II.3.4.6 Densité relative	44
II.4 Enrobés	44
II.4.1 Les différents types des enrobés bitumineux à chaud	45
II.4.2 La composition des enrobés bitumineux (BB 0/14 et GB0/20) en Algérie	46
II.4.3 Teneur en liant	46
II.4.4 La compacité	47
II.4.5 Les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux	48

Sommaire

II.4.6 Les essais sur les enrobés bitumineux	49
II.4.6.1 Essai Marshall	49
II.4.6.2 Essai de compression Duriez	50
II.4.6.3 La presse à cisaillement giratoire	52
II.4.6.4 L'essai d'orniérage	52
II.4.6.5 Essai de caractérisation des performances mécaniques par essai de module complexe, ou par essai de traction direct	53
II.4.6.6 Les essais de fatigue	53
II.5 Conclusion	54

Chapitre III Valorisation Des Déchets

III.1. Introduction	56
III.2 Définition des déchets	56
III.3 Constitution chimique du déchet	56
III.4 Type des déchets	57
III.4.1 Les déchets inertes	57
III.4.2 Les déchets industriels banals	58
III.4.3 Les déchets industriels spéciaux Dangereux	58
III.4.4 Les déchets ultimes	60
III.5 Déchets en Algérie	61
III.6 Gestion des déchets	62
III.6.1 Principe de gestion de déchets	62
III.6.2 Hiérarchie de gestion des déchets	63
III.6.3 collecte des déchets	64
III.6.3.1 Les modes de collecte des déchets	64
III.7 Traitement des déchets	64
III.7.1 Traitement mécanique ou biologique des déchets	66
III.7.2 Traiter les déchets dangereux	66
III.8 Valorisation des déchets	66
III.8.1 La valorisation	66
III.8.2 Les type de valorisation	67
III.8.3 L'objectif de valoriser les déchets	67
III.9 Sources De Déchets Utilisés En Génie Civil	68
III.9.1 Les déchets de construction et de démolition	68
III.9.2 Les sous-produits de l'industrie.	69
III.10 Etat De l'arme des études dans le domaine travaux public	71
III.11 Conclusion	73

Chapitre IV Matériaux Et Méthodes De Travail

IV.1 Introduction	75
IV.2 Matériaux utilisés	75
IV.2.1 Les caractéristiques des matériaux utilisés	75
IV.2.1.1 Granulats Ordinaires	75
IV.2.1.2 Matériau recyclé	79
IV.2.1.3 Caractéristiques des bitumes utilisés	83
IV.3 Formulation d'un grave bitumineux classique	84
IV.3.1 Etude De Formulation	84

Sommaire

IV.3.1.1 Composition granulométrique	84
IV.3.1.2 Teneur en liant	86
IV.4 Etude de performance	87
IV.5 Formulation d'un grave bitumineux modifié	87
IV.6 Conclusion	92

CHAPITRE V Résultats Et Discussion

V .1 Introduction	94
V.2 Essais decompactage au Proctor modifié	94
V.3 Essai Duriez	96
V.3.1 Densité apparente	96
V.3.2 Compacité	97
V.3.3 Volume des vides	97
V.3.4 Résistance en compression	98
V.3.5 Tenue à l'eau (Rapport r/R)	99
V.4 Conclusion	99
Conclusion Générale	101
Références Bibliographie	103

Annexe

Annexe A Calculer masse volumique et absorption d'eau des gravillons (Panier triller) de déchet de carrelage	110
Annexe B Calculer la Formulation bitumineuse et résultats d'essai de performance	112
Annexe C Calculer l'écart type	113
Annexe D Les photos d'essai Proctor et l'essai Duriez	118

Liste des figures

Figure I.1 Profil en travers type d'une route	11
Figure I.2 Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée	13
Figure I.3 Définitions des termes de l'ensemble de la chaussée	14
Figure I.4 Les constituants d'une chaussée souple	15
Figure I.5 Schématisation du fonctionnement des chaussées souples	15
Figure I.6 Structure type d'une chaussée souple	15
Figure I.7 Chaussées bitumineuses épaisses	16
Figure I.8 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques	16
Figure I.9 Schématisation du fonctionnement des chaussées semi-rigides	16
Figure I.10 Structure type d'une chaussée semi rigide	17
Figure I.11 Dalles non goujonnées avec fondation	17
Figure I.12 Dalles goujonnées avec fondation	18
Figure I.13 Dalles sans fondation	18
Figure I.14 Béton armé continu	18
Figure I.15 Béton armé continu	18
Figure I. 16 Structure type d'une chaussée rigide	19
Figure I.17 Chaussées à structure mixte	19
Figure I.18 Chaussées à structure inverse	20
Figure I.19 Béton de ciment mince collé (BCMC)	20
Figure I.20 Béton armé continu sur Grave bitume (BAC/GB)	20
Figure I.21 influence du collage sur le diagramme des contraintes (a) interface non collée (b)Interface collée	21
Figure I. 22 Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de la chaussée d'un véhicule léger et d'un poids lourd	22
Figure I.23 La démarche du catalogue	28
Figure II.1 bitume	32
Figure II.2 Représentation Schématique du Bitume	33
Figure II.3 les composantes de bitume	34
Figure II.4 Fabrication du bitume	35
Figure II.5 Principe de pénétration	39
Figure II.6 Appareil de pénétrabilité	40
Figure II.7 granulats naturels roulés	41
Figure II.8 Granulats concassés	42
Figure II.9 courbes granulométrique typiques de sable, gravillons et cailloux	43
Figure II.10 La composition d'enrobé	45
Figure II.11 Niveaux de l'épreuve de formulation	48
Figure II.12 Application de la compression (Marshall)	50
Figure II.13 Conservation des éprouvettes avant écrasement	50
Figure II.14Schéma du moule et piston	51
Figure II.15 Conservation des éprouvettes Duriez	51
Figure II.16 Appareil DURIEZ	52
Figure II.17 Principe de l'essai d'orniérage	53

Liste des figures

Figure III.1 Compositions des déchets du bâtiment	59
Figure III. 2 Organigramme développer en LMDC –Toulouse et présentant la stratégie d'étude conduisant à la valorisation des sous-produits ou à la stabilisation des déchets	60
Figure III.3 Les quatre principaux de gestion des déchets	62
Figure III.4 Hiérarchie de gestion des déchets	63
Figure III.5 valorisation des déchets	67
Figure IV.1 Courbe granulométrique des granulats ordinaires	76
Figure IV.2 Essai de Proctor modifié des granulats ordinaires	78
Figure IV.3 Courbe granulométrique de déchets de carrelage	80
Figure IV.4 Courbe Proctor modifié	82
Figure IV.5 résultats d'essai C.B.R Immédiat	83
Figure IV.6 Résultats d'essai C.B.R Imbibé	83
Figure IV.7 composition granulaire	85
Figure IV.8 Courbe granulométrique des mélanges de grave bitume 0/20	86
Figure IV.9 Moule de compactage	90
Figure V.1 Résultats d'essai Proctor a 0% de DDC	94
Figure V.2 Résultats d'essai Proctor a 10% de DDC	94
Figure V.3 Résultats d'essai Proctor a 20% de DDC	95
Figure V.4 Résultats d'essai Proctor a 30% de DDC	95
Figure V.5 Courbes de compactage des différents mélanges (Granulats naturels + DDC)	96
Figure V.6 Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution	96
Figure V.7 Variation de la compacité en fonction du taux de substitution	97
Figure V.8 Variation de volume des vides en fonction du taux de substitution	97
Figure V.9 Variation de la résistance en compression en fonction du taux de substitution	98

Liste des tableaux

Tableau I.1 Les valeurs des coefficients d'équivalence	27
Tableau I.2 Déterminant la classe du trafic	27
Tableau I. 3 Déterminant la classe du sol	28
Tableau I.4 comparaison des différentes structures de chaussées	29
Tableau II. 1 les spécifications des bitumes purs	37
Tableau II. 2 les spécifications des bitumes Fluidifiés	38
Tableau II. 3 les spécifications des bitumes Fluxés par un huile de goudron de houille	38
Tableau II. 4 les spécifications des bitumes composés	39
Tableau II.5 Classification des bitumes selon la pénétrabilité et TBA	40
Tableau II. 6 les Classifications des granulats	42
Tableau II-7 la granulométrie du mélange	46
Tableau IV.1 Analyse granulométrique des granulats ordinaire utilisés	76
Tableau IV.2 La masse volumique absolue, réelle, saturée et apparente de classes granulaires utilisées	77
Tableau IV.3 résultats d'essai d'aplatissement des G.O	77
Tableau IV.4 résultats d'essai d'Équivalent de sable des G.O	77
Tableau IV.5 résultats d'essai du bleu de méthylène MB des G.O	77
Tableau IV.6 résultat d'essais de dureté et de durabilité	78
Tableau IV.7 Analyse granulométrique des granulats recyclé (DDC) utilisés	79
Tableau IV.8 La masse volumique absolue, réel, saturé et la densité apparente de G.R	80
tableau IV.9 Résultats d'essai d'aplatissement des G.R	80
Tableau IV.10 Résultats d'essais d'Équivalent de sable des G.R	81
Tableau IV.11 Résultats d'Essai du bleu de méthylène des G.R	81
Tableau IV.12 Résultats d'essais Los Angles et Micro Deval	81
Tableau IV.13 Résultat d'essai de fragmentabilité	81
Tableau IV.14 Résultat d'essai de dégradabilité	82
Tableau IV.15 Caractéristiques du bitume 40/50	84
Tableau IV.16 Fourchette des valeurs min et max	84
Tableau IV.17 classe granulométrique	85
Tableau IV.18 Les résultats de teneur en liant	87
Tableau IV.19 Résultats d'essai Duriez	87
Tableau IV.20 La quantité des G.O et G.R pour chaque mélange	88
Tableau V.1 Ecart type des volumes des vides	98
Tableau V.2 Ecart type de compression	98

Liste des photos

Photo IV .1 Déchets de carrelage	79
PhotoIV.2 Casse granulaire de G.R	79
Photo IV.3 Etuve de chauffage	88
Photo IV.4 Malaxeur de mélanges bitumineux	89
Photo IV.5 Remplissage des moules Duriez	89
Photo IV.6 Eprouvettes Duriez	90
Photo IV.7 Peser hydrostatique les éprouvettes Duriez	90
Photo IV.8 Conservation des éprouvettes a l'air	91
Photo.IV.9 Conservation des éprouvettes a l'eau	91
Photo IV.10 Presse de compactage	91

Liste des abréviations

LCPC	Laboratoire des ponts et chaussées
CTTP	Organisme national de control technique des travaux public
Tpl	Trafic poids lourds à l'année de mise en service
D.I.B	Déchets industriels banals
G.O	Granulats ordinaire
G.R	Granulats recyclé
D.D.C	Déchets de carrelage
GB	Grave bitume
D	Diamètre
LA	Los Angeles
M.D.E	Micro Deval
Fr	Fragmentabilité
Dg	Dégradabilité
ES	Equivalent de sable (%)
A%	Coefficient d'aplatissement
MB	Valeur de Bleu méthylène
TL	Teneur en bitume
α	Coefficient correcteur destiné
K	Module de richness
Σ	Surface Spécifique des Granulats
MVag	Masse volumique apparente des granulats
MVrg	Masse volumique réel des granulats
C%	Compacité
Vv	Pourcentage volumétrique des vides de l'éprouvette (%)
r	Résistance à la compression sans immersion à 18°C en Kg/cm ²
R	Résistance à la compression avec immersion à 18°C en Kg/cm ²
r/R	Tenue à l'eau (le rapport)

Introduction Générale

Introduction générale

La loi n° 01-19 du 27 ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets définit les déchets : comme " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer destinier. Les déchets sont donc un ensemble de résidus se présentant sous forme solide, voire liquide quand ils sont contenus dans des récipients réputés étanches. Ces déchets résultent des différentes activités humaines, domestiques, industrielles et agricoles.

Les dernières décennies ont vu une forte augmentation de la croissance industrielle et économique, contribuer à l'amélioration de la qualité de vie et du bien-être des citoyens (Programme de 3 Millions de logement entre 1999 et 2018). Cependant, nous devons ne pas perdre de vue le fait que chaque système de production crée des sous-produits et des déchets produits qui peuvent affecter l'environnement. Ces effets peuvent survenir à tout moment cycle de vie du produit, que ce soit pendant la phase initiale d'obtention des matières premières, phase de transformation et de production, lors de la distribution du produit ou lorsque l'utilisateur final doivent éliminer les produits qui ne sont plus nécessaires.

En conséquence, ces dernières années ont vu une inquiétude sociale croissante concernant le problème du stockage des déchets et la gestion des ceux-ci en général, des déchets industriels et des déchets de l'industrie issus du secteur privé. Ce problème devient de plus en plus aigu en raison de la quantité croissante de déchets industriels, de construction et de démolition. La nécessité de gérer ces déchets est devenue l'un des problèmes les plus urgents de notre époque, nécessitant des actions spécifiques visant à encourager la bonne gestion de ces déchets, comme la promotion des systèmes de récupération des ressources (systèmes de réutilisation, de recyclage et de valorisation énergétique des déchets) comme moyen d'exploiter les ressources contenues dans les déchets, qui serait autrement perdu, réduisant ainsi l'impact sur l'environnement.

La valorisation et la réutilisation des déchets industriels dans le domaine de génie civil est un thème d'actualité ou les chercheurs tentent de trouver d'autres sources D'approvisionnement en matériaux de construction utilisant ces déchets, et cela permet de réduire son volume, protéger l'environnement et réduire la consommation d'énergie. À noter qu'en Algérie, quelque 12 millions de tonnes de déchets sont produits chaque année. Cependant, la quantité recyclée demeure insignifiante. Elle ne dépasse pas dans le meilleur des cas 10%.

Les travaux routiers constituent un domaine intéressant pour la valorisation des déchets (mines et carrières, industriels, métallurgique, matériaux de démolition ...etc.). Ceux-ci sont recyclés dans les chaussées sous cinq principaux types qui sont la récupération en profondeur, recyclage à chaud et à froid en place, planification à froid et recyclage à chaud.

C'est dans ce domaine que s'inscrit cette étude qui vise à réutiliser les déchets de fabrication de carrelage comme granulats dans la réalisation des couches de base des chaussées pour les valoriser.

Le premier objectif de cette étude de recherche est de contribuer à la réutilisation des déchets de carrelage dans la construction des corps de chaussées et cela permet donc :

- D'éliminer les déchets par recyclage d'où protection de l'environnement.
- Aider à résoudre certains problèmes liés au manque de granulats et en particulier à l'utilisation des granulats recyclés.

Le second objectif de notre travail consiste à substituer les agrégats entrant dans la grave-bitume par granulats de déchets de carrelage, sable 0/3, gravier 3/8, 8/15 et 15/25 ; puis déterminer les performances mécaniques des différents mélanges de grave-bitume à base des déchets recyclés, afin de déterminer l'évolution des caractéristiques de ce dernier par rapport aux spécifications d'une grave-bitume destinée au corps de chaussée. Pour ce faire, le présent travail est divisé en deux grandes parties :

Première partie : Constituée de trois (03) chapitres. Ils sont destinés à présenter l'état de l'art via une recherche bibliographique.

Chapitre I : Il est consacré à une présentation des routes d'une manière générale, ensuite on donne des détails sur les chaussées (définitions, constitution, différents types), le volet trafic occupe une place importante dans la conception des routes. Nous ne pouvons pas clôturer ce chapitre sans évoquer les matériaux constructifs des chaussées qui conditionnent le type de la chaussée (béton bitumineux, béton de ciment, ...), à la fin sont passées en revue les principales méthodes de dimensionnement des chaussées.

Chapitre II : est consacré à une présentation d'enrobé et leur propriétés, les principaux types d'enrobé, ensuite une présentation des granulats et leur caractéristique et à la fin on a cité les différents enrobés bitumineux et leurs essais réalisés au cours de ce travail.

Chapitre III : Est consacré aux recherches effectuées sur les déchets et leur valorisation, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchets et les principales techniques de traitement ou d'élimination à travers le monde; ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine des travaux publics.

En Algérie, le processus d'industrialisation et de développement urbain du pays s'est effectué d'une manière aléatoire sans que les précautions environnementales ne soient réellement prises en considération.

Deuxième partie : Est dédiée à l'étude expérimentale ainsi qu'aux interprétations des résultats trouvés et leurs comparaisons avec ceux de la littérature. Elle est présentée par les deux chapitres qui suivent :

Chapitre IV : On s'intéresse à la caractérisation des matériaux utilisés : matériaux ordinaires (de la carrière de EL GHDIR Skikda), matériaux recyclés des déchets de carrelage, afin de connaître les propriétés physiques et mécaniques, Le liant hydrocarboné (le bitume) les propriétés physiques de bitume, la formulation du grave bitume. Ensuite, nous allons exposer les essais mécaniques utilisés dans ce travail : Proctor modifié et essai Duriez.

Chapitre V : Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux obtenus. Les comportements des différents mélanges seront également décrits en détail. On rend compte de l'effet de l'ajout des déchets de carrelage dans la formulation d'une grave – bitume avec des proportions (10%, 20% et 30%) sur les performances des couches de chaussée. Enfin, nous clôturons ce travail par des conclusions générales, et nous y rappelons les principaux résultats obtenus, en ouvrant la perspective de nouvelles études qui nous semblent possibles .

Chapitre I
Généralité Sur Les Chaussées

Chapitre I : Généralité Sur Les Chaussées

I.1. Introduction

Depuis l'époque des premières voies romaines jusqu'à la fin du dix-huitième siècle, on utilisait des "structures" de chaussées routières à base de dalles et de pavés pour des véhicules à traction animale. Plus tard, avec le début de mécanisations des travaux et l'apparition de véhicules plus lourds et plus nombreux, on vit l'apparition des structures à base de hérisson (blocs de 250 mm) et de macadam (40170 mm). Au début du vingtième siècle, on a commencé à s'occuper de l'optimisation des terrassements et on parlait de "L'économie" des mouvements de terres. Avec l'évolution du véhicule et du trafic et pour lutter contre les dégradations de surface et la poussière, on commença à utiliser le goudron puis le bitume. Ce n'est qu'après la 2ème guerre mondiale que l'on a été obligé de se préoccuper des considérations géologiques et géotechniques, et avec des techniques de mise en œuvre plus avancées, les matériaux à granulométrie serrée utilisés dans le corps de chaussée furent remplacés par des matériaux à granulométries continues. À partir des années 60, le trafic devient plus élevé, plus lourd et plus rapide, ces solutions se sont avérées encore insuffisantes et, actuellement, on assiste d'une part à une généralisation des matériaux liés (en fondation, en assise et en surface), et d'autre part à l'utilisation de matériaux nouveaux (géotextiles, fibres, joints ...) [1].

I.2 Généralités sur les routes

I.2.1 Définition

La route est une voie aménagée pour la circulation des véhicules automobiles ou autre ainsi que des piétons. A l'intérieur des agglomérations, la route prend le nom de rue, avenue, boulevard etc. [2].

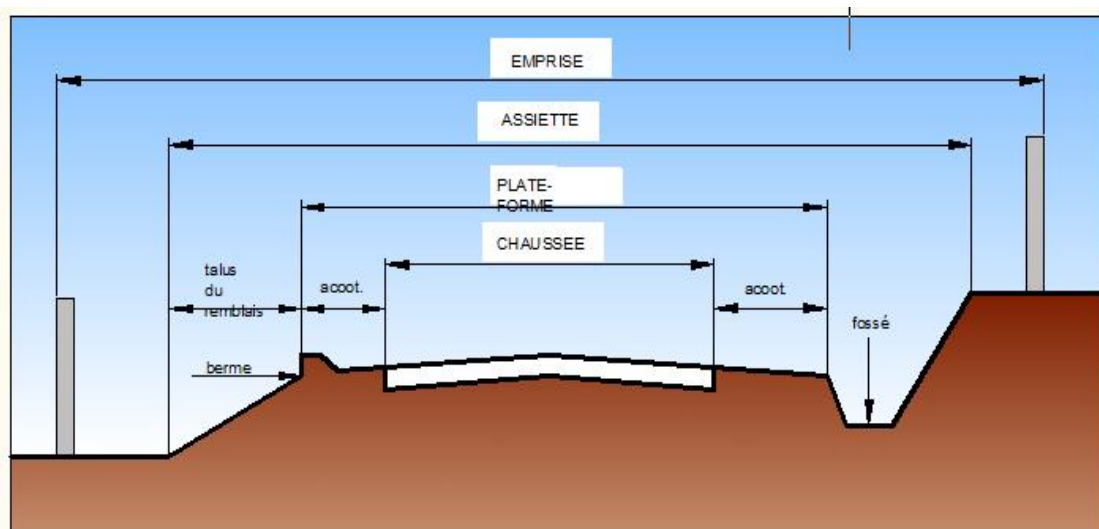


Figure I.1 Profil en travers type d'une route [2]

I.2.2 Les composants d'une route [3]

L'emprise : est la surface qui lui est affectée et qui comporte toutes ces dépendances

L'assiette : surface du terrain réellement occupée pour la route.

Plate- forme : surface de la route qui comprend la chaussée et les accotements.

Accotements : la bande de la plate- forme bordant extérieurement les deux côtés de la Chaussée.

Fossé : creux qui borde longitudinalement un accotement construit en terre ou en B.A ayant (fausse trapézoïdale) sont rôle est de collecter les eaux de pluie. Talus : le linge d'équilibre de la terre, l'inclinaison du talus est de 3/2 pour les remblais et de 1/1 par déblais.

Vois de circulation : c'est la partie de la chaussée réservée à une file de véhicules.

Bordure : c'est une barrière basse utilisée pour protéger les véhicules et les ramener sur la chaussée.

Descente : c'est un ouvrage disposé le longe d'un talus (remblai, déblai).

Caniveau : l'emplacement creux avec deux versants inclinés, spécialement aménagés pour l'écoulement des eaux surtout le long de la chaussée.

Banquette : sur élévation terrassée et herbue aménagée à la limite extérieure dominant un remblai en vue d'assurer la sécurité des usagers et des accotements.

Berme : palier constitué longitudinalement à un accotement construit en déblai aux niveaux du terrain avoisinant ayant comme rôle de collecter les eaux de ruissellement ou de drainage.

Terre -plein : bande de terrain situé entre deux chaussées construits sur une même plate- forme. Élément des accotements et des fossés : les accotements et les fossés peuvent avoir certaine construction simple (aménagements) qui sont :

Garages : espaces aménagés en largeur d'une chaussée et dessinés au stationnement des véhicules soit pour dégager la chaussée, soit par permettre le croisement ou le dépassement sur une route étroite.

Saignée : rigole creusée entraver des accotements et permettant l'évacuation des eaux de caniveau vers les fossés.

Drains : les saignées profondes aménagées sur la chaussée et les accotements en travers de la route et destinées à évacuer les eaux d'infiltrations vers les faussées.

Puisard : un trou à parois maçonnées construit au fond des fossés et dessinée à recueillir les eaux pour leurs permettre soit de filtrer dans le terrain naturel soit de s'évacuer par des conduites en pentes placées à leur base et travers la route.

Regard : puisard portant à sa partie supérieur une grille ou un regard

Casus : un caniveau qui travers la chaussée.

Dos d'Ane : un bombement transversal de la chaussée.

Glissière de sécurité : barrière basse, métallique on en béton profilé utilisant l'élasticité des pneus qui ramène progressivement et sans dommage le véhicule sur la chaussées elles sont installées dans tous les lieux dangereux.

Murette maçonnerie : remplace la glissière de sécurité dans les montagnes pour bien Protéger les véhicules, cette construction gène le déneigement.

I.3 Généralités sur le corps de chaussée

I.3.1 Constitution et rôle d'une chaussée

La chaussée est la partie de la route, généralement revêtue, sur laquelle circulent les véhicules pour assurer une circulation rapide et confortable, la chaussée doit avoir une résistance parfaite pour supporter tout genre de véhicules et rapporter leur poids sur le terrain de fondation [4].

I.3.2 Corps de chaussée

La structure de la chaussée est constituée du bas vers le haut de plate- forme, de l'assise et de la couche de surface. Rappelons que le rôle d'une chaussée est de reporter sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches de caractéristiques mécaniques croissantes [5].

En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol [6]:

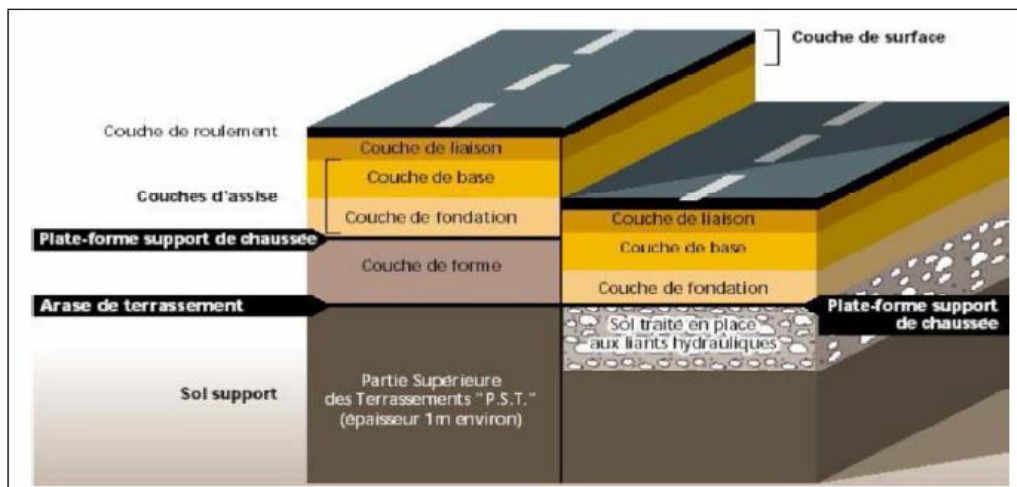


Figure I.2 Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée [2]

I.3.2.1 Couche de surface

La couche de base est recouverte par une couche de surface pour :

Résister aux efforts horizontaux des pneumatiques, En effet, les pneumatiques exercent sur la chaussée des efforts horizontaux résultant de la transmission de l'effort moteur (accélération), la mise en rotation des roues non motrices, et la transmission de l'effort de freinage.

S'opposer à la pénétration de l'eau, Il est important d'empêcher l'eau de pénétrer dans les couches de la chaussée, Les conséquences sont connues, elle délie les granulats, elle ramollit les sols fins, faisant chuter leur portance.

I.3.2.2 Couche de base

La construction de cette couche doit faire l'objet d'une attention toute spéciale: le matériau utilisé dans cette couche doit pouvoir résister aux contraintes résultant du trafic.

I.3.2.3 Couche de fondation

La construction de cette couche ne pose pas de problème particulier. La plupart des matériaux routiers conviennent.

I.3.2.4 Couche de forme

On peut rencontrer dans un même projet des sols de caractéristiques très variables. Afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol, on est amené à interposer, entre le sol support et les couches de chaussée, un élément de transition qui peut être constitué soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques. Il est appelé couche de forme.

I.3.2.5 La partie supérieure des terrassements (PST)

Est la zone supérieure, d'environ 1 mètre, des terrains en place (cas des déblais) ou des matériaux rapportés (cas des remblais).

La plate-forme de la PST est l'arase de terrassement AR

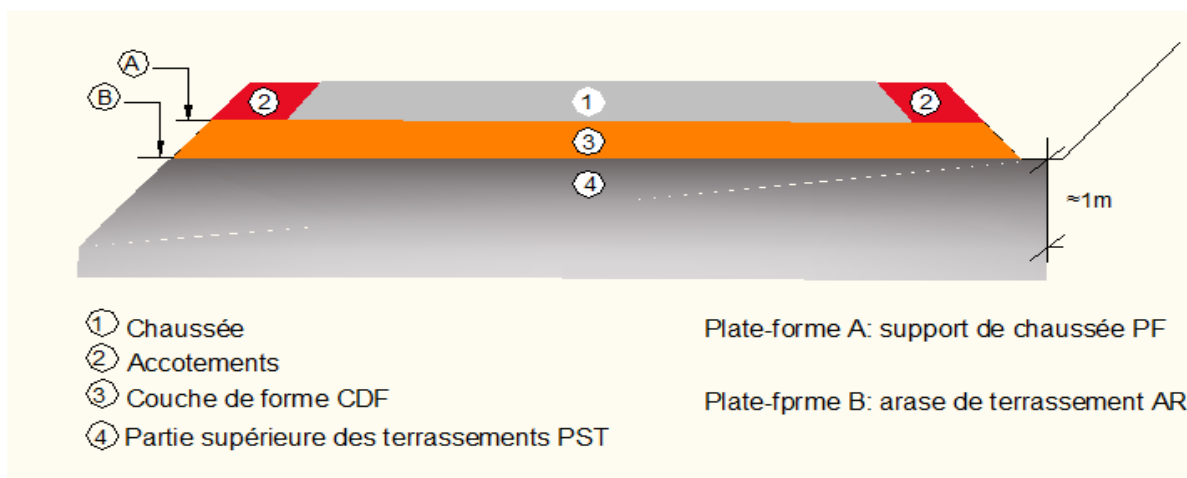


Figure I.3 Définitions des termes de l'ensemble de la chaussée[2]

I.4 les différents types des chaussées

Les structures des chaussées sont classées selon la nature des matériaux, leur localisation dans la structure de chaussée et l'intensité du trafic [7].

I.4.1 Chaussées Souples

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

Elles sont constituées de couche bitumineuse inférieure à 15 cm, mais parfois limité à un enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur 30 à 60 cm, compactées par couches de 20 à 30 cm [8].

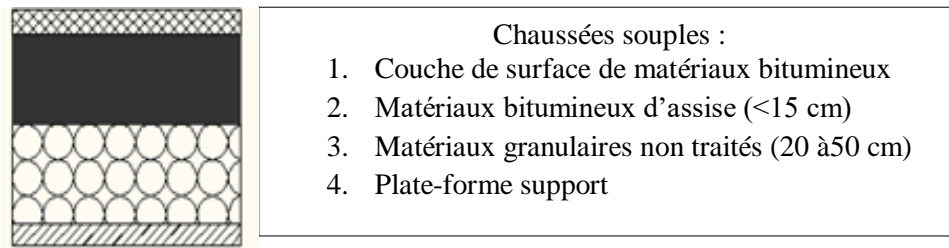


Figure I.4 Les constituants d'une chaussée souple

Sous la charge du trafic, chaque couche constituant cette chaussée transmet sur la couche suivante une charge uniformément répartie.

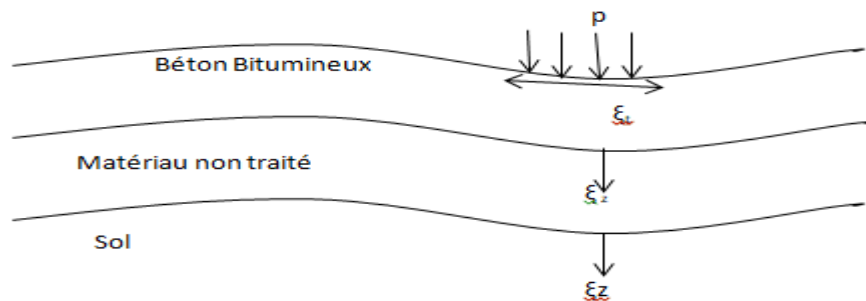


Figure I.5 Schématisation du fonctionnement des chaussées souples

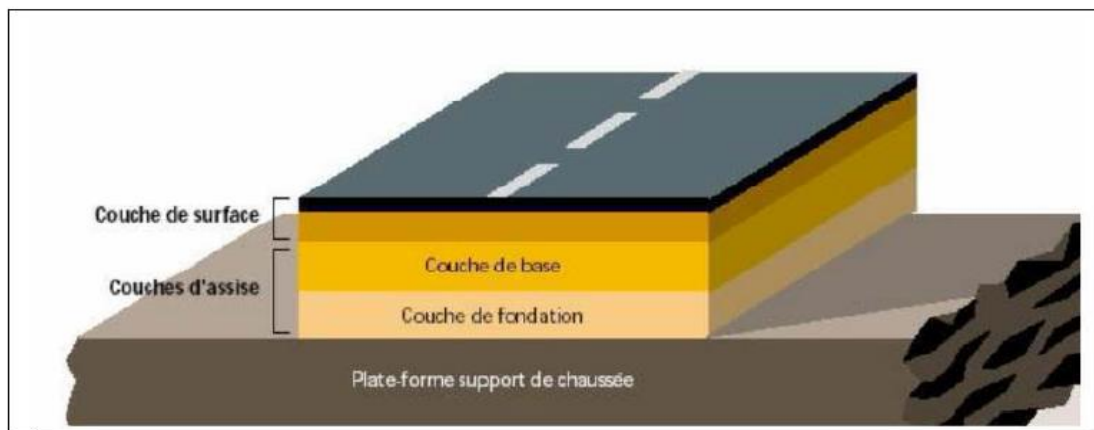


Figure I.6 Structure type d'une chaussée souple[2]

I.4.2 Les chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse surmontée un corps de chaussée d'épaisseur comprise entre 15 et 40cm (composé d'une couche de base et une couche de fondation) en grave traitées aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques.

Vue la différence d'épaisseur de la couche d'assise entre la chaussée simple et la chaussée épaisse, leur fonctionnement se différent [9].

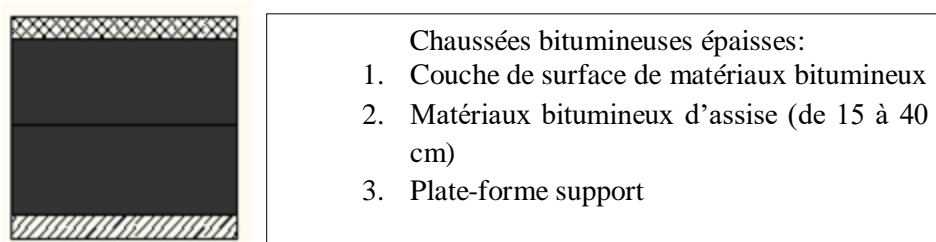


Figure I.7 Chaussées bitumineuses épaisses

La diffusion et l'atténuation des charges du trafic transmises aux sols sont atteints grâce à la rigidité et la résistance en traction.

Le collage des couches a une grande importance pour ce type de chaussée car il permet les allongements maximaux à la base des couches les plus profondes et donc évite les sollicitations en traction de chaque couche, qui conduisent à la ruine prématurée de la structure.

I.4.3 Chaussées semi-rigides

Assise traitée aux liants hydrauliques de 20 à 50 cm avec une couche de surface en matériaux hydrocarbonés d'épaisseur 6 à 14 cm.

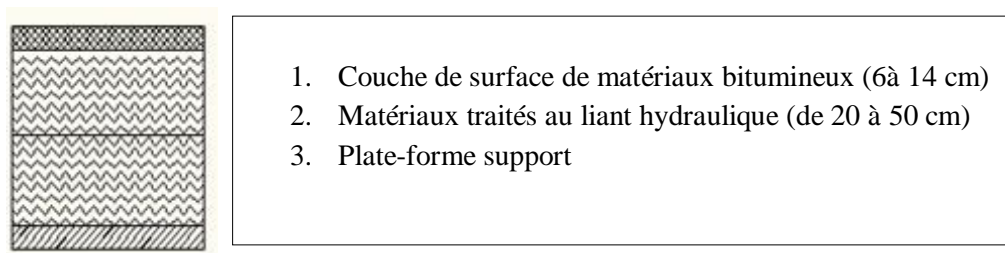


Figure I.8 Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces chaussées sont qualifiées de semi rigide. La grande rigidité des couches d'assise traitée limite les contraintes transmises aux couches de chaussée, elles sont par contre soumises à des contraintes de traction -flexion déterminantes pour leur dimensionnement[9].

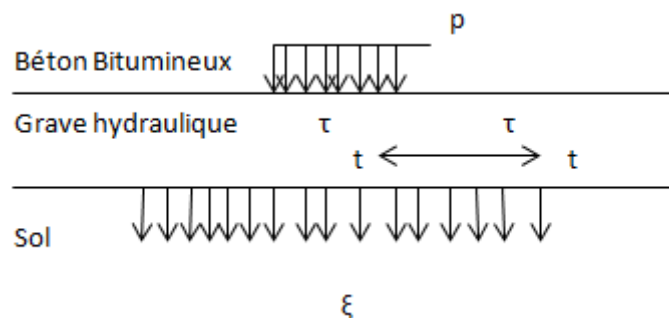


Figure I.9 Schématisation du fonctionnement des chaussées semi-rigides

L'interface couche de surface couche de base est une zone sensible car elle est soumise à de fortes contraintes normales et de cisaillement horizontal les centimètres supérieurs de l'assise traitée sont souvent de plus faible résistance.

Le phénomène de retrait est l'un des problèmes qu'on rencontre dans ce types de chaussées, malgré qu'il est empêché par le frottement entre la couche d'assise et le sol support jusqu'à la couche de roulement; il remonte au travers la couche de roulement [9].

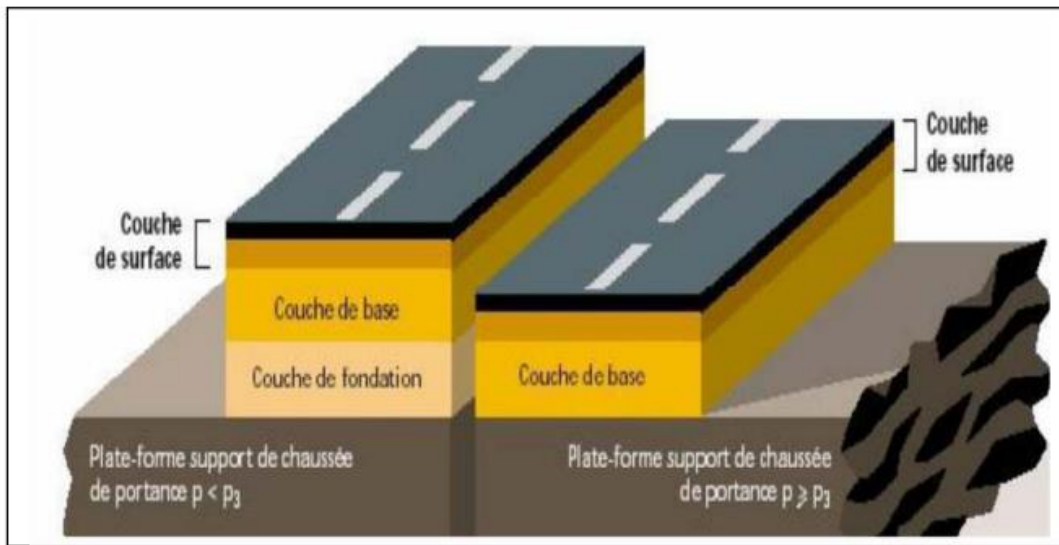


Figure I.10 Structure type d'une chaussée semi rigide [2]

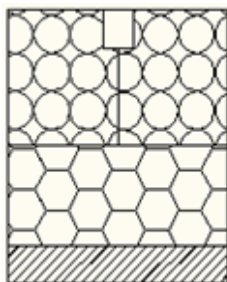
I.4.4 Chaussées rigides

Sont constituées d'une couche de béton de 15 à 40 cm recouverte d'une couche mince en enrobés bitumineux.

La couche de béton peut surmonter:

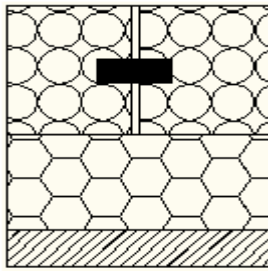
- une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment.
- une couche drainante en matériaux non traités.
- une couche bitumineuse qui repose sur une couche de forme.

La couche de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints[9].



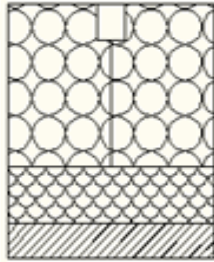
- Dalles non goudonnées avec fondation :
1. Béton de ciment (20 à 28 cm)
 2. Béton maigre (12 à 18 cm) ou matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm)
 3. Plate-forme support

Figure I.11 Dalles non goudonnées avec fondation



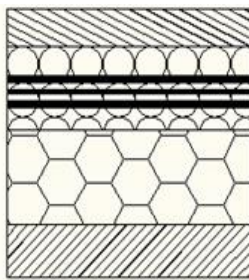
- Dalles goujonnées avec fondation :
1. Béton de ciment (17à23cm)
 2. Béton maigre (14 à 22 cm)
 3. Plate-forme support

Figure I.12 Dalles goujonnées avec fondation



- Dalles sans fondation :
1. Béton de ciment (28 à39 cm)
 2. Couche de drainante (matériaux granulaires ou géotextiles)
 3. Plate-forme support

Figure I.13 Dalles sans fondation



- Béton armé continu (1) :
1. Béton de ciment (18à24cm)
 2. Béton maigre (12 à 14 cm)
 3. Plate-forme support

Figure I.14 Béton armé continu



- Béton armé continu (2) :
1. Béton de ciment (18à24cm)
 2. Matériaux bitumineux d'assise (5 cm)
 3. Sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm)
 4. Plate-forme support

Figure I.15 Béton armé continu

Au regard du module d'élasticité élevé du béton armé, les sollicitations déterminantes sont celles de traction par flexion dans la dalle. La mise en œuvre du béton de ciment sur une longueur importante provoque l'apparition des fissures transversales suite au phénomène de retrait empêché. Pour tenir compte de ce phénomène, les derniers types de cette structure introduisent les notions de goujon ou de béton armé continu afin d'assurer une continuité mécanique au franchissement de la fissure.

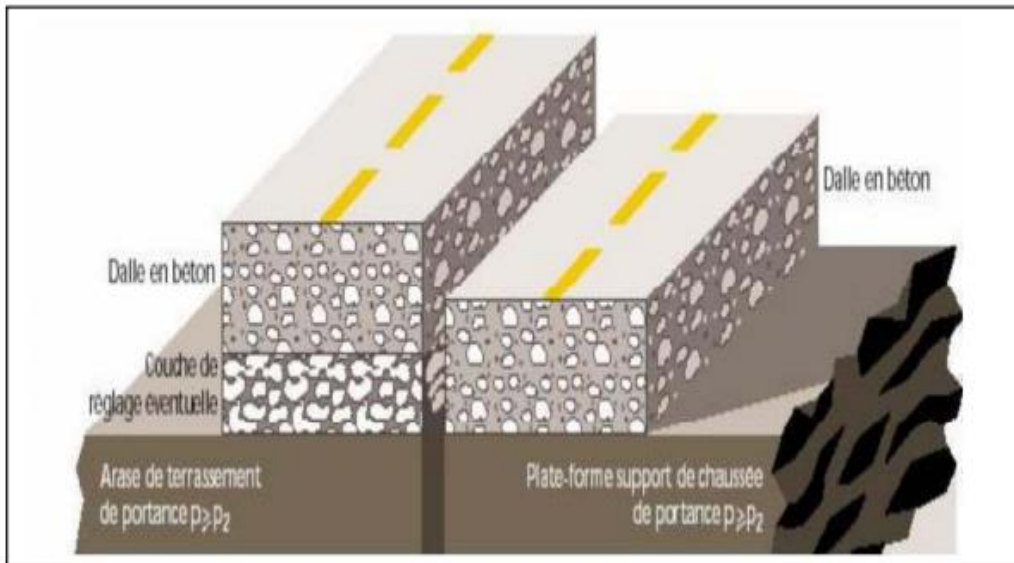


Figure I. 16 Structure type d'une chaussée rigide

I.4.5 Les chaussées à structure mixte

Comportent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux (10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). De plus, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de la chaussée est de $\frac{1}{2}$ [9].



Chaussées à structure mixte :

4. Couche de surface des matériaux bitumineux
5. matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
6. matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
7. Plate-forme support

Figure I.17 Chaussées à structure mixte

La couche de matériau traité aux liants hydrauliques placée en fondation, diffuse et atténue, du fait de sa raideur élevée, les efforts transmis au sol support. Elle constitue un support de faible déformabilité pour les couches supérieures de matériaux bitumineux. La faiblesse de ces structures tient dans la sensibilité des interfaces aux dilatations différentielles, les couches peuvent alors se détacher et les couches supérieures supporter des contraintes qui produisent leur destruction.

I.4.6 Les chaussées à structures inverse

En les comparant aux structures mixtes, les chaussées inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires non traités d'environ 12cm. Cette couche est introduite entre la couche bitumineuse de 15 cm d'épaisseur et la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.

L'épaisseur totale de la structure est comprise entre 60 et 80 cm.



- Chaussées à structure inverse :
1. Couche de surface des matériaux bitumineux
 2. matériaux bitumineux d'assise (10 à 20 cm)
 3. matériaux granulaire non traités (<12 cm)
 4. matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
 5. Plate-forme support

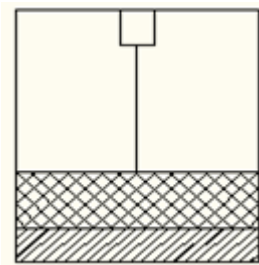
Figure I.18 Chaussées à structure inverse

La couche intermédiaire en matériaux granulaires non traités est relativement déformable dans le sens horizontal, elle a pour fonction de limiter les fissures. La dégradation de ces structures est provoquée par des orniérages limités et des fissures transversales de fatigue. La mise en œuvre est plus sensible aux imperfections que celles pourvues de couche collées, elles sont particulièrement sensibles à l'eau. En effet, la circulation de l'eau dans la couche intermédiaire conduit rapidement à la ruine des couches supérieures [9].

I.4.7 Les chaussées à structures composite

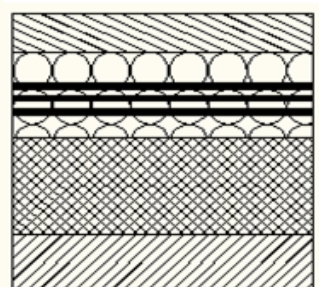
C'est une structure qui a été l'objet d'une étude technico-économique au début des années 1990. Cette étude a pour but d'assembler la qualité de durabilité des bétons de ciment avec les qualités souplesse et capacité d'adaptation des matériaux bitumineux.

Deux nouvelles structures ont été développées [10] :



- Béton de ciment mince collé :
1. Béton de ciment (5-10 ou 10-15 cm)
 2. matériaux bitumineux
 3. Plate-forme support

Figure I.19 Béton de ciment mince collé (BCMC)



- Béton armé continu :
1. BBTM+ES
 2. Béton armé continu
 3. Grave bitume
 4. Plate-forme support

Figure I.20 Béton armé continu sur Grave bitume (BAC/GB)

Béton de ciment mince collé (BCMC)

Est une technique d'entretien superficiel des structures bitumineuses dégradées, apparue aux Etats-Unis, Elle consiste d'abord à raboter et à nettoyer la structure dégradée, puis étaler une couche de béton de ciment non armé (épaisseur 5 à 10 cm). l'intérêt de cette technique réside dans l'adhérence de la couche de béton à la structure en matériaux bitumineux.

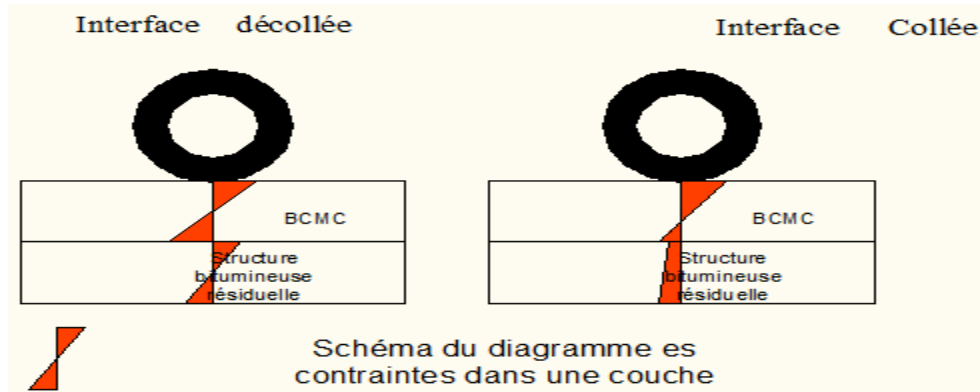


Figure I.21 influence du collage sur le diagramme des contraintes (a) interface non collée (b) Interface collée

Sous l'influence du chargement du trafic, la structure composite présente grâce à l'interface collée une réduction des contraintes de traction à la base de la couche de béton et garantit à la couche mince une résistance à la fatigue.

Béton armé continu sur Grave bitume (BAC/GB)

Elle est constituée d'une couche de fondation en grave bitume d'épaisseur 9 cm qui surmonte la plate-forme support de chaussées. La GB est grenailé avant la mise en œuvre de la couche de béton armé continu (BAC) dont l'épaisseur varie en fonction du trafic. Le rôle des armatures dans le BAC est Principalement de contrôler la fissuration transversale sans participer à la résistance aux sollicitations du trafic [11]

A son tour la couche BAC, est grenailée avant la surmonter par une couche d'enduit superficiel qui assure l'adhérence entre le BAC et la couche de roulement en béton bitumineux très mince (BBTM) (2,5 cm d'épaisseur).cette adhérence présente l'intérêt de cette technique.

I.5 Le Trafic

Le trafic constitue un élément essentiel du dimensionnement des chaussées. Le poids des véhicules est transmis à la chaussée, sous forme de pressions, par l'intermédiaire des pneumatiques. Pour une automobile, cette pression est de l'ordre de 0,2 MPa. Mais, elle est de l'ordre de 0,66 MPa sous une roue de camion. Les matériaux situés sous les roues subissent des efforts très différents lorsque passe une voiture ou lorsque passe un camion. Seul ce dernier est pris en compte pour déterminer les classes de trafic [9].

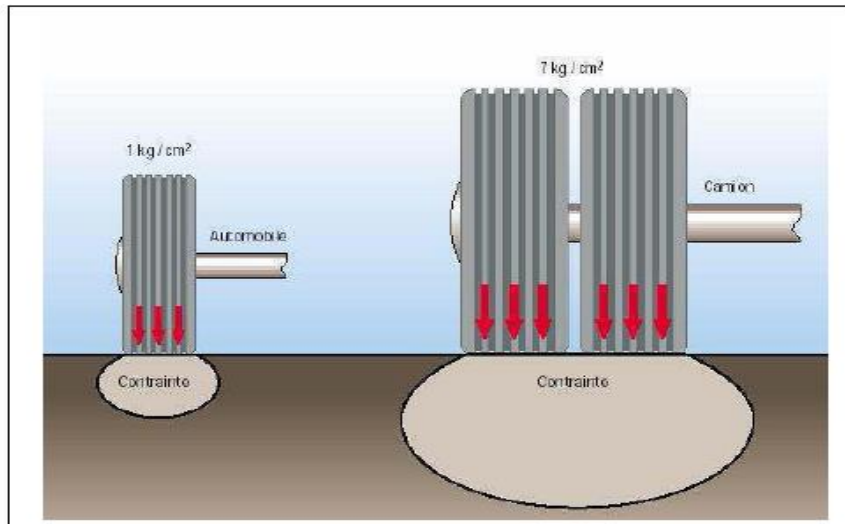


Figure I. 22 Schéma de principe illustrant les agressivités respectives vis-à-vis de la chaussée d'un véhicule léger et d'un poids lourd. [2]

I.6 Matériaux constructifs des chaussées

Les matériaux de chaussée peuvent être regroupés en trois (03) grandes familles que sont : Les matériaux naturels, Les matériaux traités au liant hydraulique, Les matériaux traités au liant hydrocarboné [12].

I.6.1 Béton Bitumineux (BB)

I.6.1.1 Définition

Le béton bitumineux (BB) est un mélange à granularité continue se composant de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels. Les classes granulaires des bétons bitumineux retenus dans le présent cahier des charges sont les suivantes : BB 0/4, BB 0/8, BB 0/12, BB 0/16 et BB 0/32. [13].

I.6.1.2 Domaine d'utilisation

Ce type de matériau est bien adapté aux couches de surface des chaussées à forts trafics en raison des bonnes caractéristiques mécaniques. Il est aussi bien utilisé pour les chaussées neuves qu'en renforcement [12]. Selon le type, il convient pour couche de roulement ou couche de liaison de routes, autoroutes et aérodromes. Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud. [13].

I.6.2 Grave-Bitume (GB)

I.6.2.1 Définition

La grave-bitume (GB) est un mélange à granularité continue 0/32 se composant de granulats, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels. Elle est appropriée pour couche de base de routes, autoroutes et aérodromes. Elle est fabriquée, mise en œuvre et compactée à

chaud et assure la portance de la chaussée et la répartition des charges du trafic transmis par les couches de surface. Elle sert aussi à établir le profil souhaité de la chaussée respectivement comme couche de reprofilage.[13].

I.6.2.2 Domaine d'utilisation

- La technique des graves bitumes est destinée à la réalisation des assises de chaussée (couche de base et couche de fondation).
- Réseau RP1 : Classes de trafic TPL3 à TPL7 [12].

I.6.3 Béton de Ciment (BC)

I.6.3.1 Définition

Les chaussées modernes en béton peuvent se présenter sous différentes conceptions ; on peut citer les dalles courtes (3 à 5 m) non armées, à joints goujonnés ou non. Les dalles moyennes (5 à 7 m) goujonnées ou non, les dalles épaisses (30 à 40 cm) courtes et non armées, etc. Dans le cadre du catalogue de dimensionnement des chaussées, il s'agit de dalles en béton de ciment (granulats et ciment) courtes ou moyennes non armées et goujonnées [12].

I.6.3.2 Domaine d'utilisation

- Couche de roulement et couche de base.
- Réseau principal de niveau 1 (RP1) : Classes de trafic TPL3 à TPL7. [12].

I.6.4 Grave non traitée (GNT)

I.6.4.1 Définition

Le grave non traitée est le plus ancien des matériaux modernes. Depuis qu'elle s'est substituée au macadam, dans les années 50, le progrès des méthodes de fabrication a permis d'en faire un matériau de qualité sans cesse améliorée, l'expression la plus achevée de cette technique étant la « grave recomposée humidifiée » ou GRH.

Un grave non traitée est un mélange à granularité continue, de cailloux, de graviers et de sable, avec généralement une certaine proportion de particules plus fines. Pour pouvoir être mise en œuvre dans de bonnes conditions et jouer correctement son rôle dans la chaussée, la grave non traitée doit répondre à un certain nombre de conditions [14].

- Les Graves non traitées [GNT] sont définies comme étant des graves 0/D, ne comportant pas de liant. On distingue deux types de GNT suivant leur mode d'élaboration :
- Les GNT de type «A» sont obtenus en une seule fraction (ce type de GNT ne permet pas une optimisation de la granulométrie et n'offre pas de garantie d'homogénéité).
- Les GNT de type «B» sont des matériaux provenant du mélange d'au moins deux fractions granulométriques, malaxées et humidifiées en centrale [12].

I.6.5 Tufs Calcaires (TUF)

I.6.5.1 Définition

Les tufs calcaires ou «encroûtement calcaires» sont des matériaux composés essentiellement, mais pas exclusivement de carbonate de calcium. Les tufs calcaires existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; ils sont dus à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantité plus ou moins grande de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration. Ils sont très répandus dans les zones climatiques II et III.

On les rencontre dans les bassins relativement plats irrigués par les eaux de ruissellement provenant des massifs calcaires limitrophes. On distingue généralement dans un tuf calcaire mûr trois horizons du haut en bas :

Horizon A : il constitue la terre végétale dont l'épaisseur est de 20 à 30 cm.

Horizon B : C'est l'horizon de l'encroûtement proprement dit ; son épaisseur peut varier de 1 à 2 m. Il comprend le plus souvent:

- Dalle compacte, de consistance dure, à forte teneur en carbonate et dont l'épaisseur peut atteindre 20 cm.
- Croûte constituée par une superposition de feuillets.
- Zone nodulaire. Il s'agit de nodules calcaires durs pris dans une gangue calcaire plus ou moins pulvérulente.

Horizon C : C'est le matériau d'origine dans lequel on rencontre cependant quelques nodules. [12].

I.6.5.2 Domaine d'utilisation

Couches d'assises (base, fondation), pour le réseau principal de niveau 2 (RP2).

TUF1 en couche de fondation, pour le réseau principal de niveau 1 (RP1). [12].

I.6.6 Sable bitume (SB)

I.6.6.1 Définition

Le sable bitume est un mélange d'un ou plusieurs sables avec du bitume pur. Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassage-broyage (sable fileries, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment). Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenable. La fabrication du mélange (sable + bitume) se fait en centrale d'enrobage à chaud. [12].

I.6.6.2 Domaine d'utilisation

L'emploi du sable bitume est envisageable en couche de base pour les chaussées du réseau principal de niveau 2 (RP2). [12].

I.6.7 Grave-ciment (GC)

I.6.7.1 Définition

Un grave ciment est un mélange de granulats, de ciment, éventuellement de retardateur de prise, et d'eau, fabriqué en centrale de malaxage.

I. 6.7.2 Domaine d'utilisation

- Couche de fondation de chaussées en béton de ciment
- Chaussées neuves de type RP1 : réseau principal de niveau 1 (TPL3 à TPL7) [12].

I.6.8 Sables gypseux (SG)

I.6.8.1 Définition

Les encroûtements gypseux sont situés dans la zone climatique IV, c'est la zone des chotts et souvent de grandes étendues dunaires. Les encroûtements gypseux se présentent généralement en couches horizontales.

Horizon A : Appelé «Tirch» en arabe, épaisseur varie de 20 à 30 cm. Cette partie est friable, poreuse et souvent sableuse.

Horizon B : Encroûtement massif ou «Taffeza» : Son épaisseur varie de 1 à 2 m. Il est souvent utilisé comme pierre à bâtir C'est l'horizon des roses des sables. Encroûtements friables ou «sables gypseux». Ils ne se différencient des encroûtements massifs que par la dureté.

Horizon C : Les encroûtements tendres : Appelés sables gypseux sont les matériaux recherchés pour l'utilisation en technique routière, ils sont d'extraction facile et évoluent en sable au compactage.

1.6.8.2 Domaine d'utilisation

Couches d'assises (base, fondation), pour le réseau RPI - SGI en couche de fondation, pour le réseau RPI. [12].

I.7 Choix de type du corps de chaussée

- Disponibilité et coût des matériaux.
- Qualité de la main d'œuvre.
- Disponibilité de l'équipement.
- Nature de la circulation.
- Condition locale.
- Permanence de la construction [15].

I.8 Principales méthodes de dimensionnement des chaussées

On distingue deux familles des méthodes :

Les méthodes empiriques dérivées des études expérimentales sur les performances des chaussées.

Les méthodes dites «rationnelles» basées sur l'étude théorique du comportement des chaussées [16].

Les méthodes du dimensionnement de corps de chaussée les plus utilisées sont :

- La méthode de C.B.R (Californian - Bearing -Ratio).
- Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves.
- Méthode du catalogue des structures.
- La méthode L.C.P.C (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

I.8.1 Méthode C.B.R (California – Bearing – Ratio)

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90° à 100°) de l'optimum Proctor modifié. La détermination de **l'épaisseur totale** du corps de chaussée à mettre en œuvre s'obtient par l'application de la formule présentée ci-après:

Pour un trafic en voiture particulière :

$$TMJA \times 365 \times 1.5t < 100000 \text{ t/ans}$$

Avec :

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I_{CBR} + 5} \text{ (cm)}$$

Pour un trafic en voiture particulière:

$$TMJA \times 365 \times 1.5t \geq 100000 \text{ t/ans}$$

$$\text{Avec : } e = \frac{100 + \sqrt{P}(75 + 50 \log_{10} \frac{N}{10})}{I_{CBR} + 5} \text{ (cm)}$$

e: épaisseur équivalente

I_{CBR} : indice CBR (sol support)

N: désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide

P: charge par route P = 6.5 t (essieu 13 t)

Log: logarithme décimal

L'épaisseur équivalente est donnée par la relation suivante:

$$e = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3$$

Où:

- c₁, c₂, c₃ : coefficients d'équivalence.
- e₁, e₂, e₃ : épaisseurs réelles des couches.

Coefficient d'équivalence

Le tableau ci-dessous indique les coefficients d'équivalence pour chaque matériau :

Tableau 1.1 Les valeurs des coefficients d'équivalence

Matériaux utilisés	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux ou enrobe dense	2.00
Grave ciment	1.50
Grave bitume	1.50 à 1.70
Grave concassée ou gravier	1.00
Grave roulée – grave sableuse T.V.O	0.75
Sable ciment	1.00 à 1.20
Sable	0.50
Tuf	0.60

I.8.2 Méthode du catalogue des structures

Catalogue des structures type neuf est établi par «SETRA ».

Il distingue les structures de chaussées suivant les matériaux employés.

Il considère également quatre classes de trafic selon leur importance, allant de 200 à 1500 Véh/J. Il tient compte des caractéristiques géotechniques du sol de fondation.

Il se présente sous la forme d'un jeu de fiches classées en deux paramètres de données :

1. Trafic cumule de poids lourds à la 10^{ème} année Tj.
2. Les caractéristiques de sol (Sj).

1. Détermination de la classe de trafic

Tableau I.2 Déterminant la classe du trafic

Classe de trafic	Trafic poids lourds cumule sur 20 ans
T ₁	$T < 7.3 \cdot 10^5$
T ₂	$7.3 \cdot 10^5 < T < 2 \cdot 10^6$
T ₃	$2 \cdot 10^6 < T < 7.3 \cdot 10^6$
T ₄	$7.3 \cdot 10^6 < T < 4 \cdot 10^7$
T ₅	$T > 4 \cdot 10^7$

Le trafic cumulé est donné par la formule suivante :

$$T_C = Tpl \left[1 + \frac{(1 + \tau)^{n+1} - 1}{\tau} \right] \times 365$$

Avec :

Tpl : trafic poids lourds à l'année de mise en service.

τ : taux d'accroissement annuel.

Détermination de la classe du sol

Tableau I. 3 Déterminant la classe du sol

Classe de sol	Indices C.B.R
S1	25-40
S2	10-25
S3	05-10
S4	<05

I.8.3 Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves

L'utilisation de catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées : trafic, matériaux, sol support et environnement. Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée. La Méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une méthode rationnelles qui se base sur deux approches :
 Approche théorique - Approche empirique

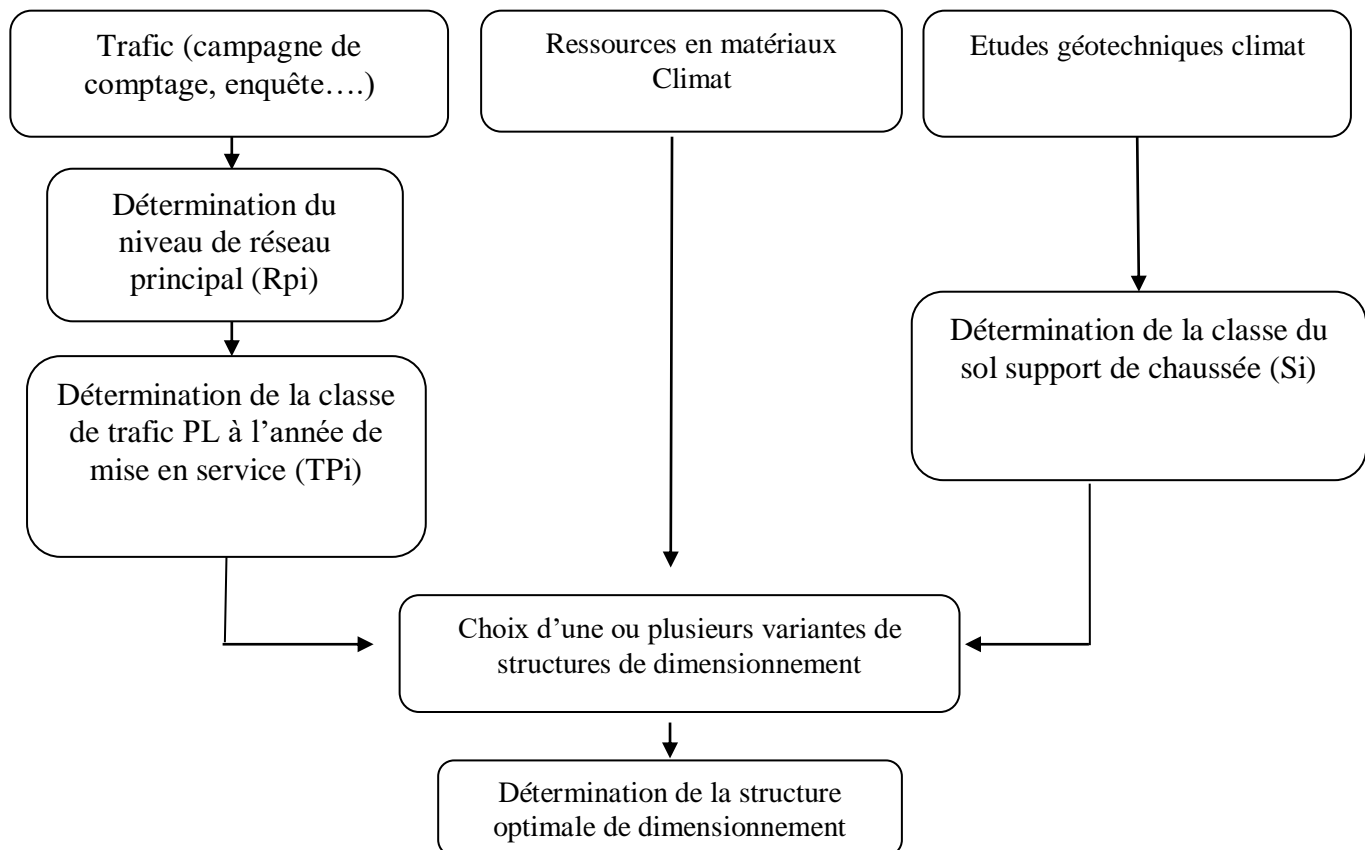


Figure I.23 La démarche du catalogue

I.9 Conclusion

La structure d'une chaussée est en général composée de trois groupes de couches superposées: les couches d'assises, la plate-forme support, et les couches de surface. Les couches d'assises sont constituées d'une couche de base et d'une couche de fondation souvent réalisées en matériaux granulaires non liés ; elles constituent le corps de chaussée et servent à répartir les chargements mécaniques induits par le trafic et les transmettre à la plate-forme support. Les couches de surface comprennent essentiellement la couche de roulement, qui a pour rôle de protéger les couches d'assises des infiltrations et d'améliorer la qualité de la surface de la chaussée, elles peuvent être constituées par des couches d'enrobés ou une simple couche d'enduit. Dans le tableau suivant (Tab 1.4) on a des comparaisons entre les différents types des chaussées par rapport à les différentes couches, le domaine d'utilisation est les conditions aux interfaces.

Tableau I.4 Comparaison des différents types de chaussées

Types des chaussées	Nature des couches			Domaines d'utilisation usuels	Conditions aux interfaces	commentaire
	Surface	Base	Fondation			
Souples	Bitumineuse	GNT		Trafic faible à moyen faible	Interfaces collées	Epaisseur totale :30à60cm
Bitumineuse épaisse	Matériaux Bitumineux	Matériaux Bitumineux (GT)		Tous types sauf : Trafic très faible, charge lourdes, exceptionnelles, contextes spécifiques : aéronautiques, tramways	Toutes les couches sont considérées comme collées	Epaisseur de la couche d'assise : 15 à 40 cm
Semi – rigide	Bitumineuse	MTLH		Trafic moyens	-collées -semi- collées	Ep de couche D'assise : 20à50 cm
Rigide	Béton de ciment (15à40cm)		MTLH – GNT-Bitume	Trafic moyens Forts à forts trafics Spéciaux et Charge lourdes : Aéroports, Plateformes Industrielles et Portuaires, Tramways.....	L'interface entre les couches base-fondation : décollée	Couche de forme en MTLH -Dispositions particulière (dalle goujonnées ou non béton armé continu, ect.) afin d'assurer une continuité Mécanique Franchissement D'une fissure due au retrait du béton
Mixte	Matériaux Bitumineux		MTLH	Trafics forts et très forts	L'interface entre les Couches Fondation-Base : collée	Rapport de 0.5 entre l'épaisseur de matériaux bitumineux et celle de la structure de chaussée
Inverse	Bitumineuse	GNT	MTLH	Trafics forts et très forts	Bitumineuse GNT :collée GNT-fondation : décollée	Ep de La GNT (environ 12cm)

Le dimensionnement des structures de chaussée constitue une étape importante de l'étude. Il s'agit en même temps de choisir les matériaux nécessaires ayant des caractéristiques requises et de déterminer les épaisseurs des différentes couches de la structure de la chaussée. Tout cela en fonction de paramètres fondamentaux suivants Le trafic L'environnement de la route est Le sol support.

Chapitre II
Bitume, Granulats Et Les Enrobés Bitumineux

CHAPITRE II : Bitume, Granulats Et Les Enrobés Bitumineux

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons définir des enrobés bitumineux. Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur ses composants Bitume et granulats avec les caractéristiques appropriées de chacun d'eux. Ensuite, nous étudions la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivants: la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité, ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix.

II.2 Bitume

II.2.1 Définition

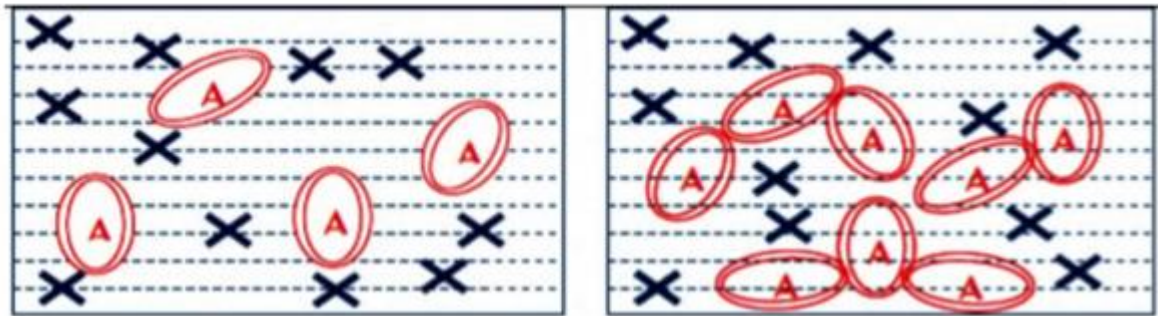
Le bitume est une substance composée d'un mélange hydrocarbures, très visqueuse à la température ambiante et de couleur noire, il contient du carbone et de l'hydrogène avec de faibles proportions d'oxygène, d'azote et de soufre ainsi que des métaux à l'état de traces. Contenant du bitume, ou du goudron, ou les deux, un liant hydrocarboné agrégé avec des granulats, fournit des matériaux enrobés et ceci grâce à sa propriété essentielle qui est le collage permettant l'agglomération des matériaux. Dans le langage courant, le bitume est souvent confondu avec le goudron d'origine houillère, ou avec l'asphalte dont il n'est qu'un composant.



Figure II.1 bitume[13]

En construction routière, il sert de liant pour la réalisation de matériaux enrobés à chaud, tels que les bétons bitumineux ou les graves bitumes. Il entre également dans la fabrication d'enduits superficiels sous forme d'émulsion ou bien fluidifié par un solvant [17].

Le bitume est schématisé par les deux configurations extrêmes suivantes :



Bitume dit « sol » : dispersion complète des Asphaltènes A dans le bitume ;bitume moins Visqueux ,mais plus susceptible à la température

Bitume dit « gel » : amas dasphaltènes A dans le bitume ;bitume plus visqueux, mais moins susceptible à la température

Figure II.2 Représentation Schématique du Bitume[13].

II.2.2 Provenance

En générale il existe trois types de liants hydrocarbonés :

Les liants naturels: qui se trouve dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est une roche asphaltique telle qu'elle se présente dans le gisement et qui, après broyage est dénommée asphalte [18].

Les bitumes de pétrole : qui sont obtenu par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.

Les goudrons : qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air, du lignite et de tourbe et du bois. Mais le bitume utilisé de nos jours pour le revêtement des routes et certain usages industriels sont fabriqué en distillation des pétroles bruts.

II.2.3 Structure physico-chimique

Le bitume est composé en moyenne de :

- 80 à 85 % de carbone.
- 10 à 15 % d'hydrogène.
- 2 à 3 % d'oxygène.
- Faible quantité de soufre et de l'azote.
- Traces de nickel et d'aluminium.

Le bitume est un mélange d'hydrocarbure à poids moléculaire élevé pouvant appartenir aux trois groupes suivants :

- Aliphatique
- Naphténique
- Aromatique
- Oléfinique

L'utilisation, comme solvant sélectif, d'un hydrocarbure léger en grand excès, permet de fractionner un bitume en deux parties :

Les maltènes Il représente 70 % et plus du bitume. C'est la partie dissoute, elle a l'aspect d'une huile visqueuse de couleur foncée. Ils sont composés de résines, d'huiles aromatiques et d'huiles saturées.

Les asphaltènes Ils peuvent représenter jusqu'à 30 % du bitume. C'est la fraction précipitée, elle est constituée par des corps de poids moléculaire très élevé se présentant sous la forme D'un corps solide et noirâtre, cassant, à point de ramollissement élevé. Le pourcentage des asphaltènes sera d'autant plus élevé que le bitume sera plus dur. Il n'y a pas de discontinuité entre maltènes et asphaltènes, le fractionnement obtenu dépendant du solvant employé [19].

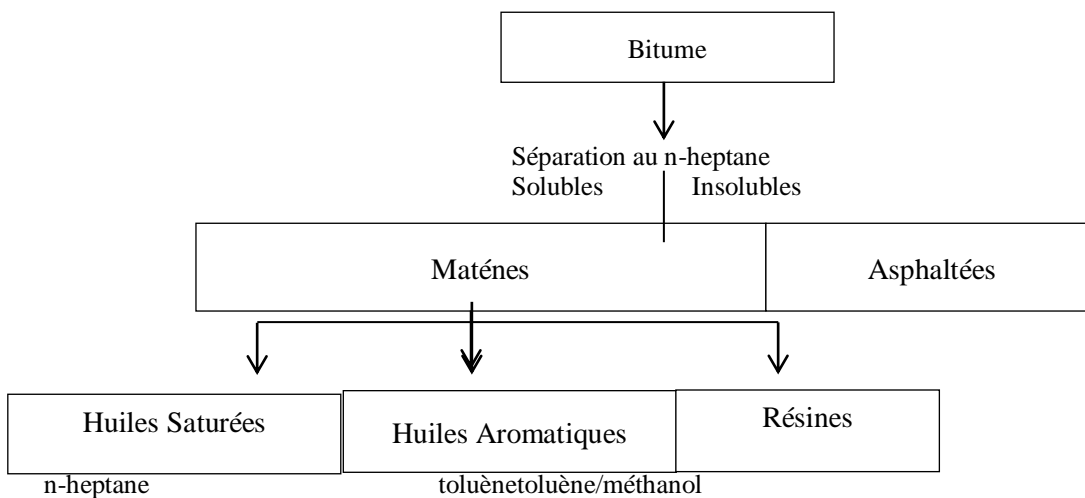


Figure II.3 les composantes de bitume

II.2.4 Fabrication

Les Différents modes de fabrication des bitumes existent et peuvent être combinés :

Le Raffinage: Dans une raffinerie, les diverses installations transforment, le pétrole brut en produits finis allant des bitumes et fiouls, au différents combustibles et carburants, gaz et bases pour la chimie. Le bitume est obtenu par traitement de la fraction de distillation la plus lourde de bruts sélectionnés dits bruts à bitume .ce traitement est réalisé dans des unités spécifiques de la raffinerie, pour amener le produit aux spécifications officielles ou requises par les utilisateurs [6].

La distillation : C'est un procédé physique d'évaporation des constituants volatils : la phase vapeur est éliminée et condensée ; la fraction lourde restant en fond de colonne constitue le bitume. Après décantation et dessalage, le brut est porté à une température supérieure à 300°C et la distillation se fait en deux phases : -la première à pression atmosphérique. -la deuxième sous vide, sur la fraction atmosphérique la plus lourde. Si la distillation directe ne permet pas d'obtenir des bitumes aux caractéristiques requises, on est amené à pratiquer un désasphaltage ou un semi-soufflage à l'air de la fraction sous-vide la plus lourde. **Désasphaltage :** Est

appliquée sur la fraction sous vide la plus lourde, elle est basée sur le principe de la séparation physique des constituants par solubilisation différentielle des fractions lubrifiantes et bitumineuses dans certains solvants très sélectifs, tels que le propane, le butane ou le pentane. la fraction lourde insoluble dans le solvant se nomme asphalte de désasphaltage – à ne pas confondre avec l’asphalte appliqué directement sur la route –et constitué une base à bitume ,suivant la nature de ce solvant et les conditions de fonctionnement de l’unité de désasphaltage (température ,proportion de solvant dans l’alimentation ,il est possible d’obtenir différents grades. Ce procédé appliqué avec un seul solvant pour la fabrication de bitume [6].

Soufflage : Le soufflage comme nous l'avons mentionné Consiste à injecter de l’air dans une base bitumineuse portée à des températures comprise entre 250 et 300°C .le résultat est un durcissement accompagné d’une diminution de la susceptibilité à la température.

L’efficacité de la réaction qui peut se faire en continu ou en discontinu, dépend :

- de la nature de la charge.
- du rapport air/charge.
- de la température.
- de la présence ou non de catalyseur.

Dans la pratique, on distingue :

- Le semi-soufflage, qui consiste à traiter un fond de « colonne sous vide » trop mou pour en faire un bitume routier.
- Le soufflage d’une base plus complexe pour obtenir des bitumes industriels à très hauts indices de pénétration (IP) allant jusqu’à +7 par exemple.

Rappelons que le soufflage crée des asphaltènes au détriment des aromatiques et confère une structure du types gel ainsi que nous le verrons plus loin.

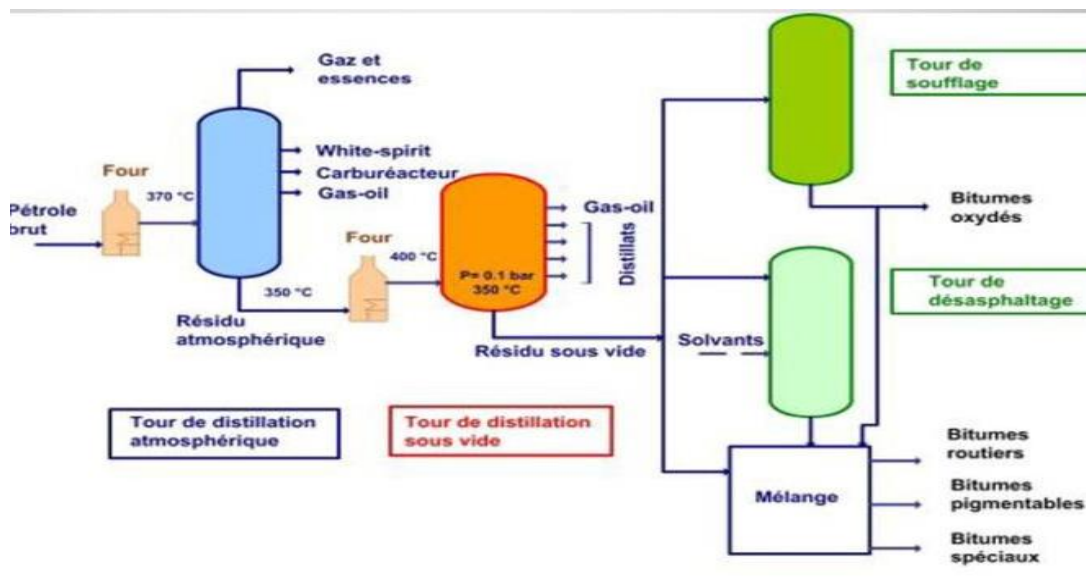


Figure II.4 Fabrication du bitume[15]

II.2.5 Propriétés

Les qualités physiques et chimiques du bitume en ont fait un matériau de toute première importance. Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre.

C'est un excellent isolant thermique et diélectrique. Il est léger, ductile et souple. Du point de vue mécanique, il se comporte comme un matériau plastique ou élastique. Il est insoluble dans l'eau, mais l'on peut en obtenir des solutions dans de nombreux solvants organiques [20].

II.2.6 Principaux types des bitumes

Les bitumes purs

Obtenus par divers procédés de raffinage à partir de bruts pétroliers, ils ne comportent aucun ajout destiné à en modifier la consistance ou les propriétés.

Les bitumes fluidifiés

Bitumes mélangés avec un diluant plus ou moins volatil, en vue d'abaisser leur viscosité. Actuellement dans la profession routière, le diluant utilisé pour abaisser la viscosité provient de la distillation du pétrole, et les bitumes fluidifiées correspondants font l'objet de classification et de spécification.

Les bitumes fluxés

Bitumes amollis par l'addition d'une huile de fluxage de faible volatilité. Actuellement, dans la profession routière, l'huile de fluxage provient de la distillation du goudron de houille, et les bitumes fluxés correspondants font l'objet de classifications et de spécifications. Les bitumes fluxés aux huiles de pétrole sont des types de produits en cours de développement pour lesquels il n'existe pas encore de classification ni de spécifications.

Les bitumes fluxés mixtes

Ce sont des bitumes purs, dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant d'une part de la distillation du goudron de houille, d'autre part, de la distillation du pétrole. Les produits provenant de la distillation du pétrole entrent pour moins de 50% dans la composition des produits ajoutés au bitume pur. Les bitumes fluxés mixtes sont des types de produits en cours de développement pour lesquels il n'existe pas encore de classification ni de spécifications.

Les bitumes composés

Ce sont des mélanges qui se subdivisent eux-mêmes en : Bitume-goudron, mélange de bitume pur et de goudron de houille. Bitume –brai, mélange de bitume pur et de brai de houille. Dans ces mélanges, le bitume entre toujours pour plus de 50%. Conventionnellement, on distingue le goudron et le brai par une limite de température d'équiviscosité (T .E.V) ou de point de

ramollissement bille et anneau (B.A), tout produit ayant une (T .E.V) inférieure à 60°C ou un point de ramollissement bille et anneau (B.A) inférieure à 40°C c'est appelé goudron. Les produits ayant des caractéristiques supérieures à 60°C pour la T .E.V ou à 40°C pour le B.A sont dénommés brais.

Les bitumes modifiés

Ce sont des bitumes des catégories précédentes dans lesquels on a ajouté une ou plusieurs substances ,le plus souvent macromoléculaires destinées à modifier certaines propriétés intrinsèques du liant de base .par définition ,on n'inclura pas sous la terminologie « bitume modifié » les produits pour lesquels la modification du liant de base consiste en l' addition de fines minérales ou d'un additif d'adhésivité dont l'effet est lié au couple liant-granulats et non pas ,au seul liant . Les bitumes modifiés sont des types de produits en cours de développement pour lesquels il „existe pas encore de classification ni de spécifications [21].

II.2.7 Les spécifications des bitumes

Selon NAFTEC, l'Algérie exige au titre des importations des bruts à bitume les spécifications indiquées dans les tableaux suivants :

Tableau II. 1 les spécifications des bitumes purs

Classification des bitumes purs					
Classe	180-220	80-100	60-70	40-50	20-30
Pénétrabilité (25°C,100g,5s)....(1/10mm)	180à220	80à100	60à70	40à50	20à30
Point de ramollissement Bille et Anneau(°C)	34à43	41à51	43à56	47à60	52à68
Densité relative à 25°C (méthode au picnomètre)	1.00à1.07		1.00à 1.10		
Perte de masse au chauffage (163°C,5h)%	<2		<1		
Pourcentage de pénétrabilité restant après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale.....	>70				
Point d'éclair (appareil Cleveland)...(°C)	>230	>230	>230	>250	>250
Ductilité à 25°C.....(cm)	>100	>100	>80	>60	>25
Solubilité dans la tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄).....%	>99.5				
Teneur en paraffine(%)	<4.5				

Tableau II. 2 les spécifications des bitumes Fluidifiés

Classification des bitumes Fluidifiés					
Classes	01-10	10-15	150-250	400-600	800-1400
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre	-	-	-	-	-
D'orifice 4mm, à 25°C (S)	<30	10à15	150à250	400à600	80 à200
D'orifice 10 mm, à 25°C (S)	-	-	-	-	-
D'orifice 10mm, à 40°C (S)	-	-	-	-	-
Densité relative à25°C(méthode au pycnomètre)	0.90à1.02		0.92à1.4		
Distillation fractionnée (résultats exprimés en pourcentage du volume initial) fraction distillant au – dessous de :					
190°C	<9	-	-	-	-
225°C	10à27	<11	<3	<2	<2
315°C	30à45	16à28	6à15	5à12	3à11 <13
360°C	<47	<32	<20	<15	
pénétrabilité à 25°C ,100g, 5s du résidu à 360°C de la distillation	80à250		80à200		
Point d'éclair (appareil Cleveland)...(°C)	≥55	≥55	≥55	≥55	≥55

Tableau II. 3 les spécifications des bitumes Fluxés par un huile de goudron de houille

Classification des bitumes Fluxés				
Classes	400-600	800-1200	1200-1600	1600-2400
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre ,d'orifice 10mm	400-600	-	-	-
- à 25°C (S)	-	90à140	140à200	-
- à 40°C (S)				200 à300
Densité relative à25°C(méthode au pycnomètre)	0.95à1.15			
Distillation fractionnée (résultats exprimés en pourcentage du volume initial) fraction distillant au – dessous de :				
190°C	<5	<4	<3	<2
225°C	<10	<10	<10	<10
315°C	<25	<25	<25	<25
360°C	<30	<30	<25	<25
Point d'éclair (vase clos)...(°C)	≥55	≥55	≥55	≥55

Tableau II. 4 les spécifications des bitumes composés

Classification des bitumes-goudron			
Classe	1200	2000	2500
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre, d'orifice 10mm à40°C .	80-120	120-200	200-240
Température d'équiviscosité mesurée.(°C)			
Densité relative à25°C (méthode au pycnomètre).	44-47	47-50	50-55
Point d'éclair (vase ouvert) ...(°C).	1,04à 1,11	1,05à 1,12	1,05à 1,12
Teneur en naphtalène. (%)	>130		
Teneur en bitume (en masse) (%)	<1		
	59à61		
Classification des bitumes-goudron			
Classe	60-70	40-50	
pénétrabilité à 25°C ,100g, 5s).....(1 /10mm) .	60à70	40à50	
Point de ramollissement Bille et Anneau (°C)	48à53	51à55	
Densité relative à25°C(méthode au pycnomètre).	1,03à 1,09		
Point d'éclair (vase clos)...(°C).	>230		
Teneur en bitume (en masse) (%).	79à81		

II.2.8 Principales caractéristiques des bitumes routiers

II.2.8.1 La mesure de pénétrabilité (NF EN 1426)

La pénétrabilité représente la mesure de l'enfoncement d'une aiguille normalisée dans un bitume maintenu à une température donnée, au bout de 5 secondes sous une charge définie. Elle s'exprime en 1/10 mm [22]. La pénétrabilité la plus utilisée est celle mesurée à 25 °C et avec un chargement de 100g. Ainsi, à une température donnée, plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible.



Figure II.5 Principe de pénétration

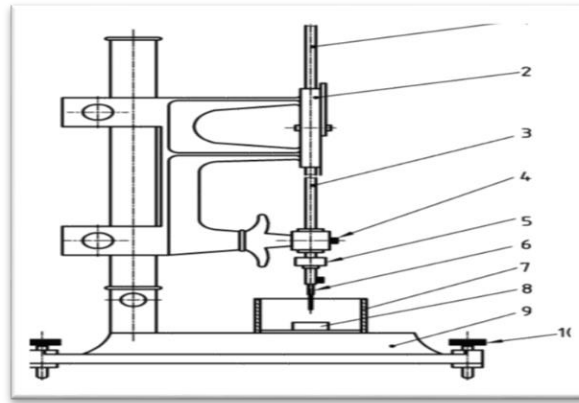


Figure II.6 Appareil de pénétrabilité

Il existe, en Algérie, trois classes de bitumes routiers qui sont dans le sens des duretés croissantes il s'agit 80/100,40/50 et 20/30. Pour mieux définir un bitume, on peut être amené à effectuer des essais à plusieurs températures, ce qui permet de tracer une courbe de pénétrabilité en fonction de la température, très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume. [14].

II.2.8.2 La Température de ramollissement Bille et Anneau(TBA) (NFEN 1427)

C'est la température pour laquelle une bille d'acier s'enfonce à travers un disque de bitume contenu dans un anneau de métal dans des conditions définies de fabrication et d'essai.

A cette température, le bitume présente une structure interne telle que les contraintes auxquelles il est soumis, par les conditions même de l'essai, sont suffisantes pour permettre une déformation irréversible, elle-même définie. Pour cela, une bille d'acier est placée sur un anneau de cuivre rempli préalablement de bitume, l'ensemble est plongé dans un bain dont la température est élevée de 5°C par minute : la température de ramollissement est celle à laquelle la bille, entraînant la membrane de bitume, atteint un repère fixé. De bonnes corrélations existent entre la Température de ramollissement Bille et Anneau (TBA).et la résistance à l'orniérage pour les bitumes purs (conventionnels) [23].

Ces deux derniers essais permettent de définir à quelle classe de pénétrabilité (ou grade) le bitume appartient [24].

Tableau II.5 Classification des bitumes selon la pénétrabilité et TBA.

	unité	Classes								
		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Pénétrabilité	0.1 mm	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
TBA	C°	55-63	52-60	50-58	46-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38

Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur.

II.2.8.3 La densité relative

Quoique la densité relative ne soit pas normalement spécifiée, il est préférable de la connaître pour le bitume utilisé. Cette information est nécessaire pour faire les corrections de volumes à des températures élevées. Elle est aussi utilisée dans la détermination des vides dans les

mélanges bitumineux compactés. Par définition La densité relative est la proportion de la masse de n'importe quel volume du matériau à la masse d'un volume égale d'eau, les deux étant à une température spécifiée .Ainsi, une densité relative de 1.05 signifie que le matériau est 1.05 fois plus pesant que l'eau à la température indiquée. [24].

II.3 Granulats

II.3.1 Définition

On appelle granulats des matériaux pierreux de petites dimensions, produits par l'érosion ou le broyage mécanique (concassage) des roches. Les granulats sont des grains de dimensions comprises entre 0 et 125mm .elles sont désignés par leurs plus petite et plus grandedimensions d et D . l'intervalle d /D étant appelé classe granulaire [25]. Cette désignation admet que des grains puissent être retenus sur le tamis D et que d'autres puissent passer au travers du tamis d . dans les limites précisées par la norme. [26].

II.3.2 Classification des granulats selon la provenance

Granulats naturels

Granulats roulés : ils sont les résultats de la désagrégation des roches par l'eau, le vent ou le gel. Ainsi ils se sont formés des dépôts sédimentaires de grains de grosseur allant du sable fin aux gros blocs, de natures minéralogiques différentes [27].

Trois catégories de granulats roulés existent dans la nature :

- Les granulats de rivière (d'oued). - Les granulats de mer. - Les granulats de dunes.



Figure II.7 granulats naturels roulés

Granulats concassés (de carrières) : ils proviennent du concassage de roches dures (granits, porphyres, basaltes, calcaires durs...etc.). Ils sont caractérisés par un aspect anguleux à arêtes vives.



Figure II.8 Granulats concassés

Granulats artificiels : Ils proviennent de la transformation thermique des roches (Exemple : laitier du haut fourneau) ou de démolition d'ouvrages [28].

II.3.3 Classification des granulats routiers

En construction routières les granulats se classent d'abord selon leur granularité, il existe six classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés [26].

Tableau II. 6 les Classifications des granulats

Fillers	$0/D$ ou $D < 2\text{mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063 mm.
Sablons	$0/D$ ou $D \leq 1\text{mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063 mm
Sables	$0/D$ ou $1 < D \leq 6,3$ mm
Graves	$0/D$ ou $D > 6,3$ mm
Gravillons	d/D ou $d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 125\text{mm}$
Ballast	Ou $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50$ mm

La teneur en fines d'un granulat est définie par le passant à 0.063 mm. [29].

II.3.4 Principaux essais propres aux granulats

L'aptitude des granulats à être utilisés dans les assises de chaussée est appréciée par un certain nombre d'essais:

- Celle qui tient à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs).
- Celle qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

En outre les essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :

- La résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles.
- La résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro-Deval humide.
- La résistance au polissage (norme P18-575). [30].

II.3.4.1 Analyse granulométrique d'un sable et d'un gravier (NF EN 933-1)

L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions des grains.
- Déterminer les proportions de grains de même dimension (% pondéral).
- En déduire le Module de finesse (Mf).

Les granulats utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil sont des matériaux roulés ou concassés d'origine naturelle ou artificielle, de dimensions comprises entre 0 et 80 mm. Ils ne sont généralement pas constitués par des éléments de tailles égales mais par un ensemble de grains dont les tailles variées se répartissent entre deux limites : la plus petite (d) et la plus grande (D) dimension en mm.

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. La granulométrie ou analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0,063 mm. On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis.

Ci-dessus quelques courbes granulométrique typiques de sable, gravillons et cailloux [31].

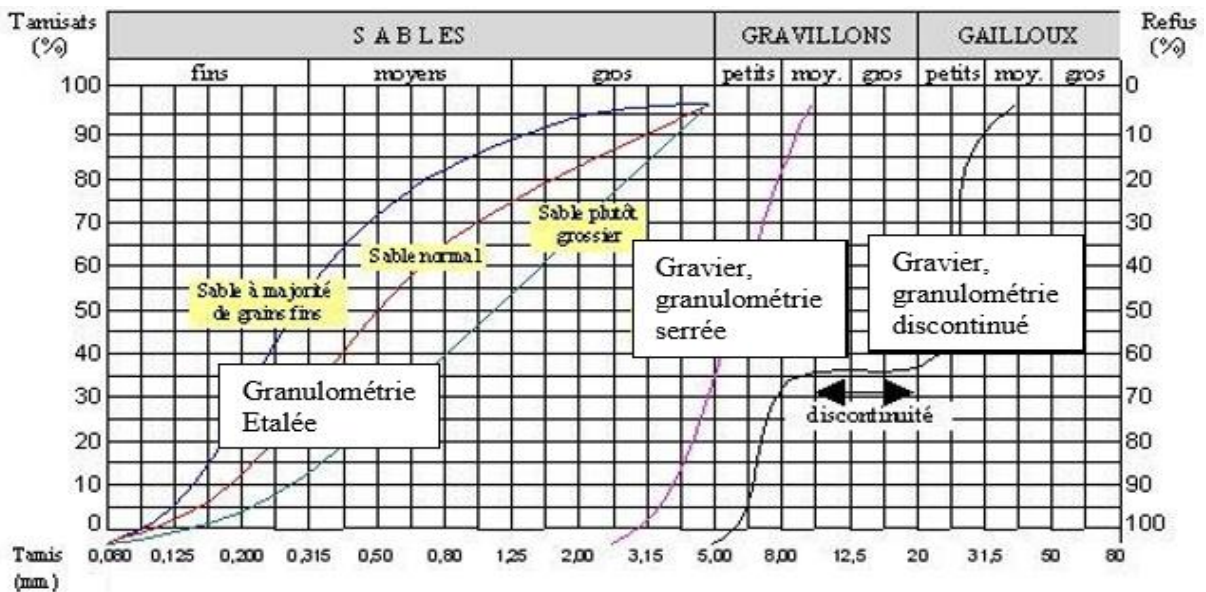


Figure II.9 courbes granulométrique typiques de sable, gravillons et cailloux

II.3.4.2 Essai au bleu de méthylène

Cet essai, utilisé des manières courantes pour caractériser l'activité des argiles contenue dans le sol, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graves d'origines naturelles ou artificielles. L'essai est conduit sur un échantillon contenant au moins 200g de fraction granulométrique 0/2 mm [32].

II.3.4.3 Essai d'aplatissement (EN FN 933-3 mars 1997)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement des granulats. Ce coefficient permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats [33].

II.3.4.4 Essais de résistance à l'usure et au choc des granulats

Déterminé par l'essai Micro Deval (MDE) en présence d'eau, on utilise un broyeur à billes d'acier, contenant de l'eau, provoque une usure des gravillons par frottements réciproques avec production d'éléments fins (passant au tamis 1,6 mm), MDE représente la proportion d'éléments fins produits pendant l'essai, plus MDE est faible meilleur sera la résistance à l'usure [34].

II.3.4.5 Résistance au choc (essai Los Angeles)

Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats à essayer et des boules d'acier. On effectue 500 révolutions à 30 tr/min. [35] Le poids et la granularité de la prise d'essai sont déterminés en fonction du diamètre maximal du granulat. Après essai, les matériaux sont criblés au tamis de maille 1,6 mm et le Poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai. Le rapport, multiplié par 100, est appelé coefficient Los Angeles (LA) [14].

II.3.4.6 Densité relative

La densité relative des agrégats est ordinairement déterminée pour deux raisons :

- Pour permettre le calcul des vides dans le béton bitumineux à l'état compacté.
- Pour ajuster les quantités de fractions constituantes de l'agrégat dans le béton bitumineux, lorsque la densité relative de ces fractions constituantes varie sensiblement.

II.4 Enrobé

Dans les deux grands titres précédents nous avons vu le bitume et le granulat. Les deux ensemble forment l'enrobé, lequel doit aussi répondre à certaines exigences. On appelle enrobé tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné ; ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propriétés.

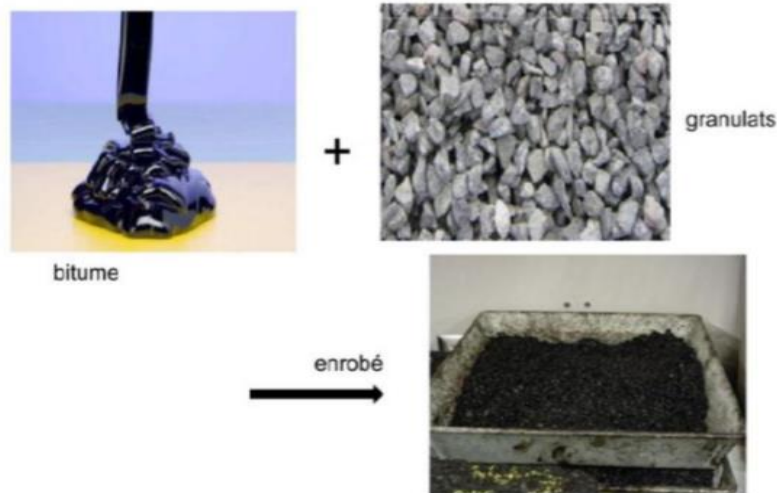


Figure II.10 La composition d'enrobé[15]

II.4.1 Les différents types des enrobés bitumineux à chaud

Il s'agit des enrobés fabriqués à chaud (aux alentours de 180 °C) et appliqués à chaud (aux alentours des 150 °C) [36].

Béton bitumineux : enrobé riche en bitume, utilisé principalement pour les couches de roulement, c'est-à-dire pour les couches supérieures de la chaussée. Les bétons bitumineux se classent en fonction de leur granulométrie. Ils sont toujours posés sur une couche de base en matériaux hydrocarbonés ou traités au liant hydraulique ou sur une couche de liaison en enrobés pour les couches minces.

Béton bitumineux ultra mince (BBUM) : épaisseur de couche de 2 cm, utilisé pour les couches de roulement particulières où une macro texture importante est recherchée ou dans le cas de travaux d'entretien de surface. Toujours posé sur une couche de liaison.

Béton bitumineux très mince (BBTM) : épaisseur de couche de 2,5 cm. Très utilisé en France pour les couches de roulement, elle permet de réaliser une couche d'usure qui, après quelques années, pourra être rabotée et refaite, ou pour des points particuliers où une forte macro texture est recherchée. Toujours posé sur une couche de liaison.

Béton bitumineux mince (BBM) : épaisseur de couche de 3 à 5 cm. en Béton bitumineux semi-grenu (BBSG) : très utilisé en France pour les couches de roulement. Épaisseur de couche d'environ 6 cm.

Grave bitume : enrobé à plus faible teneur en liant (bitume) destiné aux couches de fondation ou de base, entre 8 et 14 cm (couches d'assise).

On distingue également d'autres formules :

- Enrobé à module élevé (EME) utilisés en couche d'assise.
- Enrobé drainant.
- Enrobé avec adjonction de colorant.

- Enrobé avec adjonction de polyéthylène.
- Enrobé avec adjonction de verre pilé.
- Enrobé avec adjonction de matériau local.

II.4.2 La composition des enrobés bitumineux (BB 0/14 et GB0/20) en Algérie

La formulation en Algérie est basée sur la vérification des caractéristiques des composants ainsi que sur les essais Duriez et Marshall en fonction des matériaux Granulaires .on doit vérifier premièrement que la courbe granulométrique du mélange s’inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique de référence pour le béton bitumineux (BB 0/14) ou bien grave –bitume (GB 0/20) [37].

- Les bétons bitumineux (BB 0/14) : Destinés aux couches de roulement (dont l’épaisseur minimale de mise en œuvre en tout point est de 5,5cm).
- Les graves –bitume (GB 0/20) : Destinées aux couches de base (dont l’épaisseur minimale de mise en œuvre en tout point est de 10 cm) sont reconstitués à partir des fractions granulométriques suivantes :
 - o 0/3 - 3/8 -8/15pour BB 0/14.
 - o 0/3 -3/8 - 8/15 -15/25.....pour GB 0/20.

La composition granulométrique du mélange devra être, selon le type d’enrobé, à l’intérieur des fourchettes données dans le tableau (II-7) suivant :

Tableau II-7 la granulométrie du mélange.

Tamis (mm)	BB 0/14	GB 0/20
20	-	85-100
14	94-100	-
10	72-84	65-75
6,3	50-66	45-60
2	28-40	25-40
0,08	7-10	6-9

II.4.3 Teneur en liant

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l’enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d’assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d’orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d’une trop forte teneur en bitume). Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats, notée Σ et exprimée en m²/kg, c’est-à-dire la surface développée qu’auraient les granulats assimilés à des sphères [37].

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d’avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

$$100 * \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \text{ m}^2/\text{kg}$$

Avec :

G : des éléments supérieurs à 6,3 mm.

S : des éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm.

S : des éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm.

F : des éléments inférieurs à 0.08 mm.

La teneur en liant optimale, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$TL = k * \alpha * \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

k: Le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats, il prend les valeurs suivant :

- de 2 à 2,9 pour les graves bitumes « GB »
- de 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux « BB »

α : Coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVR *g* ».

$$\alpha = 2.65/MVR$$

$MVR_g = \sum P_i * d_i$ - MVR_g est la masse volumique réelle des granulats

P_i : Pourcentage de la fraction *i*. - d_i : Poids spécifique de la fraction *i*.

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg)

II.4.4 La compacité

La compacité "C" est une conséquence directe de la formulation [16] [38] :

$$C = 100 - \% \text{ des vides}$$

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette, la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100(liant et filler compris) [38].

Soit :

γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette

γ_b : la densité du bitume

γ_{G1} : la densité de l'agrégat 1

$\gamma_{G2}, \gamma_{G3}, \dots$ celles des agrégats 2, 3...etc

P_b : le pourcentage en poids du bitume;

$PG_1, PG_2, PG_3 \dots$ ceux des agrégats.

Donc la densité réelle γ_{rel} du matériau enrobé est:

$$\gamma_{rel} = \frac{100}{\left(\frac{P_b}{\gamma_b}\right) + \left(\frac{PG_1}{\gamma_{G1}}\right) + \left(\frac{PG_2}{\gamma_{G2}}\right) + \dots}$$

Le pourcentage volumétrique des vides V_v de l'éprouvette est :

$$V_v = \frac{100 * (\gamma_{rel} + \gamma_{app})}{\gamma_{rel}}$$

Une bonne compacité conditionne les performances mécaniques des enrobés et leur durée de vie. La compacité est influencée par la nature et la forme des granulats. Elle joue un rôle déterminant dans l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques : module de rigidité, comportement en fatigue, mais un compromis doit être fait pour que le comportement à l'orniérage soit satisfaisant. En modulant ces différents paramètres, il est ainsi possible de formuler un enrobé ayant les caractéristiques nécessaires pour l'usage et pour sa place dans la chaussée.

II.4.5 Les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux

Les caractéristiques mécaniques des enrobés sont déterminées par rapport des différentes niveaux de formulation [39]. Le niveau d'étude de formulation dépend en général du type d'enrobé, du niveau de sollicitation de la chaussée et de l'importance du chantier. La plupart des enrobés nécessitent au minima une étude de deux niveau excepté les enrobés à module élevé que la norme 13108-1 oriente vers une étude de niveau 4.

Les différents essais présentés ci-dessous permettent de vérifier les caractéristiques de l'enrobé formulé vis-à-vis des normes en vigueur.

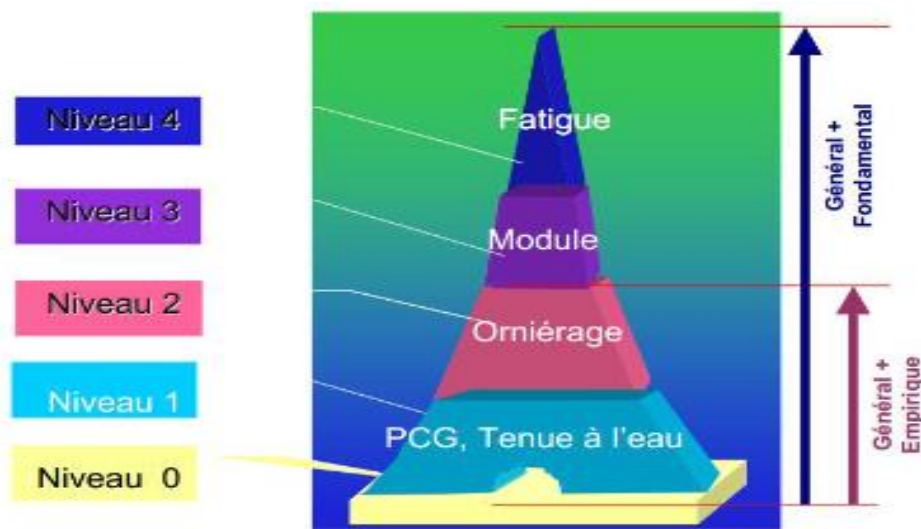


Figure II.11 Niveaux de l'épreuve de formulation[24].

Niveau 1: Mise en place et tenue à l'eau (PCG et Duriez).

Principe: mesure le compactibilité et Effet de l'eau sur le mélange.

Niveau 2: Résistance à l'orniérage.

Principe: Étude de Résistance à l'orniérage.

Niveau 3: Module de rigidité et module complexe.

Principe: mesure de la résistance opposée à une contrainte.

Niveau 4: Résistance à la fatigue.

Principe: sollicitation d'une éprouvette trapézoïdale a déformation imposée.

II.4.6 Les essais sur les enrobés bitumineux

II.4.6.1 Essai Marshall (NF P98 -215-2)

L'essai de stabilité Marshall [40] est un essai de compression exercé suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 30 à 40 min d'immersion dans l'eau à 60°C et à la vitesse de 0,846 mm/s. Elle s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier de dimension « $D \leq 22,5\text{mm}$ », utilisés dans le domaine des travaux publics.

L'essai Marshall est largement utilisé par les laboratoires Algériens, il permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données les caractéristiques suivantes :

- La stabilité qui est la résistance maximale à l'écrasement.
- Le fluage qui est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.

L'essai consiste à compacter des éprouvettes d'enrobés par damage dans un moule Cylindrique de 101,6 mm de diamètre à l'aide de chocs (cinquante coups par face) produits par la chute d'une dame de poids normalisé tombant d'une hauteur bien définie selon un procédé opératoire déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions bien définies.

La stabilité Marshall est exprimée en kilogramme et représente la moyenne de résultats d'au moins trois éprouvettes. Ce résultat fournit une mesure empirique de la résistance à la déformation. Cette dernière permet de juger si l'enrobé est conforme ou non aux exigences portant sur cette caractéristique particulière. La moyenne des trois déformations obtenues donne un indice de la fluidité ou flexibilité de l'enrobé à 60°C, température maximale que peut atteindre le revêtement.

Domaine d'application

L'essai s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, béton bitumineux, et autres mélanges hydrocarbonés à chaud). La température de compactage correspond à celle nécessaire au malaxage pour assurer une viscosité de 170 mm²/s et permettre en chantier le maximum de compactibilité. Les éprouvettes ainsi préparées servent à déterminer d'abord la densité brute de l'enrobé, puis sa stabilité, c'est-à-dire sa résistance à la déformation, et enfin cette déformation même.



Figure II.12 Application de la compression (Marshall)

Mode opératoire et expression des résultats

- Faire tremper l'éprouvette de 30 à 40 minutes dans un bain à une température constante de $60 \pm 1^\circ\text{C}$.
- régler le cadran de la presse Marshall à zéro et vérifier les tiges de guidage.
- placer l'éprouvette entre les mâchoires de la presse ; - centrer et ajuster les mâchoires.
- placer les indicateurs de déformation (réflectomètres) et les mettre à zéro.
- mettre la presse en marche, l'arrêter au moment où la charge maximale est atteinte et noter cette charge (l'essai doit être réalisé dans moins d'une minute).
- lire en millimètres la déformation obtenue.



Figure II.13 Conservation des éprouvettes avant écrasement.

II.4.6.2 Essai de compression Duriez (NF P 98-252-1)

L'essai Duriez (essai de compression simple) type LCPC [38] est réalisé sur une éprouvette cylindrique d'enrobé bitumineux de poids et de section bien déterminés, ayant pour but de déterminer, à 18°C pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des

éprouvettes. L'essai se pratique à 18 C°. Il peut être pratiqué à d'autres températures, en particulier à 0 °C et à 50 C° pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné. L'essai s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, bétons bitumineux, autres enrobés) utilisés dans le domaine des travaux publics. [41] Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet effectué par un piston placé à la partie supérieure d'un moule (voire le schéma ci-dessous) sachant que la charge appliquée pour les mélanges hydrocarbonés de $D \leq 14$ mm est environ $60 \text{ KN} \pm 0,5 \%$.

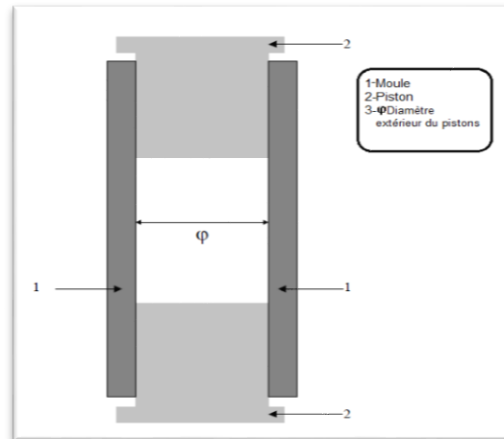


Figure II.14 Schéma du moule et piston

La charge doit être atteinte entre 5 s et 60 s maximum et maintenue entre 300 s et 305 s. Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue. Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4 h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage de vides. Les autres éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation dans des conditions définies.

Les éprouvettes sont écrasées à 18°C au huitième jour et l'on obtient:

- résistance des éprouvettes conservées à l'air pendant 7j R
- résistance des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 7j r.

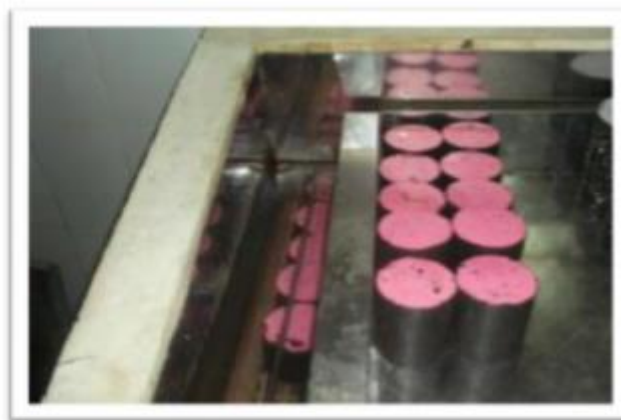


Figure II.15 Conservation des éprouvettes Duriez.

Le rapport r/R appelé "rapport d'immersion/compression" traduit en quelque sorte la tenue à l'eau de l'enrobé bitumineux.

C'est un moyen pour apprécier d'une façon indirecte l'adhésivité du bitume aux granulats. Cet essai nous permet également de mesurer la compacité LCPC qui est très souvent prise comme compacité de référence sur chantier.



Figure II.16 Appareil DURIEZ.

II.4.6.3 La presse à cisaillement giratoire (NF P 98-252)

L'essai de compactage à la PCG est une combinaison d'un cisaillement giratoire et d'une force résultante axiale appliquée par une tête mécanique. La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés hydrocarbonés par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobe. Il faut savoir qu'à 100 % de compacité, la hauteur minimale de l'éprouvette est de 150 mm.

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre.

On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou $0,82^\circ$ (interne) et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage. On observe l'augmentation de compacité en fonction du nombre de tours. La méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration [42].

II.4.6.4 L'essai d'orniérage (EN 12697-22)

Cet essai est très important pour les routes très circulées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage.

Le corps d'épreuve est une plaque parallépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm.

Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 KN, pression : 6 bars), on détermine la profondeur de l'ornière au passage répété de la roue pneumatique (plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10 000, 30 000, 100 000), à une énergie de compactage normalisée à 60°C.

La profondeur de la déformation produite dans le passage de la roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe [43].

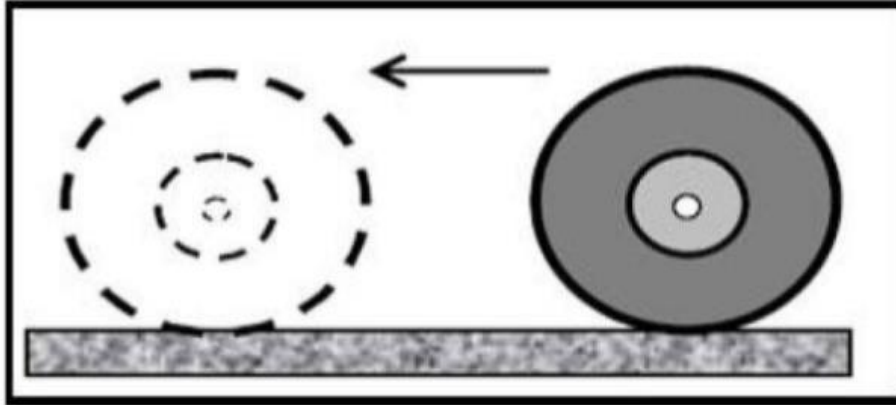


Figure II.17 Principe de l'essai d'orniérage

II.4.6.5 Essai de caractérisation des performances mécaniques par essai de module complexe, ou par essai de traction direct (NF EN 12697-26)

Cet essai détermine les modules en traction directe, il est réalisé sur des éprouvettes cylindriques, il donne le module des enrobés à différentes températures et temps de charges, il est nécessaire pour les enrobés afin de connaître le respect des spécifications. Les modules sont déterminés à : 0°C, 5°C, 10°C et 15°C et aux temps de charges variant de 0,02 à 300 secondes. Cet essai donne le module à 15 °C à 0,02 secondes qui est supérieure ou égale au module complexe à 15 °C et 10 Hz, il existe plusieurs théories donnant la relation entre ces deux modules. (Il est à noter qu'un temps de charge de 0,02s correspond à un poids lourd à 60 km/h) [44].

II.4.6.6 Les essais de fatigue NF P 98-261-1

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales, l'éprouvette est encastrée à la base, sollicités en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle, à une température et pour une fréquence de chargement fixées (L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz.).

La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées).

L'essai est conduit jusqu'à réduction de moitié de l'effort mesuré en tête, c'est le critère de la rupture. Sur un graphique, les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement), se placent sur une droite de fatigue.

Cette courbe de fatigue donne :

- La déformation correspondant à un million de cycles.
- La pente de la courbe de fatigue.
- La dispersion sur la logarithmique décimale du nombre de cycles à rupture SN [45].

II.5 Conclusion

L'enrobé est constitué deux éléments principaux les granulats et le bitume. La liaison entre les granulats et le bitume est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération telle que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc.

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir:

- Suffisamment de bitume pour donner un pavage durable
- Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences de trafic
- Suffisamment des vides pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique)
- Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange

Chapitre III
Valorisation Des Déchets

Chapitre III : Valorisation Des Déchets

III.1. Introduction

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir». L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir

Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte de la gestion des différents types de déchets et les principales techniques de traitement ou d'élimination à travers le monde ; ainsi le recyclage et la réutilisation des déchets dans le domaine des travaux publics

III.2 Définition des déchets

Le mot 'déchets' désigne la perte qu'une chose subit dans son volume, sa valeur ou dans quelqu'une de ses qualités. Il est synonyme de résidu rejeté parce qu'il n'est plus utilisable ou consommable, parce qu'il n'a plus de valeur [46].

Plusieurs définitions des déchets ont été proposées, ces dernières années un point commun à ces définitions est la notion que les déchets sont des matières indésirable, dont le producteur veut se débarrasser.

Le terme déchets désigne :

- Selon l'article n°1 de la loi Française n° 75-633 du 15 juillet 1975, " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ".
- Selon la Directive-Cadre de la Communauté Européenne n° 91-156/CEE du 18 mars 1991, "toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire" [47].
- Selon l'article n°3 de la loi Algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001, " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le se défait ,projette de se défaire ,ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer" [48].

Bref, Le terme « déchet » désigne : " résidus, matériaux, substances ou débris rejetés à la suite d'un processus de production, de fabrication d'utilisation ou de consommation "

III.3 Constitution chimique du déchet

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous-produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est

pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux [49].

III.4 Type des déchets

Conformément à la loi N°01-19 du 12 Décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets Il existe plusieurs types de déchets classés selon leur nature, leur degré de dangerosité et leur valorisation ou élimination. Parmi ces déchets on cite [50].²

III.4.1 Les déchets inertes

Les déchets inertes font partie des déchets non dangereux pour l'environnement. Ils sont la résultante des activités de BTP (bâtiment et travaux publics).

Selon le code de l'environnement, un déchet inerte :

- ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante.
- ne se décompose pas.
- ne brûle pas.
- ne produit aucune réaction physique ou chimique.
- n'est pas biodégradable.
- ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière

susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.

Il existe deux types des déchets inertes environ 90 % des déchets issus de travaux publics, environ 70 % de ceux des travaux du bâtiment.

Les déchets inertes sont surtout des matières minérales issues de l'activité de construction. On distingue :

- les matériaux issus de l'industrie extractive (c'est-à-dire relatifs aux exploitations de Carrières).
- les matériaux qui ne sont pas issus de l'industrie extractive (béton, briques, verre, terre, pierres, amiante, etc.).

Quelques exemples de déchets inertes :

- briques, pierres, parpaings.
- béton.
- carrelage, céramique, faïence.
- tuiles, ardoises.
- terre non polluée ...etc.

Les déchets inertes peuvent être recyclés de plusieurs manières :

- par le réemploi.
- par des actions de gestion optimisée des matériaux (concassage de béton par exemple, récupéré après la démolition d'un bâtiment et réutilisé comme matériel de nivellement du site de démolition)

Les déchets inertes non valorisables sont supprimés dans des installations spécifiques de stockage des déchets inertes [51].

III.4.2 Les déchets industriels banals

Les déchets industriels banals sont tous les déchets qui ne sont pas générés par des ménages, et qui ne sont ni dangereux ni inertes. S'ils ne sont pas dangereux, les DIB peuvent se décomposer, brûler, fermenter ou encore rouiller.

A l'origine des D.I.B. nous trouvons :

- Des emballages usagés : Palettes, Caisses, Housse, bidon, etc.
- Des déchets de production : Chuts, Rebut, Purges, Découpe, Résidus, Sciures,

Vidange, etc.

- Des produits usagés : Papiers, Invendus, consommables usagés, équipements hors service
- Des matériaux : Verre, Métaux, Plastique, Textile, Cuir, papier, Carton, Bois, matière organique d'origine végétale ou animale

Les D.I.B sont concernés :

- Toutes les activités professionnelles : Industries, commerces et services.
- De toutes tailles : Profession libérale, artisans, petite, moyenne et grande entreprise.
- De tous secteurs : Industrie extractive, agroalimentaire, transport, agriculture et pêche.
- Y compris secteur public : Etablissement scolaire, Administrations, Armée et Police.

La réglementation définit pour chacune des catégories de déchets des obligations précises, qui concernent les différentes étapes d'un processus d'élimination.

- Le stockage dans l'entreprise.
- Les modalités de collecte et d'enlèvement.
- Le transport.
- Le traitement final [52].

Les DIB peuvent :

- Etre réutilisés sur un autre chantier.
- Etre collectés par un centre de tri et de recyclage de déchets de chantier.
- Etre recyclés.
- Etre brûlés dans une usine d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) et déchets assimilés.

III.4.3 Les déchets industriels spéciaux (DIS) Dangereux

Le terme déchets spéciaux ou encore déchets dangereux est associé à des déchets qui, en raison de leur composition ou de leurs propriétés physico-chimiques (corrosifs, explosifs, toxiques, inflammables, cancérigène, infectieux, etc.) présentent un danger pour la santé humaine ou pour l'environnement. Même si généralement, les ménages n'en produisent qu'en faible quantité (produits phytosanitaires, équipements électroniques, etc.), ils ne devraient pas être jetés dans la poubelle réservée aux ordures ménagères [53].

On distingue différents types de déchets spéciaux en fonction de leur origine :

- **les déchets ménagers spéciaux (DMS)** : produits par les ménages comme les aérosols, produits de jardinage, produits de bricolage, thermomètre au mercure, etc.
- **les déchets industriels spéciaux (DIS)** : produits par l'industrie lourde et les entreprises, comme les mâchefers, boues d'épuration, solvants, déchets phytosanitaires, etc.
- **les déchets d'activités de soins à risque infectieux et assimilés (DASRIA)** : qui rentrent dans la catégorie des déchets médicaux, produits par les centres de soins hospitaliers et vétérinaires ou par des patients en auto traitement, comme les seringues, milieux de culture, fragments anatomiques, pansements, etc. [54].

Ce type de déchet doit donc impérativement subir un ensemble de traitements appropriés pour en réduire la toxicité et le risque de contamination. Ils nécessitent donc des filières spécifiques de collecte, de transport, de traitement, de recyclage et d'élimination.

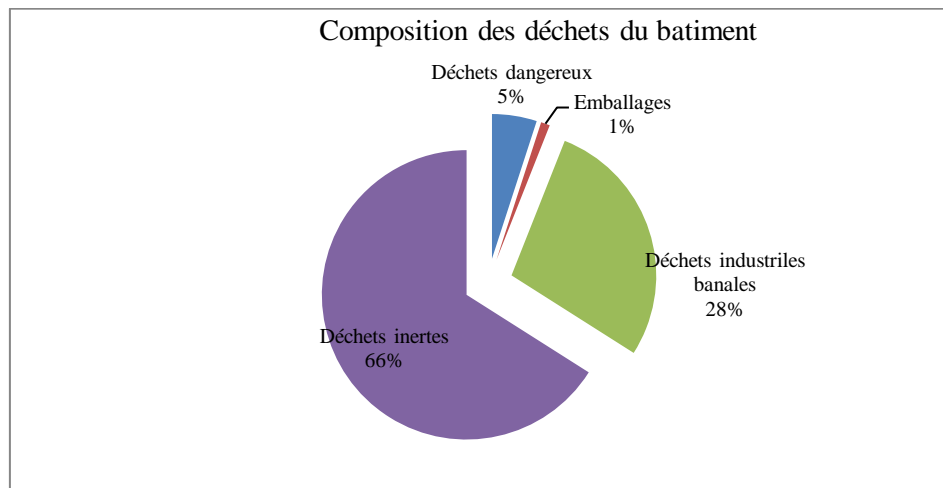


Figure III.1 Compositions des déchets du bâtiment

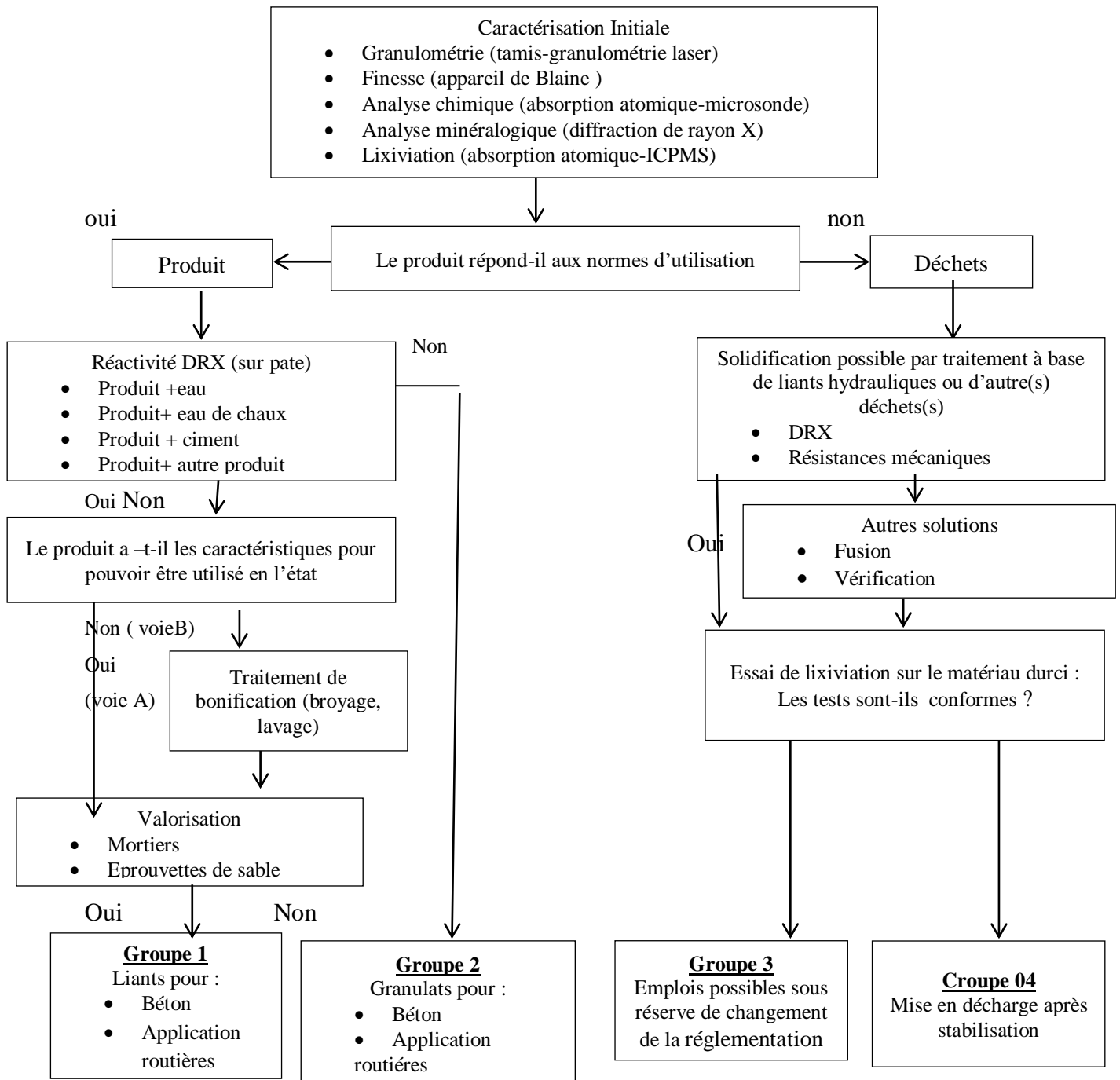


Figure III. 2 Organigramme développé en LMDC –Toulouse et présentant la stratégie d'étude conduisant à la valorisation des sous-produits ou à la stabilisation des déchets.

III.4.4 Les déchets ultimes

La loi du 13 juillet 1992 [55] a introduit la notion de déchets ultimes et en donne la définition suivante : « un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par l'extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux. » A terme, seuls les déchets qui n'ont pu être ni recyclés, ni incinérés avec récupération d'énergie, pourront être mis en décharges. Les déchets ultimes issus des usines d'incinération

d'ordures ménagères et déchets assimilés, dénommés mâchefers, peuvent être transformés après traitement en granulats et utilisés pour réaliser les fondations de route.

III.5 Déchets en Algérie

L'Algérie est entrain de connaître un développement économique et démographique sans précédent. Le taux élevé d'accroissement de la population a ainsi engendré une urbanisation accélérée, le plus souvent de manière anarchique qui a vu la prolifération de l'habitation précaire. 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 Md, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), prévu jusqu'en 2010.

Le secteur de l'environnement connaît actuellement des mutations à travers notamment le renforcement du cadre institutionnel et juridique.

Sur le plan de la politique environnementale, le Plan National d'Actions pour L'Environnement et le Développement Durable (PNAEDD) fixe les différents programmes environnementaux du pays pour 2001-2010.

Ces politiques sont appuyées par le Fonds National de l'Environnement et de dépollution (FEDEP) qui intervient notamment pour aider les entreprises industrielles à réduire ou à éliminer leurs pollutions et les unités de collecte, de traitement et de recyclage des déchets, ainsi que par la nouvelle fiscalité écologique basée sur le principe du pollueur payeur afin d'inciter à des comportements plus respectueux de l'environnement.

Sur le plan législatif et réglementaire, plusieurs lois ont été promulguées :

- Loi n 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.
- 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.
- 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.
- Ratification par l'Algérie du Protocole de Kyoto.
- Entrée en application de la fiscalité écologique en janvier 2005. Le montant de la taxe est de 24.000DA/tonne de déchets liés aux activités de soin des hôpitaux et cliniques et de 10 500 DA/tonne de déchets industriels dangereux stockés.

Sur le plan institutionnel, création de plusieurs organismes :

- Le Centre National des Technologies de Production plus Propres (CNTPP).
- L'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.
- L'Agence Nationale des Déchets.
- Le Conservatoire National des Formations à l'environnement.
- Le Centre National de Développement des Ressources Biologiques.
- Le Commissariat National du Littoral.
- Le Centre National des Technologies de Productions plus Propres.
- Le Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable [56].

III.6 Gestion des déchets [57]

La gestion des déchets constitue une préoccupation majeure pour les autorités en charge de ce secteur, la gestion des déchets ne s'improvise pas il est important de connaître les différents types des déchets générés, leur quantités, leur nature, leur contraintes réglementaire, les risques sanitaires, leur interactions.

III.6.1 Principe de gestion de déchets

Dans une société de consommation et de gaspillage, la prise de charge de la gestion des déchets est indispensable pour raisons que nous venons de voir (la santé publique, respect de l'environnement, hygiène) ainsi, le code de l'environnement définit l'ensemble des objectifs et des mesures relatifs à cette gestion. Parmi ces articuler, un des plus importante stipule : « Toute personne qui produit ou détient des déchets est tenue d'en assurer ou d'un faire assurer l'élimination » [57].

Il définit les dispositions relatives à la gestion des déchets par quatre objectifs principaux

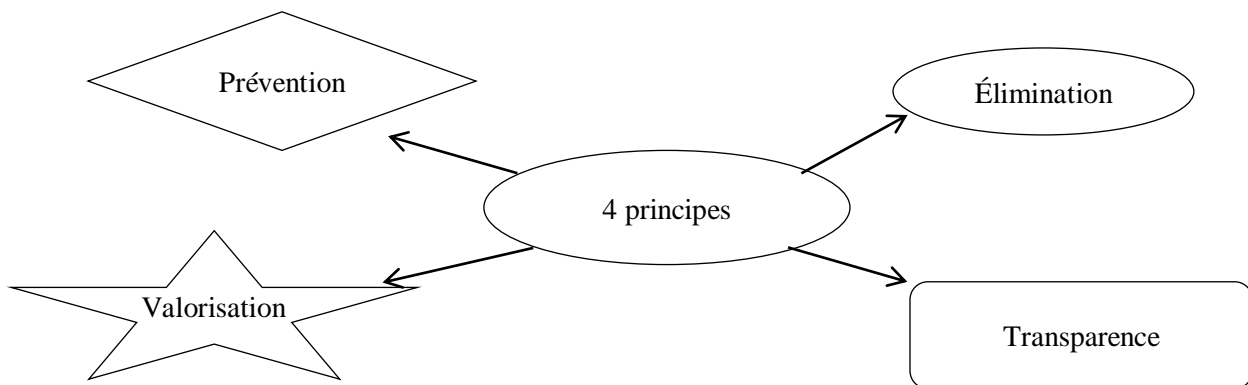


Figure III.3 Les quatre principaux de gestion des déchets

Prévention : elle concerne :

- Réduction de la production des déchets.
- Le principe pollueur –payeur.
- L'organisation du transport

Valorisation : c'est l'un des points forts du code de l'environnement :

- La valorisation concerne des composés, des matières premières contenues dans les déchets.

- Elle peut se faire par réemploi, réutilisation, recyclage, valorisation énergétique, valorisation de matière.
- Elimination :
- Interdiction de l'abandon –de brulage.
 - Interdiction de certains mélanges.
 - Interdiction des rejets non conforme dans les réseaux collectifs.
- Transparence :
- Contrôle des circuits.
 - Bordereaux de suivi.
 - Rapport industrie-population.
 - Relation entre les différents acteurs de la chaine.
 - Transporteur, centre de tri, centre d'enfouissement technique...

III.6.2 Hiérarchie de gestion des déchets

Le concept de la hiérarchie de gestion des déchets suggère que l'option la plus efficace sur le plan environnemental est de réduire la production des déchets. Comme deuxième option, il y'a lieu d'envisager la réutilisation des produits et matériaux pour le même usage différent. A défaut il faudra chercher à valoriser les déchets à travers le recyclage, le compostage ou la production d'énergie. Si aucune de ces options n'est faisable, alors on optera pour l'enfouissement qui reste la solution ultime dans tout le processus d'élimination [58].

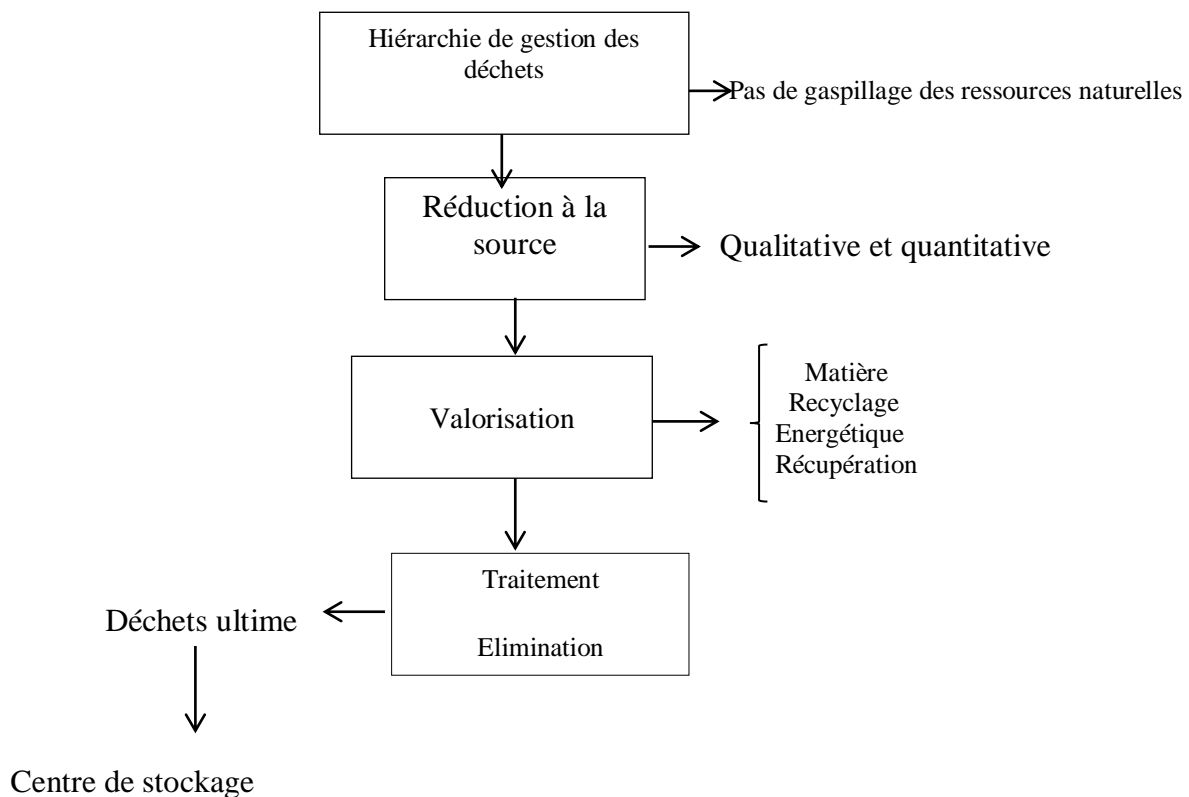


Figure III.4 Hiérarchie de gestion des déchets

III.6.3 collecte des déchets

C'est l'ensemble des opérations qui consistent à enlever les déchets chez le producteur ou aux points de regroupement et à les acheminer vers un quai de transfert, un centre de tri, de traitement ou un centre d'enfouissement technique (C.E.T).

Les ordures ménagères constituent un milieu dans lequel manifeste une vie microbienne (bactéries, champignons...) très intense. On y trouve des espèces bénéfiques et pathogènes, l'activité microbienne qui s'y développe peut être à l'origine de nombreuses nuisances et pollutions si l'on se limite à les déposer sans précautions. Dans ce cas il peut en résulter :

- Une prolifération de dépotoirs clandestins qui sont à l'origine de la dégradation des sites.
- Un dégagement d'odeurs nauséabondes gênantes dues à des processus de décomposition de la matière organique.
- Un aspect inesthétique.

Dans le but de minimiser ces problèmes, une bonne collecte consiste à libérer le plus rapidement le citoyen de ses déchets.

III.6.3.1 Les modes de collecte des déchets

Collecte en porte à porte

Le citoyen dépose les déchets préalablement triés dans des récipients qui lui sont propres ou communs avec les voisins. La collecte se fait par ramassage avec les véhicules circulant à proximité des habitations. Comme ce mode de collecte demande beaucoup de personnel et des véhicules normalisés, il est utilisé dans les villes ou communes importantes. La porte à porte est utilisée depuis longtemps, à l'origine il était pour les vieux cartons et papiers. Actuellement, il se généralise pour les emballages métalliques, les plastiques, les cartons.

Collecte en apport volontaire

Collecte en apport volontaire (appelé aussi points de regroupement) est utilisé dans les zones où il y a une faible densité de population, la distance à parcourir entre les maisons est trop importante pour pouvoir organiser une collecte porte à porte. Des points de regroupement comportant des récipients (conteneurs) de collecte spécifiques et de capacité appropriés sont installés aux points fréquentés par les habitants. Ce mode de collecte nécessite un effort supplémentaire du citoyen, puisque celui-ci doit trier au préalable ses déchets et les porter ensuite au point de regroupement. La collecte sélective en apport volontaire ou porte à porte concerne principalement les déchets valorisables (recyclage, réutilisation) des déchets ménagers.

III.7 Traitement des déchets [58]

Après collecte, prétraitement et tri éventuel, les ordures ménagères, et les déchets industriels sont orientés vers différentes filières de traitement en fonction de leurs caractéristiques physicochimique. D'une manière générale, un processus de traitement vise à :

- Valoriser au maximum les déchets

- Transformer les déchets en rejet éco compatible (retour acceptable des déchets dans le milieu naturel).
- Stocker les résidus ultimes.

Le tri sélectif

Le tri sélectif est une collecte sélective des déchets .ces déchets sont séparés en 3 grandes catégories : les emballages (brique de lait ...),le papier (journaux...)et le verre .Cette idée de tri sélectif remonte à l'année 1884, Eugène Poubelle , inventeur de la poubelle ,avait prévu une collecte sélective des déchets dans trois poubelle différentes, il faudra attendre l'année 1974 pour que le tri soit enfin mis en place.

Cela permet de donner une nouvelle vie aux déchets, ils sont valorisés. Cette valorisation se nomme la valorisation matière.

L'enfouissement et l'incinération :

L'enfouissement

L'enfouissement est le fait d'enfouir les déchets (ultime dans le sol tout en protégeant au maximum l'environnement. On appelle aussi ces déchets, des déchets résiduels, ils sont issus des ménages et de l'industrie .On les stocks, car ils ne peuvent pas, pour le moment, être valorisés. Tout d'abord les déchets, sont enterrés dans de grands trous qui se nomment des casiers subdivisés en alvéoles. Ces dernières ont de la pente pour faire écouler les lixiviats qui sont ensuite pompés pour être traités sur place au bâtiment chargé de leur traitement. Ces déchets sont compactés à l'aide de machine très lourde qui a des roues équipées de pieds mouton. Ces déchets vont produire du biogaz, qui est récupéré dans les alvéoles pour être transformé en électricité à l'aide de gros générateurs.

L'incinération

L'incinération est le fait de bruler les déchets pour en faire de la chaleur. Les déchets sont incinérés dans un four à plus de 1000C°.Cela permet de produire 2.3 tonnes de vapeurs, qui sont vendus à des industriels .cette quantité de vapeur représente environ 40.000 MWh d'énergie thermique soit la consommation annuelle en énergie de près de 2400 foyers.

Méthanisation

La méthanisation est la transformation avec l'aide des bactéries de la matière organique en biogaz, mélange de méthane et de gaz carbonique. Ce biogaz a les mêmes propriétés que celui du gaz naturel. Elle peut traiter une gamme importante de déchets :

- **Municipaux** : Déchets alimentaires, journaux, emballages, textiles, déchets verts, sous-produits de l'assainissement urbain.
- **Industriels** : Boues des industries agroalimentaires, déchets de transformation des industries végétales et animales, fraction fermentescible des déchets industriels banals ; sous-produit de l'assainissement urbain.

- **Agricoles** : Déjections d'animaux, substrats végétaux solides, bois déchiquetés.
- **Littoraux** : algues vertes.

Le biogaz est ensuite converti en électricité avec l'aide d'un générateur ou en chaleur en le brûlant après l'avoir épuré.

III.7.1 Traitement mécanique ou biologique des déchets

Les agents municipaux en charge de la collecte des détritiques et les entreprises spécialisées réalisent un traitement des déchets. Ce traitement est de deux ordres :

- mécanique, tri à partir de vrac :
- détacher les déchets recyclables des déchets non recyclables.
- les acheminer vers le circuit de recyclage ou d'incinération.
- biologique, fermentation anaérobie ou au compostage.
- la fermentation anaérobie : production de terreau ou de biogaz,
- compostage : production de compost.

III.7.2 Traiter les déchets dangereux

Les déchets dangereux subissent un tri après la collecte afin de réduire leur dangerosité. Ce tri s'accompagne d'un traitement particulier et permet :

- de réduire les risques sur la santé et sur l'environnement.
- d'augmenter les possibilités offertes par les objets.
- de réduire le volume des objets.
- de valoriser les matériaux.
- de produire de l'énergie à partir de ces déchets.
- de diriger les déchets non recyclables vers un centre de stockage.

III.8 Valorisation des déchets [59]

III.8.1 La valorisation

Valoriser c'est donner de la valeur à un objet, à une matière, à quelque chose. Le terme de valorisation apparaît pour la première fois en 1984. La définition de la valorisation des déchets par l'ADEME, (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), est la suivante : « le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie » (loi du 13 juillet 1992).

La valorisation apporte une nouvelle valeur aux déchets, en les sortant du circuit de collecte et de traitement. La valorisation s'oppose à l'élimination. Elle permet de faire des économies de matières premières et contribue au respect de la planète et à son développement durable.

- **réemploi** est une opération qui permet à des biens qui ne sont pas des déchets d'être utilisés à nouveau sans qu'il y ait modification de leur usage initial.
- La **réutilisation** est une opération qui permet à un déchet d'être utilisé à nouveau en détournant éventuellement son usage initial [60].
- le **recyclage** est l'opération par laquelle la matière première d'un déchet est utilisée pour fabriquer un nouvel objet [61].

III.8.2 Les type devalorisation

La valorisation matière

C'est, utiliser une partie ou la totalité de la matière du déchet dans un nouveau processus de production. La valorisation de matière peut être assimilée au recyclage et au réemploi.

La valorisation organique

La valorisation organique repose sur le compostage et la méthanisation. Le compost créé à l'issue du compostage sert à la régénération des sols. La méthanisation est comme le compostage, c'est un procédé de fermentation qui crée du méthane. L'utilisation du méthane est la même que le gaz naturel, il s'utilise dans les mêmes applications.

La valorisation énergétique

La valorisation énergétique se fait via l'incinération des déchets, à l'aide de fours spécifiques. L'incinération des déchets permet de créer de la chaleur qui permet d'alimenter les systèmes d'électricité et de chauffage.

Il existe un nouveau système appelé : pyrolyse. Les déchets sont chauffés entre 400 à 600°C, les déchets sont alors soumis à une réaction thermique et se décomposent. Les déchets sont alors utilisés en tant que combustible liquide, solide ou gazeux [62].

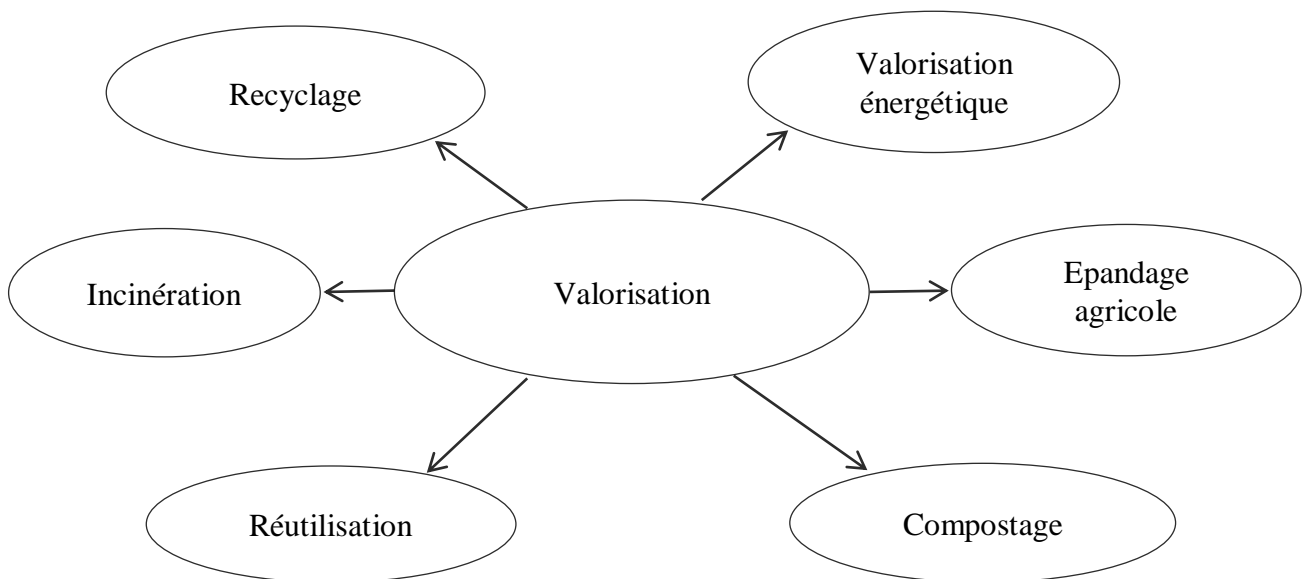


Figure III.5 valorisation des déchets

III.8.3 L'objectif de valoriser les déchets

- La valorisation des déchets énergétiques permet de récupérer de l'énergie et ainsi faire des économies de combustible (gaz, fioul, charbon). Cette valorisation diminue de 70% la masse des déchets.
- La valorisation matière permet de faire des économies dans la production et l'achat de matières premières.
- Valoriser les déchets permet de rallonger l'utilisation des matières, ce principe est à la

fois économique et écologique. Aujourd'hui plus de 19 mégatonnes de matériaux qui sont recyclés et réutilisés

III.9 Sources De Déchets Utilisés En Génie Civil

Deux principales sources de production de déchets utilisés dans le domaine de génie civil qu'on les rencontre généralement : les déchets de construction et de démolition (C & D) et les sous-produits de l'industrie.

III.9.1 Les déchets de construction et de démolition

Les déchets de construction et de démolition représenteraient approximativement 30% de l'ensemble des déchets (en tonnes par an), générés par la Région. La partie majoritaire de cet important gisement de déchets est produite durant les travaux ; une petite partie du gisement est constituée de matériaux neufs non-utilisés. La nature des déchets produits varie fortement en fonction du type de travaux ou de bâtiment. Il s'agit majoritairement de déchets inertes. 75 à 80% des déchets de construction et de démolition seraient recyclés, essentiellement sous forme de remblais [56].

En Algérie, les déchets de construction et de démolition, qui sont généralement classés parmi les déchets industriels, restent inconnus et sont estimés approximativement à des millions de tonnes par an [49]. et selon l'étude réalisée par Bedjou, les déchets issus du bâtiment sont estimés à 2,2 millions de tonnes par an.

L'emploi de ces matériaux, aujourd'hui envisagé après leur dépollution et leur recyclage, a très vite été considéré comme une priorité, car cela présente au moins trois avantages majeurs que sont les économies de :

- décharges (volume de stockage des déchets inertes).
- carrières (ressources naturelles de granulats).
- transport.

Dans notre contexte des Travaux Publics, les matériaux proviennent essentiellement de la démolition de bâtiments d'habitation ou industriels, d'ouvrages en béton, de chaussées.

Les catégories comportant, ou pouvant présenter le danger de contenir des éléments susceptibles d'engendrer des désordres sur nos ouvrages (plâtres pouvant créer des phénomènes de gonflements, par exemple), ne sont pas systématiquement valorisées par les entreprises de Travaux Publics [49].

Le recyclage des matériaux de démolition qui nécessite des installations onéreuses, est essentiellement effectué dans le but de les substituer aux matériaux naturels pour la fourniture des granulats, ou graves utilisables dans les techniques :

- de terrassement.
- routières
- ferroviaires
- aéroportuaires
- de plate-forme industrielle, etc.

Le recyclage des matériaux de démolition est donc utilisé pour pallier des pénuries de matériaux naturels, notamment pour des travaux à proximité ou dans les grandes agglomérations. De ce fait, les unités de fabrication sont, elles aussi, essentiellement localisées autour des grandes villes, ou à proximité de pôles industriels.

III.9.2 Les sous-produits de l'industrie.

L'industrie constitue la source principale de sous-produits et de déchets utilisés dans le domaine de génie civil. Des quantités énormes qui se produisent sans cesse et qui augmentent toujours, des grandes surfaces de terrain immobilisées par les déchets stockés et de la réduction des disponibilités de terrain, ainsi que de la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences. Le génie civil se considère comme un domaine d'utilisation des déchets industriels, a une importance pratique et économique immédiate, car de nombreux produits secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles ainsi qu'une large gamme de matériaux de construction [63]. Parmi les sous-produits et déchets utilisés en génie civil :

Laitier de haut fourneau

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant [57]. Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. La quantité de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m³.SAA 5286.

Laitier d'acier

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé.

Sous-produits provenant des centrales thermiques

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon

broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées «cendres volantes». Certaines des particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon [57].

Mâchefer

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

Scories de sole

Ces résidus constituent environ 2.5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton [57].

Cendres volantes

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage. À l'origine, les cendres volantes étaient mélangées avec de l'eau et transformées en boulettes soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion. L'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Lorsque le frittage se fait dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150 à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes se fusionnent et forment un aggloméré. Cet aggloméré est ensuite brisé en boulettes. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40 MN/m² et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m³. Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger [63].

La terre cuite

les débris de terre cuite sont, généralement, classés parmi les déchets de démolition, que ce soit du point de vue recyclage ou réutilisation comme granulats légers (En effet, ceux sont : l'argile cuite (chamotte) non moulée, l'argile cuite, les briques concassées, les surcuits et les

incuits de briqueteries, ainsi que les débris de briques contenus dans les déchets de démolition et les décombres, qui sont désignés sous le nom collectif de « débris de terre cuite ».

III.10 Utilisations des déchets dans le domaine travaux public

Morsli et al, (2013) ont étudiés la possibilité d'incorporer des granulats d'enrobés provenant du fraisage d'une couche de surface avec des taux de 10, 20, 30, 40 et 50% dans un enrobé bitumineux semi grenu, les résultats obtenus montrent que l'ajout des granulats d'enrobés a amélioré d'une manière significative les performances de l'enrobé recyclé, seul la compacité et le fluage ont posé des problèmes à 50% d'ajout [64].

Bendimerad et Zadjaoui, (2015) ont travaillé sur l'utilisation d'un produit recyclé (PR industrie) comme additif dans un béton bitumineux à module élevé, ils ont trouvé une très bonne performance en terme de rigidité, un pourcentage de vide réduit et un comportement remarquable vis-à-vis de la fatigue [65].

Les bétons bitumineux recyclés renforcés par des granulats plastiques (PR-Plast-S) ont été étudiés par **Melbouci et al, (2014)**, pour réaliser cette étude des tests Marshall et Duriez ont été effectués sur diverses formulations, les résultats montrent que le recyclage des chaussées peut être effectué sans restrictions jusqu'à 30% des mélanges de granulés de plastique.

Jinal et al, (2017) ont étudiés le remplacement partiel des granulats ordinaires par des déchets de céramique dans un mélange bitumineux avec des taux de 5, 10, 15 et 20%, l'étude est basée sur la détermination de la stabilité Marshall et flow value, les résultats trouvés montrent que l'introduction de déchets de céramique dans le mélange bitumineux donne des valeurs considérables de la stabilité Marshall et diminue le volume des vides [67].

Cagdaset Murat, (2017) ont conclu que les déchets de céramique sont utilisables avec une limite supérieure ou égale à 30% à cause de leur porosité et leur absorption élevée [68].

Les granulats de caoutchouc influent positivement sur la résistance des mélanges de béton bitumineux et favorise l'utilisation de ce type de déchet dans la construction des chaussées souples **Feroudja et al, (2013)** [69].

D'autres chercheurs se sont intéressés à la valorisation de déchets dans les couches d'assise du corps de chaussées,

Hadidane et al, (2015), Fabiana et al, (2011) ont étudié l'influence de déchets de démolition (béton, brique, céramique...) sur le comportement des matériaux constituant l'infrastructure de la chaussée, ils ont constaté une amélioration de la capacité portante, module d'élasticité et la résistance à la déformation [70], [71].

La possibilité d'utiliser des graveleux latéritiques dans la couche de base est étudiée par **Seybatou et al, (2014)**, ils ont démontré l'amélioration des propriétés géotechniques de ce déchet avec un traitement au ciment (dosage à 4%) afin de l'utilisation dans les couches de base [72].

Dans une autre étude expérimentale [**Boudlalet al, 2015**] ont étudié l'effet des granulats de verre sur les propriétés mécaniques des mélanges granulaires routiers, ils ont conclu qu'un pourcentage de 10 à 25% de verre améliore sensiblement les propriétés mécaniques des mélanges [73].

La substitution de laitier cristallisé comme granulats dans la couche de forme et de roulement est étudiée par **Rouabah et Guetteche, (2008)**, ils ont constaté une chute de la stabilité du mélange et une augmentation du rapport r/R et l'indice des vides en fonction de l'augmentation du taux de substitution [74].

William Fedrigo et al, (2017) ont analysé les facteurs affectant la résistance, le rétrécissement, l'érodabilité, l'élévation capillaire et l'absorption des ciments traités mélanges de RAP et GCS, qui est un matériau similaire à l'obtention par FDR-PC de chaussées souples. Le programme expérimental réalisé dans ce travail est l'essai de résistance à la compression, l'essai de retrait au séchage. Les résultats ont montré que les mélanges atteignent des valeurs de résistance acceptables, ainsi que les valeurs de retrait de séchage, d'érodabilité, d'élévation capillaire et l'absorption. Les résultats mettent en évidence que la force n'est pas la seule propriété à prendre en compte lors de la conception des mélanges FDR-PC. Certains mélanges, bien qu'ils présentent des valeurs de résistance acceptables, peuvent échouer en raison de la fissuration de retrait ou d'érosion, lorsqu'ils sont exposés à des variations de teneur en eau [75].

Hassan Ziari a, Alireza Teymoori Barakoochi b, Ali Moniri (2017) ont étudié l'effet de la température de surface, texture et de l'agrégat de verre concassé sur la résistance au dérapage des chaussées en béton. Les essais réalisés sont la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Les résultats montrent qu'il y a un raccord entre l'essai de la résistance à la compression et la résistance à la flexion. En ce qui concerne l'ajout de verre concassé conduit à augmenter la résistance en béton. Par conséquent, il peut être considéré comme une alternative antidérapante pour une utilisation dans les autoroutes [76].

Mohsen Tennich, Mongi Ben Ouedou et Abderrazek Kallel (2015) ont étudié l'influence des déchets des marbreries et des usines de carrelage en tant qu'addition minérale sur les propriétés à l'état durci du béton auto plaçant (BAP). Plusieurs essais de résistance et de durabilité ont été effectués sur des éprouvettes et des échantillons de ce type de BAP : essais de résistances mécaniques, essai ultrasonique, essai de porosité, essais d'absorption d'eau par immersion et par capillarité et l'observation au microscope électronique à balayage (MEB). La formulation des bétons est effectuée par le logiciel « Béton Lab Pro2 ». Les résultats montrent un effet favorable de toutes les additions aussi bien sur les propriétés à l'état durci que sur la microstructure des BAP. [78]

[**K. GADRI, A. GUETTALA 2014**] ont étudié, l'incorporer des déchets de polissage de carrelage comme filler dans le béton de sable et étudier l'effet d'ajout de ce déchet avec différents dosages sur les caractéristiques physiques (retrait, déformation longitudinale) et mécaniques (résistance à la compression et à la traction), afin de l'utiliser dans différents domaines et spécialement dans la réparation des ouvrages en béton armé. Pour formuler un béton de sable à base de matériaux locaux (sable de Bousaada, ciment : CPJ 32,5), avec un

dosage optimum de 145 Kg/m³ de filler déchet de polissage de carrelage, à l'âge de 28 jours une résistance mécanique à la compression qui dépasse 25 MPa avec un retrait modéré. Les résultats d'un gain économique et autre écologique. [79]

III.11 Conclusion

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la bio physicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter.

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats dans les domaines routiers, ils sont utilisés en fonction de leur rentabilité d'exploitation, leurs propriétés et leurs caractéristiques physiques et chimiques, dans le domaine routier .Les granulats entrant dans la composition des chaussées représentent plus de 95% en poids Dans cette étude on s'intéresse aux déchets de carrelage et pour l'utiliser en tant que sable (0/3), graviers (3/8, 8/15, 15/25) pour le grave-bitume dans le domaine routier, il faut respecter certains critères qui seront exposés au chapitre suivant.

Chapitre IV
Matériaux Et Méthodes De Travail

Chapitre IV Matériaux Et Méthodes De Travail

IV.1 Introduction

Nous exploitons Les résultats expérimentaux qu'étaient élaboré par laboratoire LTP EST—SKIKDA –LNCH SKIKDA et LTP EST ANNABA.

Ces résultats portant sur la formulation d'un grave bitume classique.

Le grave bitumineux est considéré comme témoin permettant de voir les améliorations apportées par l'introduction des granulats des déchets de carrelage.

Pour cela les points suivants sont traités

- Identification des constituants.
- Etude de formulation d'une grave - bitume.
- Etude de formulation d'une grave - bitume modifié.

IV.2 Matériaux utilisés

Les granulats ordinaires(sable, graviers)utilisés dans cette étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des mélanges bitumineux (grave bitume) destinée à la confection de couche de base, graviers extraites de la carrière EL-GHEDIR, Wilaya de Skikda , EST de Algérie.

- Les granulats recyclés sont des déchets de carrelage d'usine d'El-Harouche wilaya de Skikda, ce matériau constitue par le ciment blanc, ciment gris, sable de carrière, Coloré, gravier (3/8,8/15,1/5), grain de marbre (3/8 ,8/15, 1/5). Le DC obtenu par concassage et criblage des chutes des carrelages.

- Liant hydrocarboné utilisé est le bitume de classe 40/50 provenant de la société Nationale NAFTAL SKIKDA.

IV.2.1 Les caractéristiques des matériaux utilisés

IV.2.1.1 Granulats Ordinaires

Analyse granulométrique (NF EN 933-1)

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions. L'analyse granulométrique complète comprend deux opérations :

- Le tamisage pour la distribution pondérale des particules de dimension supérieure ou égale à 80microns.
- La sédimentométrie pour la distribution pondérale des particules de dimension inférieure à 100 microns (Mode opératoire),
- Le résultat de L'analyse granulométrique traduit en courbe, facilite l'identification exacte du matériau et permet d'en prévoir certaines propriétés routières.

Tableau IV.1 Analyse granulométrique des granulats ordinaire utilisés

Tamis (mm)	Classe granulaire			
	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
31,5	-	-	-	-
25	-	-	-	97,31
16	-	-	99,19	68,64
14	-	-	94,53	25
10	-	99,89	57,46	7,95
8	-	99,26	24,49	1,02
6,3	-	68,67	1,68	0,88
4	91,66	2,51	0,87	-
2	64,42	1,82	-	-
1	45,15	-	-	-
0,5	29,35	-	-	-
0,315	-	-	-	-

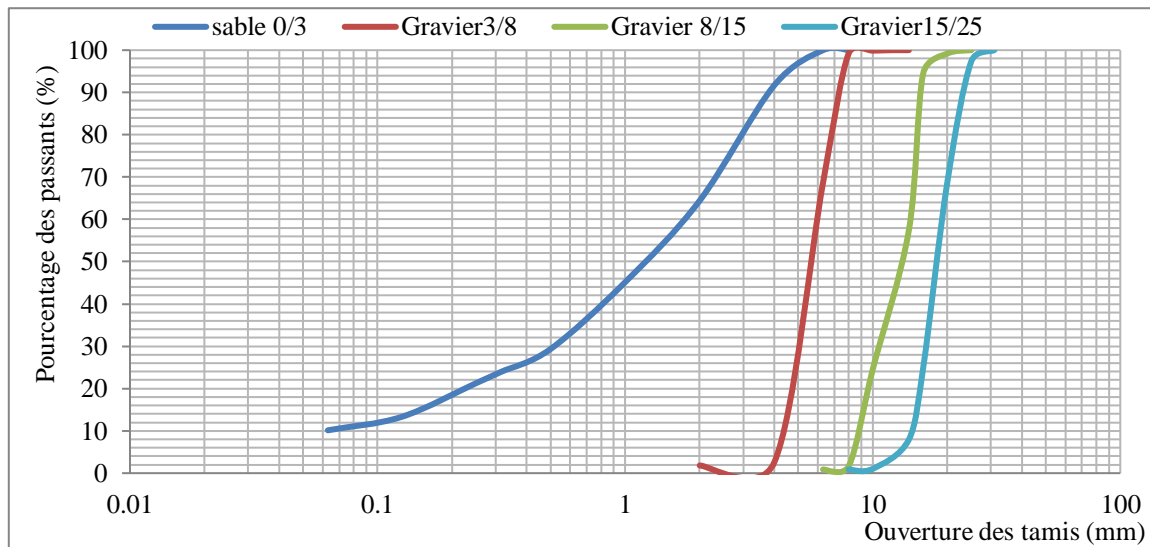


Figure IV.1 Courbe granulométrique des granulats ordinaires

La présente courbe montre bien que la granulométrie des granulats ordinaires utilisés est étalée et continue.

Masses volumiques

Les résultats se résument dans le tableau suivant pour les différentes classes granulaires.

Tableau IV.2 La masse volumique absolue, réelle, saturée et apparente de classes granulaires utilisées

Masse volumique	Classe granulaire			
	0/3	3/8	8/15	15/25
Masse volumique absolue	-	2,82	2,82	2,79
Masse volumique réelle	-	2,71	2,71	2,75
Masse volumique saturée	-	2,75	2,75	2,76
Masse volumique apparente	1.70	1.52	1.55	1.52

- Les résultats des masses volumiques réelles, absolues et saturé sont presque les mêmes valeurs.
- Les résultats des masses volumiques apparentes sont presque égaux avec les classes de 3/8, 8/15 et 15/25.
- Les valeurs des masses volumiques apparentes sont respectivement les plus faibles. Par contre, celles des masses volumiques absolues sont respectivement les plus grandes pour l'ensemble des granulats.

Essai d'aplatissement (NF EN 933-3)

Le pourcentage d'élément plat contenu dans l'ensemble des échantillons inférieur au seuil fixé par la norme recommandée comme indiqué dans le Tableau suivant :

Tableau IV.3 résultats d'essai d'aplatissement des G.O

Fraction/ classe	3/8	8/15	15/25	Spécification
A (%)	12,26	8,89	7,59	<20%

Essai d'Équivalent de sable (NF EN 933-8)

Les résultats d'essai est exposé dans le Tableau suivant

Tableau IV.4 résultats d'essai d'Équivalent de sable des G.O.

Essai	Fraction	Résultat	Spécification
ES	0/3	73,48	>40%

Le pourcentage d'élément fin subsistant après lavage est supérieur à la valeur exigée par la norme NF EN 933-8, Qui indique que le sable est un sable propre.

Valeur de Bleu méthylène M_B (NF EN 933-9)

Tableau IV.5 résultats d'Essai du bleu de méthylène M_B des G.O

Essai	Fraction	Résultat	Spécification
M_B	0/3	0,85	<1%

Essais de dureté et de durabilité

Pour les granulats utilisés dans ce travail on a effectué l'essai de Los Angeles qui consiste de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat et l'essai de Coefficients Micro Deval humide .Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.6 résultats d'essais de Los Angeles et Micro Deval.

Essai	Résultat	Spécification
LA	23,67	<25%
MDE	10,22	<20%

Essai Proctor modifié selon NF P 94-093

Cet essai consiste a déterminé, pour un compactage normalisé d'intensité donnée, la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. L'essai est réalisé au moule CBR et la dame Proctor modifié, les résultats de cet essai est donnée par la figure suivante

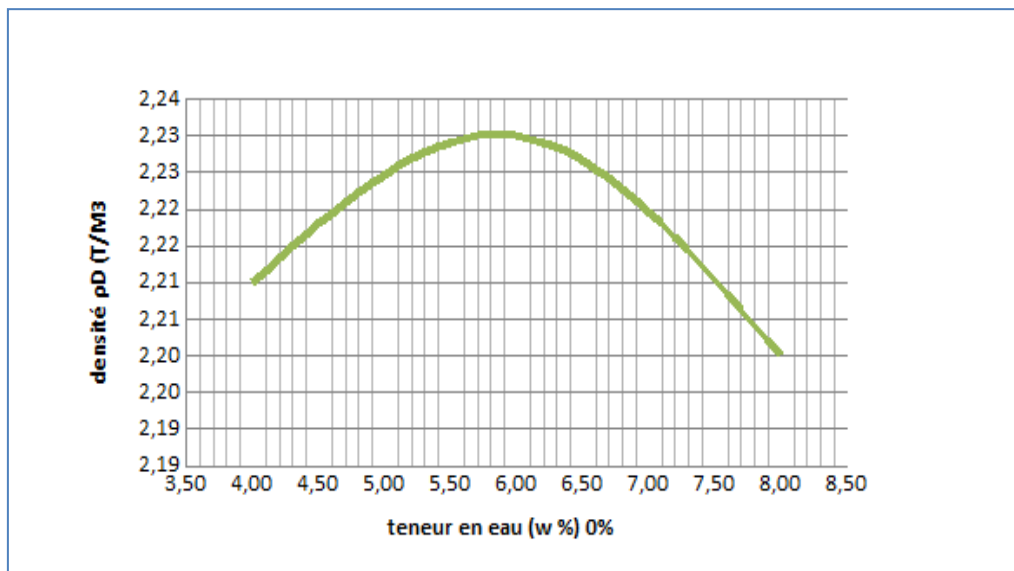


Figure IV.2 Essai de Proctor modifié des G.O

IV.2.1.2 Matériau recyclé

Le déchet de carrelage est un déchet de construction et démolition, Le matériau constitue par le ciment blanc –ciment gris, sable de carrière, couleront, gravier (3/8,8/15,1/5), grain de marbre (3/8 ,8/15, 1/5). Les G.R obtenu par concassage et criblage des chutes des carrelages, pour avoir les classes granulaires (fig. 2) 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25.



Photo IV.1 déchets de carrelage



PhotoIV.2 classe granulaire de G,R

Analyse granulométrique NF EN 933-1

Tableau IV.7 Analyse granulométrique des granulats recyclé (DDC) utilisés

Tamis (mm)	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25
25	-	-	-	98
20	-	-	100	82,72
16	-	-	56,31	39,76
14	-	-	35,5	20,72
12.5	-	-	26,5	10,84
10	-	65,125	20,25	3,68
8	-	54,625	14,31	-
6.3	-	41,75	8,185	-
4.0	98.4	29,25	-	-
2.0	74,4	5	-	-
1.0	31,4	-	-	-
0.5	14,4	-	-	-
0,25	7	-	-	-
0.125	4,8	-	-	-
0,063	2	-	-	-

La courbe granulométrique

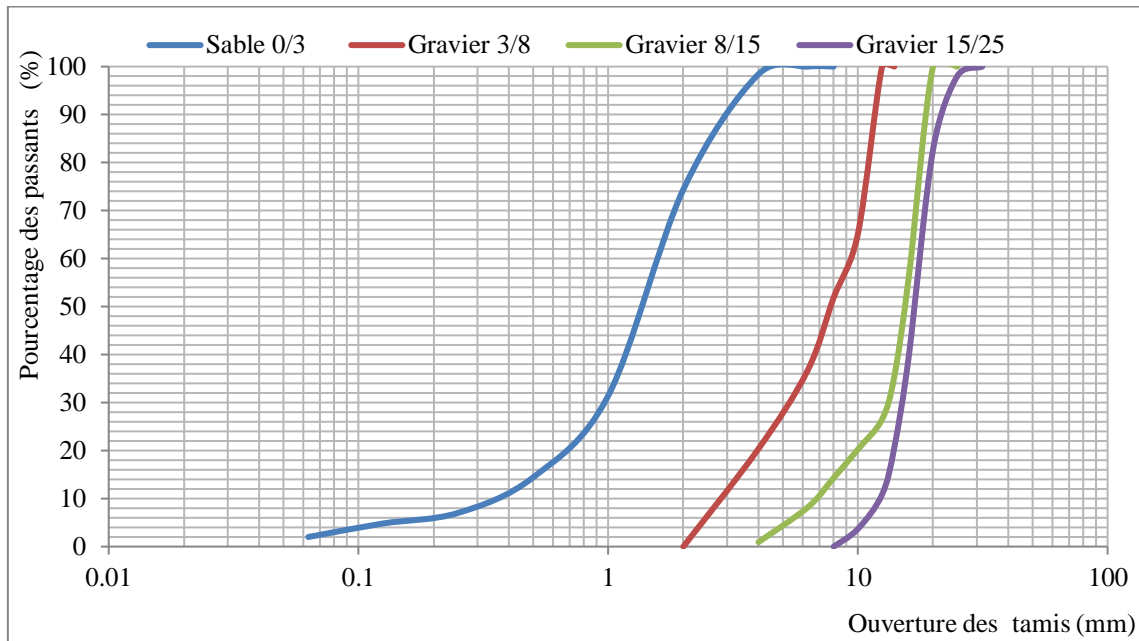


Figure IV.3 Courbe granulométrique de déchets de carrelage

Densité volumique

Tableau IV.8 La masse volumique absolue, réelle, saturée et la densité apparente de G.R

Essais	0/5	5/25
Masse volumique absolue	2,54	2,65
Masse volumique réelle	2,25	2,21
Masse volumique saturée	2,37	2,38
Coefficient d'absorption	5,04	7.42
Porosité	11,37	16.43
Densité apparente	1,24	-

Essai d'aplatissement

Tableau IV.9 Résultats d'essai d'aplatissement des G.R

Fraction	3/8	8/15	15/25
A (%)	7,67	7,17	5,35

Essai d'Équivalent de sable (NF EN 933-8)

Les résultats d'essais est exposé dans le Tableau suivant

Tableau IV.10 Résultats d'essais d'Équivalent de sable des G.R.

Essai	Fraction	Résultat
ES	0/3	73

Le résultat obtenu montre que le matériau utilisé propre à faible pourcentage des fines argileuses.

Valeur de Bleu méthylène V_B (NF P 94-068)

Tableau IV.11 Résultats d'Essai du bleu de méthylène des G.R

Essai	Fraction	Résultat
V_B	0/3	0,16

Essais de dureté et de durabilité

Les résultats d'essai Los Angles et Micro Deval des granulats recyclés sont exposé dans le tableau suivant.

Tableau IV.12 Résultats d'essais Los Angles et Micro Deval

Essais	Résultats
LA(%)	59
MDE%	50

D'après les essais d'identification sur les déchets de carrelage on a classé dans la catégorie 3 de matériau pierreux artificiel. D'après NF EN 1342-A1 les valeurs applicable LA60+MDE50. Parce que le matériau recyclé.

Essai de fragmentabilité (NF P 94-066)

L'essai de fragmentabilité permet d'apprécier et de mesurer la sensibilité d'un matériau rocheux à se fragmenter sous la sollicitation des engins de terrassement. L'essai se traduit par le coefficient de fragmentabilité F_R .

Avec : Seuil retenu $FR = 7$, $FR < 7$: roche peu fragmentable, $FR > 7$: roche fragmentable

Tableau IV.13 Résultat d'essai de fragmentabilité

Essai	Résultats
F_R	3,66

Le résultat montre que le matériau peu fragmentable.

Essai de dégradabilité (NF P 94-067)

L'essai consiste à déterminer la réduction de D10 d'un échantillon de 2Kg d'une fraction de 10/20, soumis à quatre cycles imbibition-séchages (cycle climatique). La durée de séchage et d'immersion sont respectivement 8h et 16h . D'après les quatre cycles de 24h, l'échantillon

est soumis à une analyse granulométrique complète. . L'essai se traduit par le coefficient de dégradabilité D_G .

Avec Seuil retenu $D_G = 20$ et $5, D_G > 20$: matériaux rocheux très dégradables

$5 < D_G < 20$: matériaux rocheux moyennement dégradables

$D_G < 5$: matériaux rocheux peu dégradables

Tableau IV.14 Résultat d'essai de dégradabilité

Essai	Résultats
Dg	1,1

Le résultat montre que le matériau peu dégradable

Essai Proctor modifié (NF P 94-093)

Cet essai consiste a déterminé, pour un compactage normalisé d'intensité donnée, la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. L'essai est réalisé au moule CBR et la dame Proctor modifié, les résultats de cet essai est donnée par la figure suivante

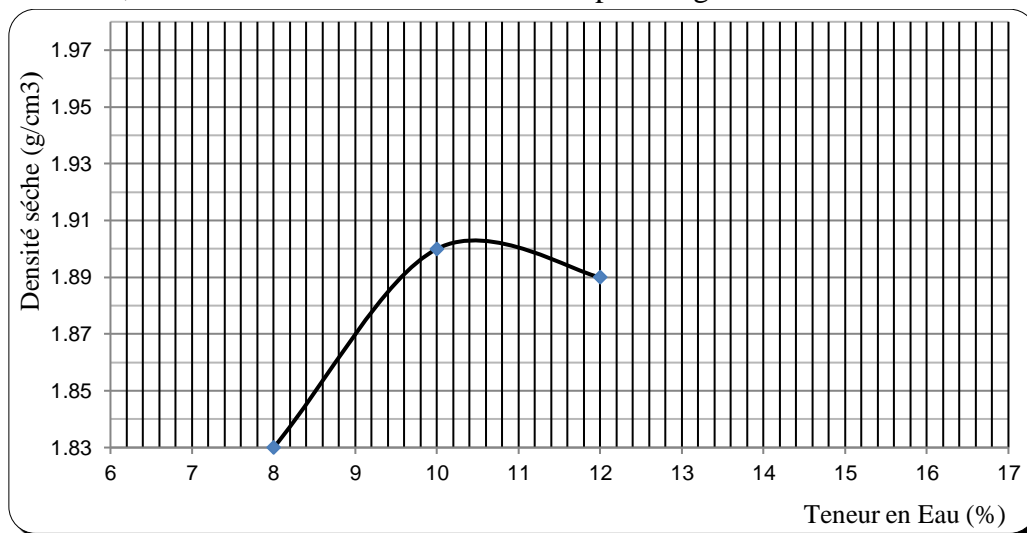


Figure IV.4 Courbe Proctor modifié

Le matériau est peu sensible à l'eau .le matériau présent de valeur de densité sèche max de 1.91.

Essai C.B.R Selon NF P 94-078

L'indice CBR est le résultat d'un essai mécanique permettant de caractériser la portance d'un sol .il est déterminé à partir de la mesure de l'enfoncement d'une pointe normalisée dans un échantillon compacté à l'énergie Proctor. Les résultats sont donnés par les deux figures suivantes :

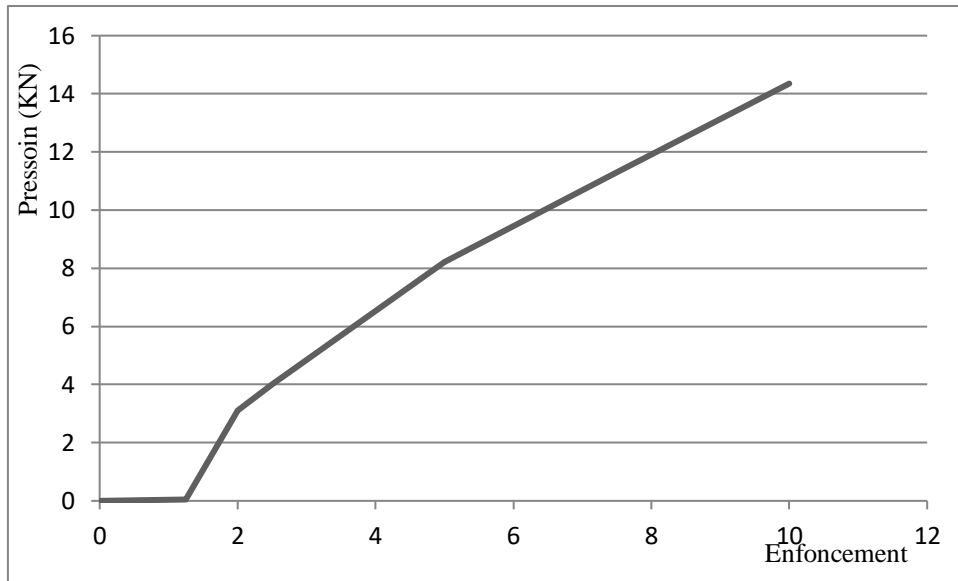


Figure IV.5 résultats d'essai CBR Immédiat

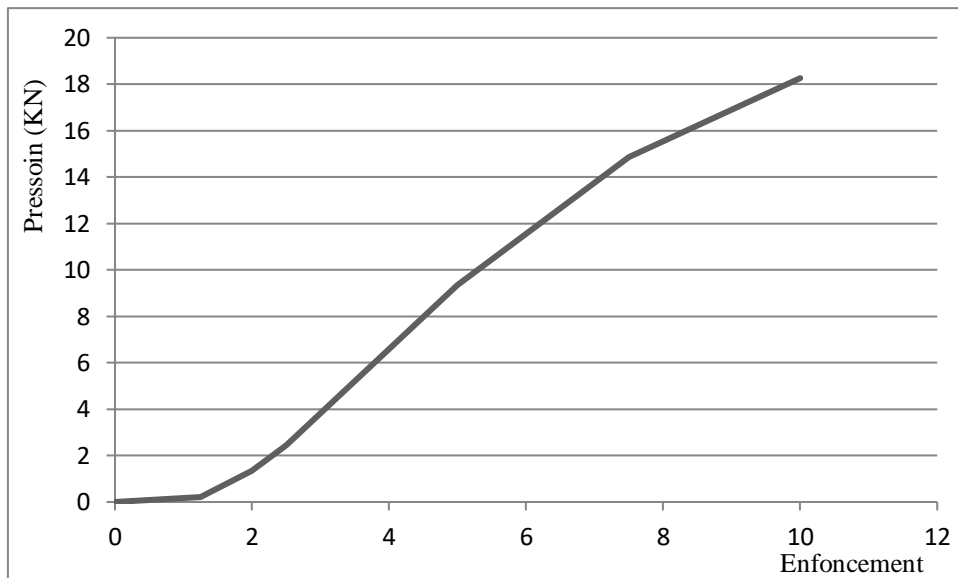


Figure IV.6 Résultats d'essai C.B.R Imbibé

Indice I.C.B.R max(2.5 ;5) (immédiat)	41.3
Indice I.C.B.R max(2.5 ;5) imb	46.81

IV.2.1.3 Caractéristiques des bitumes utilisés

Le bitume utilisé est de type 40/50 provenant de la société nationale Naftal. Les caractéristiques du bitume tel que la pénétrabilité à 25C°, température bille et anneau ainsi la masse volumique sont résumées dans le tableau

Tableau IV.15 Caractéristiques du bitume 40/50

Essai	Norme	Résultat	spécification
Pénétrabilité au 1/10mm à 25 °C	NF EN 1426	45	40 à 50
Température de Ramollissement (B & A)	NF EN 1427	51	47-60
Densité relative à 25 °C	NF EN 15325	1,045	1,00-1,10

IV.3 Formulation d'un grave bitumineux classique

Les mélanges hydrocarbonés sont constitués de deux matériaux :

- Les granulats qui constituent le squelette minéral.
- Le bitume qui a pour but d'assurer la liaison entre ces derniers, confère aussi au mélange ses propriétés viscoélastiques.

IV.3.1 Etude De Formulation

Un matériau routier performant doit assurer un comportement mécanique excellent (performance avec diminution des épaisseurs des structures) et durable (réduction des coûts d'entretien directs et indirects). Donc, l'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides pour atteindre les performances visées. En fait, la formulation est basée sur deux phases principales ; à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant.

IV.3.1.1 Composition granulométrique

Les graves bitumineux doivent répondre à certaines règles de composition granulométrique que l'on résume sous forme de fuseaux à l'intérieur desquels la courbe granulométrique du mélange considéré soit s'inscrive.

L'étude de la composition granulométrique de l'enrobé comporte deux étapes:

- La forme de la courbe (continuité).
- Son état de compaction (nature et intensité du compactage).

La composition granulométrique du mélange devra être, pour un grave bitume 0/20, à l'intérieur des fourchettes données dans le tableau.

Tableau IV.16 Fourchette des valeurs min et max

Tamis (mm)	20	10	2	0.5	0.063
Min %	89.5	63.2	26.2	11	1.4
Max %	100	81.2	40.2	21	7.4

Après analyse, on a opté à la composition suivante

Tableau IV.17 classe granulométrique

TAMIS (mm)	Sable 0/ 3	46%	Gravier 3/8	12%	Gravier 8/15	21%	Gravier 15/25	21%	100%
25	100	46,00	100	12,00	100	21,00	97,31	20,44	99,44
20	100,00	46,00	100,00	12,00	100,00	21,00	68,64	14,41	93,41
16	100,00	46,00	100,00	12,00	99,19	20,83	25,00	5,25	84,08
14	100,00	46,00	100,00	12,00	94,53	19,85	7,95	1,67	79,52
10	100,00	46,00	99,89	11,99	57,46	12,07	1,02	0,21	70,27
8	100,00	46,00	99,26	11,91	24,49	5,14	0,88	0,18	63,24
6,3	100,00	46,00	68,67	8,24	1,68	0,35	0,00	0,00	54,59
4	91,66	42,16	2,51	0,30	0,87	0,18	0,00	0,00	42,65
2	64,42	29,63	1,82	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	29,85
1	45,15	20,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,77
0,5	29,35	13,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,50
0,315	23,93	11,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,01
0,25	21,28	9,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,79
0,125	13,30	6,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,12
0,08	10,14	4,66	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,66

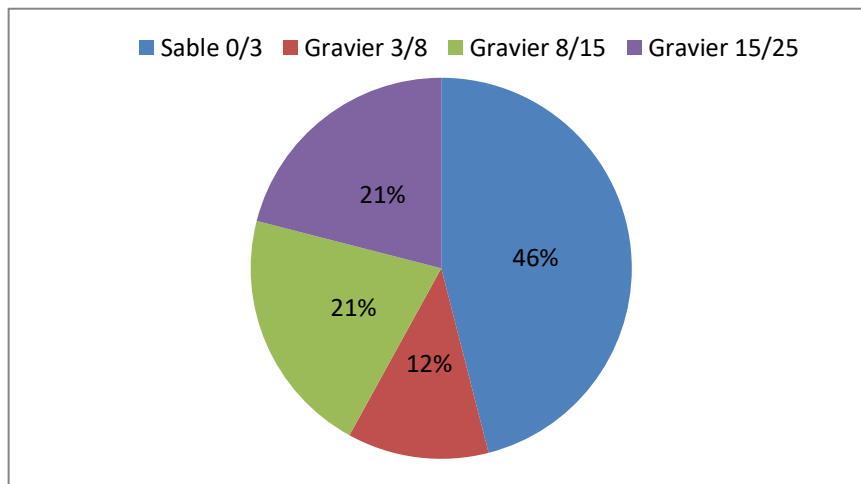


Figure IV.7 composition granulatoire

La courbe du mélange résultant est représentée sur la figure ci-dessous

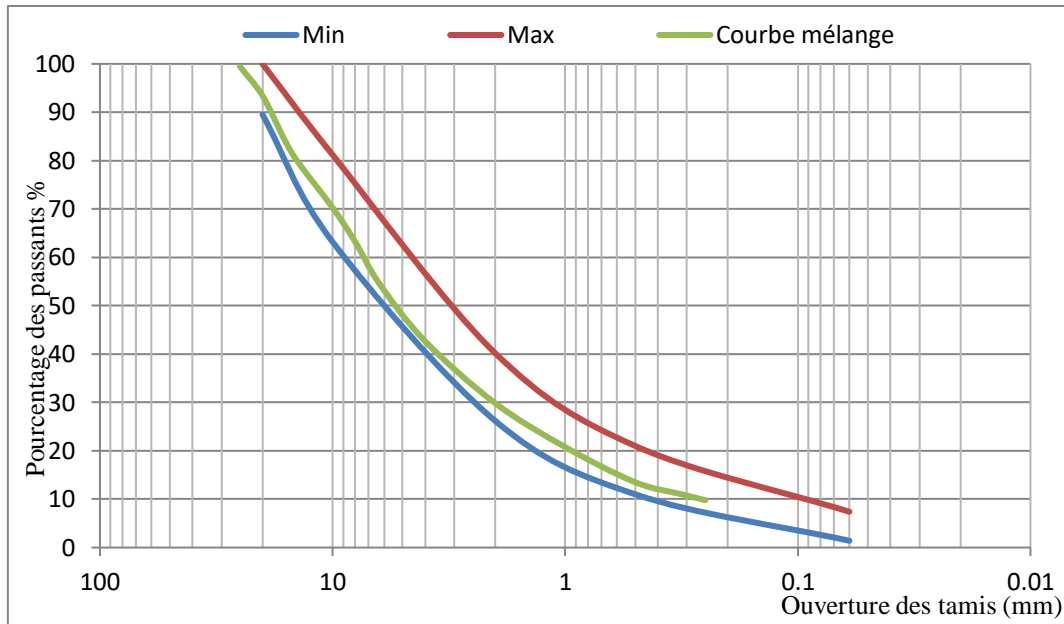


Figure IV.8 Courbe granulométrique des mélanges de grave bitume 0/20

D'après cette figure, on peut considérer que les pourcentages des granulats peuvent être utilisés dans la suite de formulation.

IV.3.1.2 Teneur en liant

Par définition, on appelle teneur en liant, la masse de liant sur la masse des granulats secs, exprimée en pourcentage. La teneur en liant d'un enrobé bitumineux à retenir pour un chantier est définie à partir d'une étude de laboratoire qui consiste à choisir, à partir d'un granulat simple ou composé entrant dans le fuseau recommandé, une teneur en liant en fonction de la surface spécifique du granulat.

Σ = Surface Spécifique des Granulats en m^2/kg

$$100 * \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \text{ m}^2/kg$$

Avec :

G : des éléments supérieurs à 6,3 mm.

S : des éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm.

s : des éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm.

F : des éléments inférieurs à 0.08 mm.

La teneur en liant est donnée par la formule suivante : $TL = k * \alpha * \sqrt[3]{\Sigma}$

Avec :

k : Le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats, il prend les valeurs suivant :

- de 2 à 2,9 pour les graves bitumes « GB »
- de 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux « BB »

α : Coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVR g ».

$$\alpha = 2.65/MVR$$

$MVR_g = \sum P_i * d_i$ - MVRg est la masse volumique réelle des granulats

P_i : Pourcentage de la fraction i. - d_i : Poids spécifique de la fraction i.

$$\sqrt[5]{\Sigma} = 1.51 \quad - \quad \alpha = 0.94$$

La teneur en liant exprimée par le tableau suivant :

Tableau IV.18 Les résultats de teneur en liant

Module de Richesse (K)	2.75
A	0.94
$\sqrt[5]{\Sigma}$	1.51
Teneur en liant	3.90%

IV.4 Etude de performance

Essai Duriez (grave bitumineux témoin)

Afin de mieux cerner le comportement d'un grave bitumineux en présence d'eau, nous avons confectionné des éprouvettes avec un module de richesse, soumises à l'essai Duriez afin d'évaluer les résistances a la compression à sec et en immersion ainsi que le rapport immersion - compression.

Les résultats de performance suivant l'essai Duriez, obtenus pour le grave témoin sont présentés dans le tableau :

Tableau IV.19 Résultats d'essai Duriez

Essai duriez	
Teneur en liant (%)	3.90%
Module de richesse K	2.75
Densité apparente MVA (g/cm ³)	2.375
Densité réelle MVR (g/cm ³)	2.542
Compacité	93.41
V%	6.95
Résistance à la compression à l'air (MPa)	12.06
Résistance à la compression après Immersion (MPa)	10.498
Rapport (Rc immersion/Rc à sec)	0.87

IV.5 Formulation d'un grave bitumineux modifié

La modification de l'enrobe est effectuée par l'ajout de déchets de carrelage selon plusieurs pourcentages à savoir : 10 – 20 et 30%.

En effet, dans cette méthode, la quantité de l'additif est choisie comme un pourcentage en poids. Puis, le grave bitumineux est formulé suivant les proportions retenues dans l'étude de formulation précédente.

Essai Duriez (grave bitumineux modifié)

Mode opératoire

Mettre à l'étuve le mélange (GB neuf + déchets de carrelage) retenu d'un poids total dépendant du nombre de moule ainsi que les moules Duriez à une température spécifiée (160°C) pendant 2 heures.



Photo IV.3 Etuve de chauffage

Peser la quantité du GB neuf et déchets de carrelage pour chaque mélange

10 % (12600.000g G.O + 1400.000 g G.R).

20% (11200.000 g G.O +2800.000 g G.R)

30% (9800.000g G.O+4200.000g G.R)

Tableau IV.20 La quantité des G.O et G.R pour chaque mélange

matériau	Granulats ordinaires				Granulats recyclés			
	0/3	3/8	8/15	15/25	0/3	3/8	8/15	15/25
Fraction Pourcentage								
10%	6160	1400	2520	2520	280	280	420	420
20%	5600	1120	2240	2240	840	560	700	700
30%	5040	840	1960	1960	1400	840	980	980

Malaxer le mélange (GB neuf + D.D.C) pour homogénéiser pendant 5 minutes pour chaque pourcentage (10%, 20% et 30%).



Photo IV.4 Malaxeur de mélanges bitumineux

Remplir le moule d'un grave bitume



Photo IV.5 Remplissage des moules Duriez

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet effectué par un piston placé à la partie supérieure d'un moule (voire le schéma ci-dessous) sachant que la charge appliquée pour les mélanges hydrocarbonés de $D \leq 14$ mm est environ $60 \text{ KN} \pm 0,5 \%$.

La charge doit être atteinte entre 5 s et 60 s maximum et maintenue entre 300 s et 305 s. Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue.

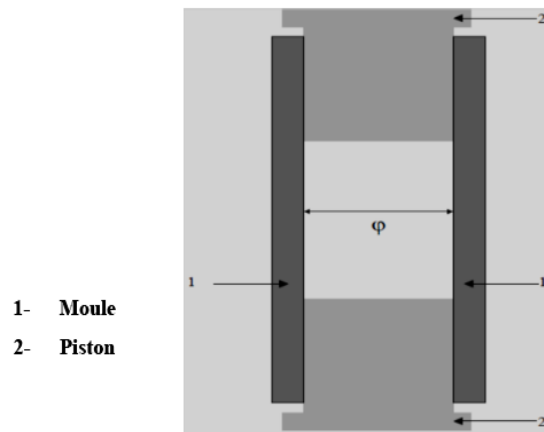


Figure IV.9 Moule de compactage.

Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4 h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées



Photo IV.6 Eprouvettes Duriez

Les éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage de vides.



Photo IV.7 Peser hydrostatique les éprouvettes Duriez

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation dans des conditions définies :

- des éprouvettes pour chaque pourcentage (10,20 et 30 %) à 18°C pendant 07 jours dans l'air
- des éprouvettes pour chaque pourcentage (10,20 et 30 %) à 18°C pendant 07 jours dans l'eau.

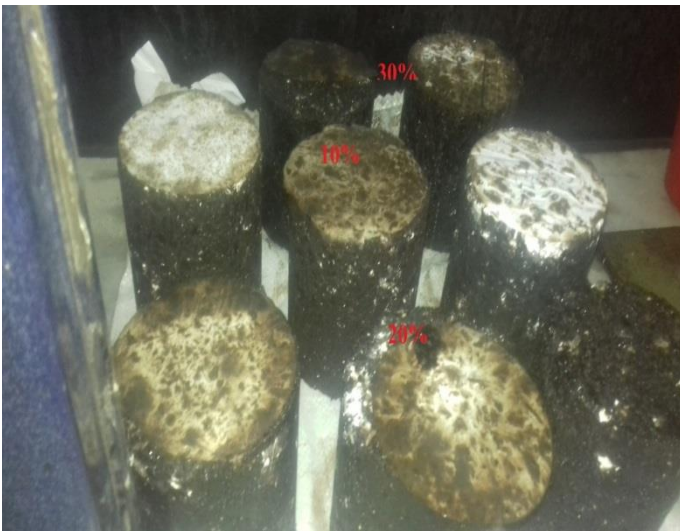


Photo IV.8 Conservation des éprouvettes à l'air Photo.IV.9 Conservation des éprouvettes dans l'eau

Les éprouvettes sont écrasées à 18°C au septième jour et l'on obtient:

- résistance des éprouvettes conservées à l'air pendant 7j (R) .
- résistance des éprouvettes conservées dans l'eau pendant 7j (r).

Le rapport r/R appelé "rapport d'immersion/compression" traduit en quelque sorte la tenue à l'eau d'un grave bitumineux.



Photo IV.10 Presse de compactage

IV.6 Conclusion

D'après les résultats précédents on a :

- Le déchet de carrelage classé sur la catégorie 3 autre matériau pierreux artificiel, et aussi dans la classe F sous-produit.
- Les essais de caractérisation de matériau recyclé sont conforme à les normes
- Les essais de LA et MDE de déchets de carrelage à des valeurs plus que les valeurs de matériau ordinaires.
- D'après la formulation bitumineuse en a adopté la teneur en liant et 3.90%
- La résistance mécanique du matériau étudié varie en fonction de la teneur en liant et du pourcentage d'ajout des granulats de carrelage.

La formule de 46 % de sable 0/3,12 % de gravier 3/8,21 % de gravier 8/15 et 21 % de gravier 15/25 avec une teneur en bitume optimale de 3.90 % de classe (40/50) présente de bonnes caractéristiques mécaniques vis-à-vis de la stabilité et la tenue à l'eau.

Chapitre V
Résultats Et Discussion

V. Résultats Et Discussion

V.1 Introduction

Après avoir déterminé la teneur en liant optimal et les pourcentages des substitutions de déchets de carrelage .les résultats des essais réalisé dans le laboratoire (essai Proctor modifié , essai duriez avec un grave bitume) sont cité dans ce chapitre .

V.2 Essais de compactage Au Proctor modifié

Les essais Proctor réalisés, ont permis de montrer l’aptitude au compactage des mélanges étudiés en fonction de leurs teneurs déchets de carrelage. Les courbes de compactage des différents mélanges sont présentées sur les figures N° V.1, V.2, V.3, V.4 et V.5 :

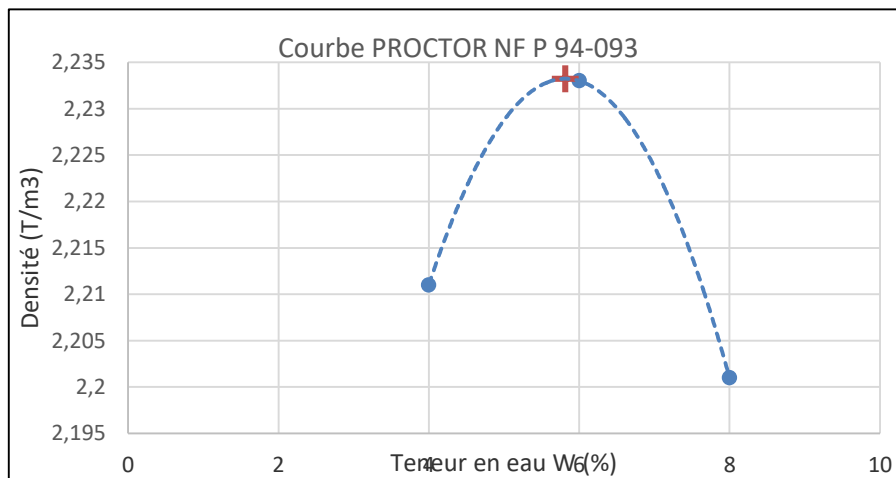


Figure V.1 Résultats d’essai Proctor a 0% de DDC

La figure V.1 montre la relation entre la teneur en eau et la densité sèche de grave non traité à partir de l’essai de Proctor modifiée .la valeur de teneur en eau optimale est 5.8% avec une valeur de 2.23g/cm de densité sèche.

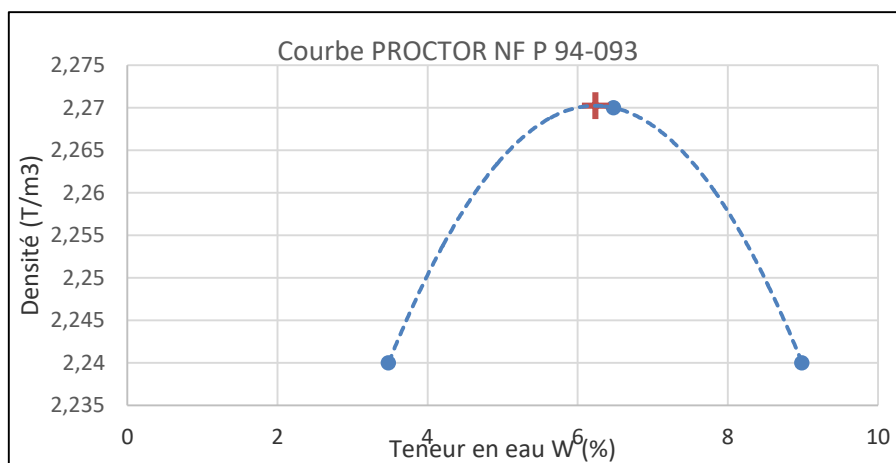


Figure V.2 Résultats d’essai Proctor a 10% de DDC

La figure V.2 montre que l'ajout de 10% de déchets de carrelage sèche par rapport à la densité sèche de matériau ordinaire. L'optimale de la teneur en eau est de 6.20% avec une valeur de densité de 2.27.

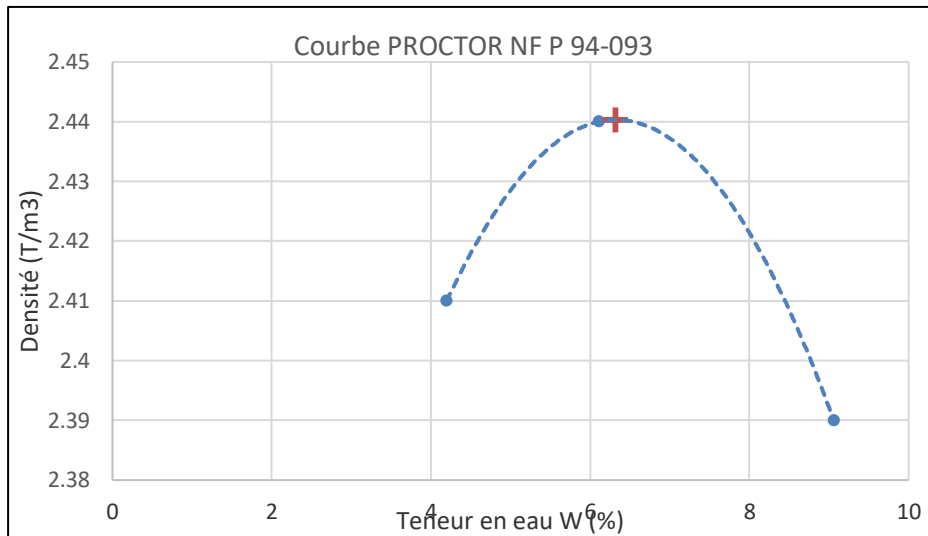


Figure V.3 Résultats d'essai Proctor a 20% de DDC

la figure V.3 monte que la densité sèche avec un substitution de 20% de déchets de carrelage a augmenté par rapport à la densité sèche de G.O a une valeur de 0.20 avec une valeur de teneur en eau optimale et de valeur 6.30 %.

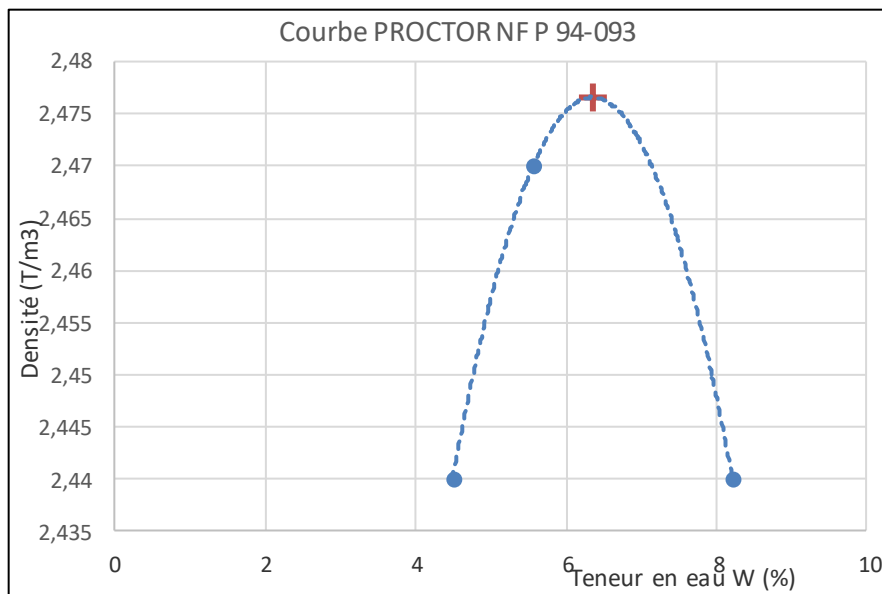


Figure V.4 Résultats d'essai Proctor a 30% de DDC

La figure V.4 montre les résultats d'essai de Proctor modifiée avec un substitution de déchets de carrelage à pourcentage de 30%. La valeur optimale de densité sèche de 2.48 avec une valeur de teneur en eau optimale de 6.3%

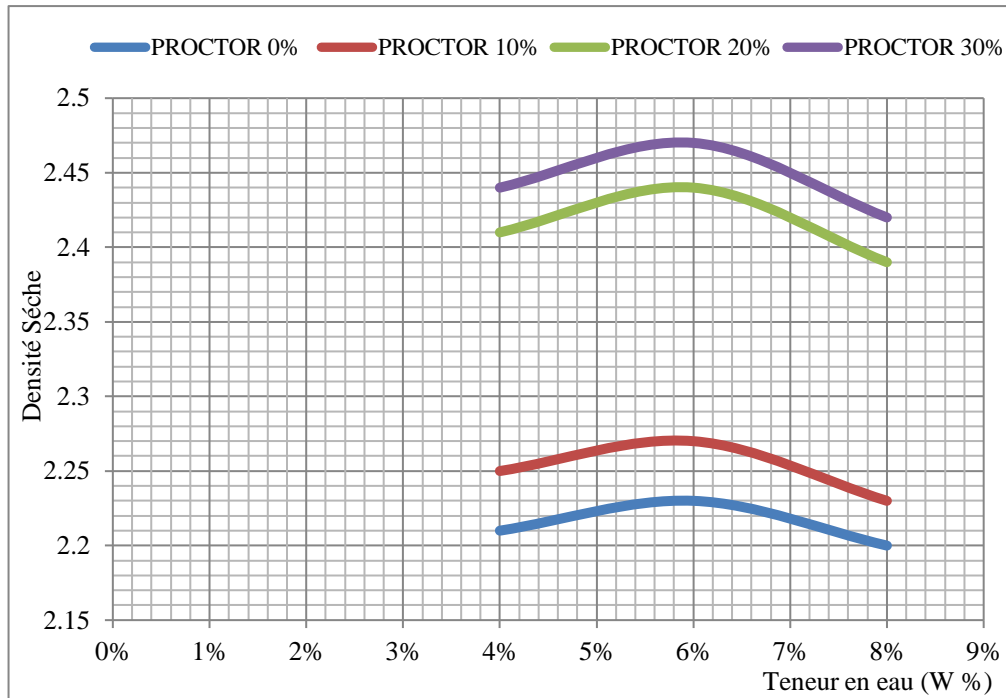


Figure V.5 Courbes de compactage des différents mélanges (Granulats naturels + D.D.C).

La figure montre la densité sèche maximale et de la teneur en eau optimale des granulats naturels en fonction de la teneur en déchets de carrelage. La densité sèche s'améliore de plus en plus avec l'ajout de déchets de carrelage,

V.3 Essai Duriez

V.3.1 Densité apparente

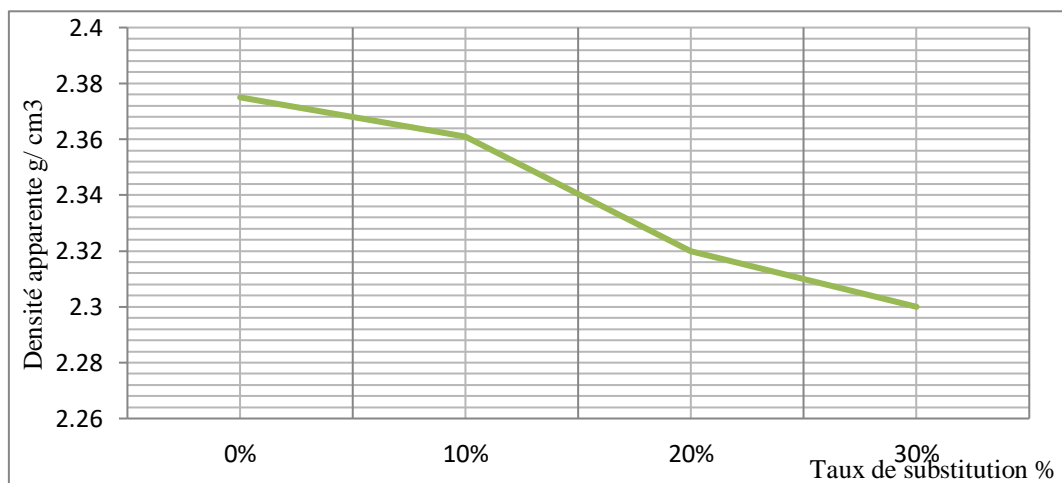


Figure V.6 Variation de la masse volumique en fonction du taux de substitution

La figure montre que la densité diminue en fonction de l'augmentation de taux de substitution des granulats recyclés, avec des densités suivantes 2.375, 2.361, 2.32 et 2.30 en fonction des valeurs de déchets de carrelage à 0, 10, 20 et 30%. Ceci peut être expliqué par la faible densité des granulats recyclés [77].

V.3.2 Compacité

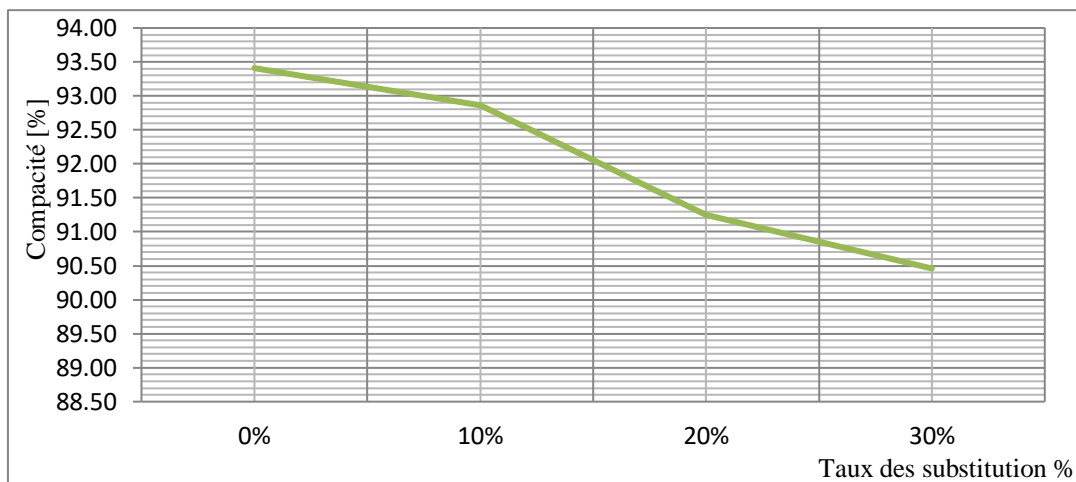


Figure V.7 Variation de la compacité en fonction du taux de substitution

La figure montre que l'introduction des granulats recyclés conduit à diminuer la compacité du grave bitume témoin, avec des valeurs de 93.41, 92.86, 91.25 et 90.46 successives avec la substitution des déchets de carrelage de 0, 10, 20 et 30% ceci est expliqué par la porosité élevée des granulats recyclés

V.3.3 Volume des vides

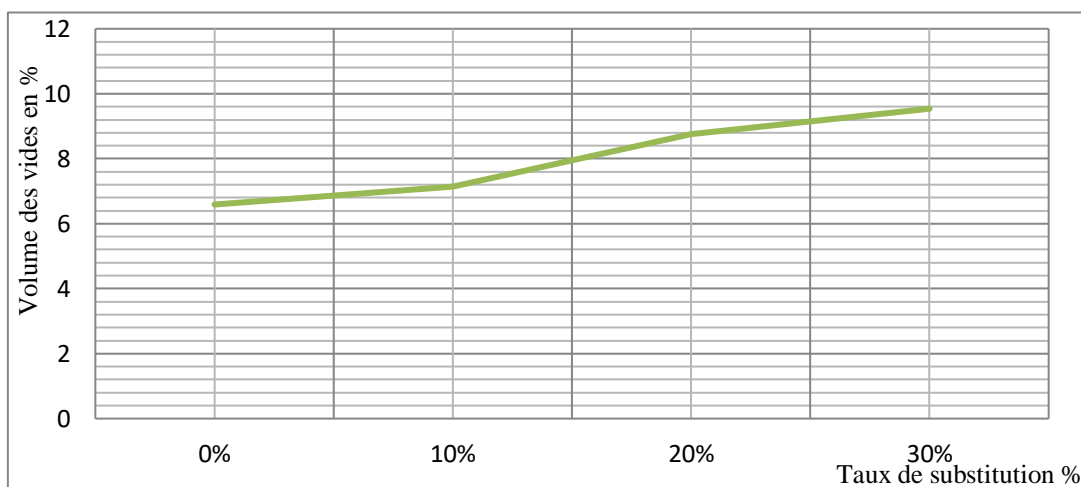


Figure V.8 Variation de volume des vides en fonction du taux de substitution

Dans la figure on constate que le volume des vides des granulats augmente avec l'augmentation du taux de substitution de granulats recyclés. La valeur maximale est de 9.45 obtenue par un taux de 30%, ceci est dû à la porosité des granulats recyclés; ces résultats concordent avec ceux trouvés aux [74].

- Ecart type des volumes des vides

Tableau V.1 Ecart type des volumes des vides

Formulations	0%			10%			20%			30%		
Volume de vide %	5.93	6.80	6.59	6.97	7.83	7.14	7.94	8.92	8.75	8.03	9.04	9.54
Moyenne	6.59			7.14			8.75			9.54		
Déviati on standard	0.370			0.371			0.427			0.62		

V.3.4 Résistance en compression

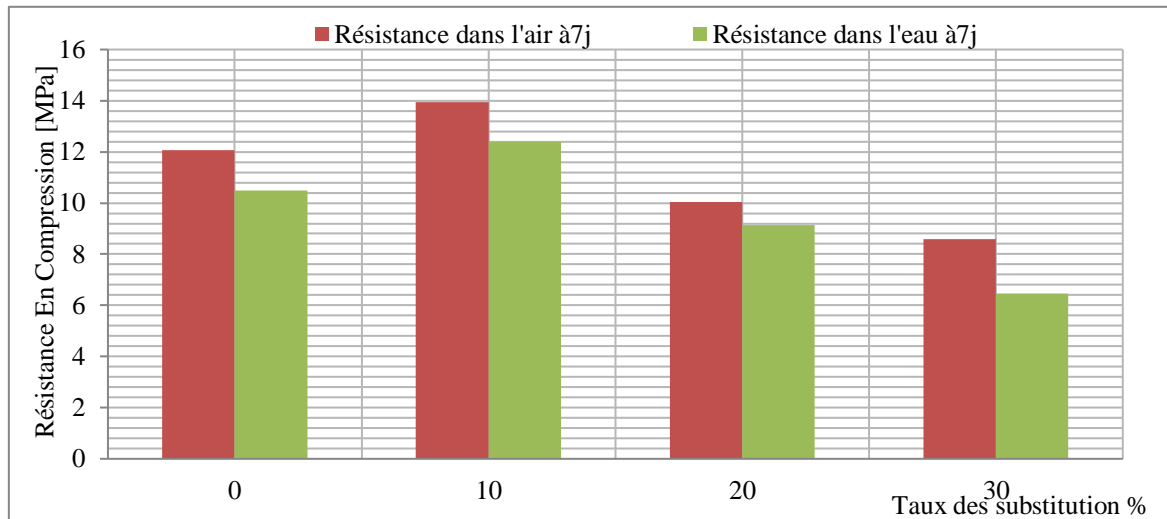


Figure V.9 Variation de la résistance en compression en fonction du taux de substitution

La figure indique que l'introduction des granulats recyclés conduit à augmenter la résistance en compression jusqu'à un taux de 10%, au-delà de ce taux l'effet s'inverse. Le mode de conservation n'influe pas sur le comportement en compression. Les valeurs maximales sont obtenus pour les taux de 10% , les valeurs minimales sont données par les taux de 30% des granulats recyclés. Ces résultats sont dû à la porosité des granulats recyclés d'une part, d'autre part, la diminution de la résistance à la compression dans les deux modes de conservation du aux propriétés intrinsèques des granulats recyclés [66]

Ecart type de compression

Tableau V.2 Ecart Type De Compression

Formulation	0%			10%			20%			30%		
r	9.95	11.047	10.498	11.95	12.84	12.395	9.17	9.11	9.143	5.389	6.53	6.548
R	11.72	12.4	12.06	14.056	13.829	13.942	9.183	10.9	10.04	7.543	8.9	8.58
Moyenne r	10.498			12.395			9.143			6.548		
Moyenne R	12.06			13.942			10.04			8.58		
Déviati on standard r	1.18			0.36			0.024			0.54		
Déviati on standard R	0.27			0.092			0.70			0.57		

V.3.5 Tenue à l'eau (Rapport r/R)

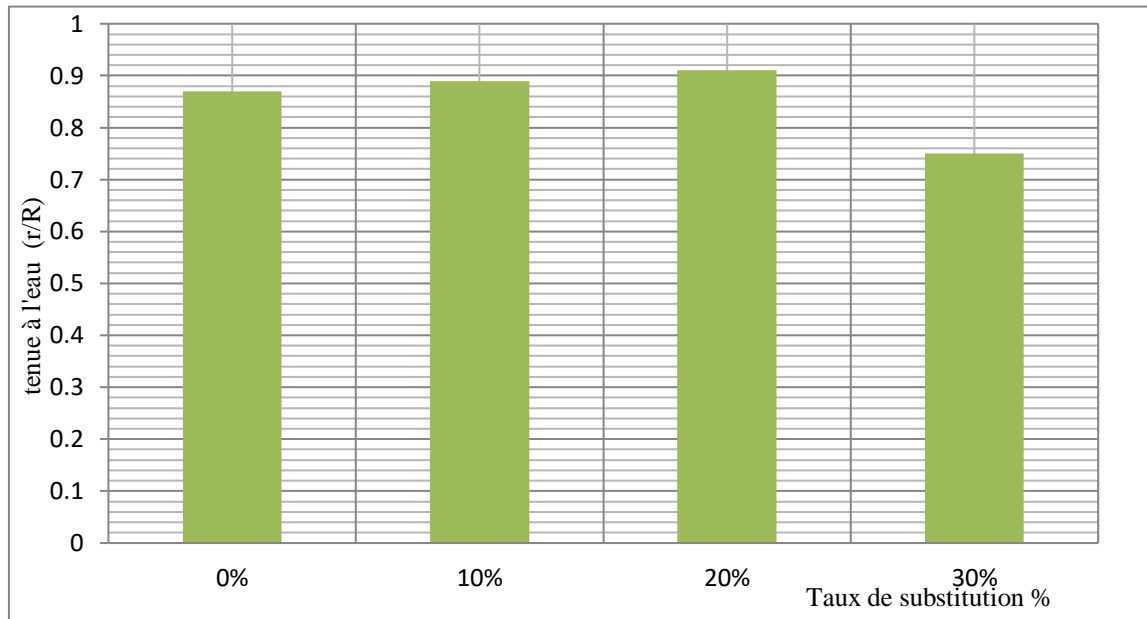


Figure V.10 Variation de tenue à l'eau en fonction du taux de substitution

Le rapport r/R augmente avec l'augmentation du taux de substitution pour atteindre une valeur maximale à 20% de taux de substitution, cette augmentation est expliquée par la très bonne aptitude de l'enrobé à résister au désenrobages sous l'action de l'eau [65]. La valeur minimale du rapport r/R est donnée par le mélange de 30% de taux de substitution, ce rapport reste acceptable et répond aux spécifications des normes.

V.4 Conclusion

D'après les résultats d'essais : essai Proctor Modifié et l'essai duriez (grave bitume modifié) des substitutions des déchets de carrelage (de 0% à 30%) avec un pat de 10%.

on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats d'essais Proctor sont améliorés la densité sèche de l'introduction des déchets de carrelage de 30 %
- L'introduction des granulats recyclés conduit à diminuer la densité du mélange bitumineux.
- La compacité diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitutions de granulats recyclés.
- Le pourcentage de vide augmente avec l'augmentation du taux de substitution.
- Le rapport r/R maximal est enregistré avec le mélange de 20% .

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif principal dans notre étude expérimentale est la réutilisation des déchets de carrelage dans la construction des chaussées. La valorisation des granulats recyclés permet de résoudre le manque des granulats naturels ainsi de prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes. La valorisation des déchets de construction reste très faible en Algérie

Pour atteindre notre but le travail est scindé en deux parties principales :

- Une partie théorique qui constitue la recherche bibliographique. Dans cette recherche il y a 3 chapitres. Dans le premier chapitre, on a essayé de donner plus de détails sur les chaussées routières, alors que le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur les bitume, granulats et les enrobes bitumineux. Finalement le troisième chapitre présente la valorisation des déchets technique routière.

- Une partie expérimentale est divisée en deux parties :

Première partie : des essais sur les caractérisations des matériaux utilisés (granulats ordinaire et les déchets de carrelage) : essai granulométrique- essai équivalent de sable – essai d'aplatissement

Deuxième partie : l'essai Proctor avec une introduction des déchets de carrelage et l'essai Duriez , consiste à observer la variation des différentes performances et caractéristiques du grave bitumineux en fonction de la teneur en déchets de carrelage qu'on a fait varier en pourcentage pondéral de 0% à 30% avec un pas de 10%.

Les résultats obtenus :

- de premier partie les déchets de carrelage classés dans la catégorie 3, autre matériau pierreux artificiel, et de la classe F sous-produit.
- Les résultats des essais de caractérisations sont conformes selon les spécifications des normes.

Les résultats obtenus pour la modification du grave bitume ont montré :

- il y a de 20% de déchets de carrelage (sable et gravier) conduit à des performances tout à fait intéressantes notamment aux niveaux des propriétés mécaniques par rapport à le grave bitume de référence:

- L'introduction des granulats recyclés conduit à diminué la densité du mélange bitumineux.
- La compacité diminue en fonction de l'augmentation du taux de substitutions de granulats recyclés.
- Le pourcentage de vide augmente avec l'augmentation du taux de substitution.
- Les meilleures performances en compression sont données par les mélanges de 10% de taux de substitution quel que soit le mode de conservation.
- Le rapport r/R maximal est enregistré par le mélange de 20% de taux de substitution.

Donc en arrive au conclue que L'incorporation de déchets de carrelage dans le squelette granulaire des enrobés nous semble une solution pratique, économique et performante.

Perspectives qui sont sur ce travail :

- Le déchet de carrelage peut réutiliser dans le béton.
- Le déchet de carrelage peut réutiliser dans la plate-forme de construction de la chaussée.
- Le déchet de carrelage peut utiliser comme un ajout dans les ciments.

Références Bibliographiques

Références Bibliographies

- [1] SenisnaZaoubida, Contribution et l'amélioration des caractéristiques rhéologiques et mécaniques du corps de chaussée par l'ajout des déchets de brique en zone saharienne, thèse doctorat L.M.D, Université KasdiMerbah – Ouargla2018.
- [2] LCPC; Catalogue des dégradations de surface des chaussées, Méthode d'essai n°52, complément n°38-2;Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (1998)
- [3] T.B.NGUYEN, (2008) : « Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée - Comportement mécanique et environnemental », Thèse de Doctorat. Délivrée par Université Paul Sabatier. L'université de Toulouse. PP 67-68
- [4] D.JEUFFROY, R.SAUTEREY :«Dimensionnement des chaussées», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2ème édition, 1991
- [5] Michel Faure routes EMTPE, Aléas juin 1998 TOMME 2
- [6] H.MOULIERAC, FPRVOST: «Enrobée bitumineux » tome 1 ,Edition par la revue générale des routes et d'aménagements (USRF2002).
- [7] Gunther GIDEL, Comportement et valorisation des graves non traitées calcaires utilisées pour les assises de chaussées souples, thèse doctorat , Université bordeaux I,2001.
- [8] T.B.NGUYEN, (2008) : « Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée - Comportement mécanique et environnemental », Thèse de Doctorat. Délivrer par Université Paul Sabatier. L'université de Toulouse. PP 67-68
- [9]cours-genie-civil_Caracteristiques_des_chaussees_cours-routes_procedes-generaux-de-construction.pdf 2010.
- [10] Bassem Ali thèse modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées application à l'analyse de l'orniérage université de Lille 2006.
- [11]D. Langevin, S. Poteau, I. Hénaut and J. F. Argillier ,Propriétés des émulsions de pétrole brut et leurs applications au transport des bruts lourds ,Revue d'IFP Energies nouvelles DOI : <https://doi.org/10.2516/ogst:2004036>December 2006 .
- [12] CTPP. (2001) : Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves, Fascicule 3(fiche technique de dimensionnement).
- [13] Cahier des charges 'enrobes a chaud, grand-duché de Luxembourg, Ministère des Travaux Publics, ponts et chaussées, version du 06 avril2005.

- [14] BERTHIER .J: (Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées) Projet et construction de routes; www. Techniques de l'Ingénieur.com.2014
- [15] SETRA, LCPC- Guide Technique, Réalisation des Remblais et des Couche de Forme, Fascicule II : Annexe Techniques, Juillet 2000, 2eme Edition.
- [16] G.JEUFFROY- Conception et Construction des Chaussées, Editions Eyrolles PARIS 1978
- [17] SHELL BITUMES, Techniques et Utilisations, Ed. Société des Pétroles Shell, 1991
- [18] Ait Mokhtar K, Influence de l'affinité liant hydrocarboné granulat sur les caractéristiques des mélanges hydrocarbonés, thèse de Magister, FGC/USTHB, 1994
- [19] Laetitia El Bese, recyclages à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux, thèse de doctorat, université de Paul Cezanne, 2008.
- [20] Guessabi N, Etude de l'influence du déchet plastique sur le comportement à la traction indirecte des enrobés bitumineux modifiés, thèse de Magister, FGC/USTHB, 2011
- [21] Mode Opérateur Du Laboratoire Centrale Des Ponts Et Chaussées « Liant Hydrocarbonés» Dunod ,paris 1970.
- [22] JNF EN 1426 , «bitume et liants bitumineux –détermination de la pénétrabilité à l'aiguille» -Décembre 2003.
- [23] Bernard LOMBARDI «liants hydrocarbonés» Edition T.I. 2007
- [24] Jean Georges MALLOUK « LES ENROBES BITUMINEUX » TMOE : 1 THEORIE Edition MODULO
- [25] Comité technique AIPCR des routes souples, Comité technique AIPCR des caractéristiques de surface « LES ENROBES DRAINANTS» Belgique1993, P135
- [26] NF XP P18-540 ,Granulats ,Définition, Conformité, Spécification ,Octobre1997
- [27] F. GABRYSIK ; 2008 ; – Matériaux – les granulats / chapitre 02.
- [28] Conseiller technique : Union Nationale des Producteurs de Granulats ; « la Convention Générale de Coopération signée entre le Ministère de l'Education Nationale» ; formation 1997.
- [29] R DUPAIN, R LANCHON, J C SAINT ARROMAN « GRANULATS, SOLS, CIMENTS ET BETONS» 2e édition conforme aux normes européennes 2009.
- [30] Sebastien LAMOTHE «ENROBE GRENU : INFLUNCE DU DOSAGE EN FILLER ET DE L'AJOUT D'UN SABLE ROULE SUR LA COUPLE OUVRABILITE ORNIERAGE» Mémoire présenté à l'école de technologie supérieur de l'université de Québec ,2004.
- [31] NF EN 933-1 Essais pour déterminer les propriétés géométriques des granulats

- [32] NF P 94- 068 «Valeur de Bleu méthylène » AFNOR – Paris – 1997
- [33] NF EN 933-3, Essais Pour Déterminer Les Caractéristiques Géométriques Des Granulats,Partie3, Détermination de La Forme Des Granulats, Confession D'aplatissement
- [34] NF EN 1097-1., Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 1, Détermination de la résistance à l'usure, Micro-Deval, 2011.
- [35] NF EN1097-2 §5. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 2, Méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation ,Los Angeles, 2010.
- [36] MADANI,T : "Caractérisation du fonctionnement des tambours sécheurs enrobeurs en vue de leur commande", Thèse de doctorat l'Université de Versailles Saint-Quentin en Yvelines,2005.
- [37] Guide technique «Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud», fascicule2 (La formulation), CTPP, Février 2004
- [38] Michel FAURE, « Cours de routes, tome 2 » les cours de l'ENTPE ALÉAS, chapitre 16 : les enrobés bitumineux. P 90.1998.
- [39] PY Florian ; Mémoire de PFE Génie Civil; Juin 2010 ; « Etude de la sensibilité du module des enrobés à module élevé, influence de la teneur en liant, de la compacité et du pourcentage d'agrégats d'enrobé du matériau » ; CETE de l'Est; PP 13.
- [40] NF P 98-251-2 : Essais relatifs aux chaussées« Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés ; Partie 2 : Essai Marshall» Avril 1992.
- [41] NF P 98-251-1 : Essais relatifs aux chaussées « Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés ; Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud» Septembre 2002
- [42] Anouar Abdelaziz ZEMMIRI «Comparaison des formulations d'enrobes à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage» Certificat d'études supérieures - ENTPE de Lyon 2008, 112 p.
- [43] NF EN 12697-22«mélanges bitumineux –méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud –partie22 : Essai d'orniérage» juin 2004.
- [44] NF EN 12697-26 Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 26 : module de rigidité
- [45] NF P98-261-1 Essais relatifs aux chaussées - Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés - Partie 1
- [46] Lefèvre .M « la gestion des déchets en Europe : Notions de Droit Communautaire, Droit Allemand et Droit Français » Séminaire International sur la Gestion Intégrée des Déchets Solides, Recueil des communications, Éditeur GTZ, Alger, 2000.

[47] l'article L541-1-1 du Code de l'environnement.

[48] loi N°: 01-19 du 12/12/2001, relative à la gestion au contrôle et à l'élimination des déchets, journal officiel de la république algérienne démocratique et populaire N° 77 du 15/12/2001.

[49] SPERANDIO K : identification des facteurs mobilisateurs des stratégies de gestion des déchets ménagers mises en œuvre par les collectivités locales, thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2001

[50] lanquetin A-S : "guide pratique de l'entreprise du bâtiment -déchets du bâtiment: quelles solutions dans le val d'Oise?" chambre régionale de métiers de Basse Normandie [en ligne], 20004, disponible sur : <http://www.cm-cergy.fr/dossier /guide. pdf>. 2008

[51] Adem P-C., : "guide de déchets de l'Artisanat ", APCEDE, [en ligne], 2004 disponible sur: <http://www.apcede.com/archisan/dechet>

[52] extrait du registre des délibération de la communauté de communes de la région d'Yvtot -10/04/2013.

[53] Directive n°:1999/31/CE -université doctorale ES-spécilité science de la terre et de l'environnement. .

[54]Guide pratique «un appui technique pour la gestion des déchets de l'industrie de l'ameublement »Edition 2010.

[55] «Guide des déchets des travaux publics» réalisé avec le soutient du conseil Régional du limousine.2012

[56] Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992, RECORD 02-0807/1A - février 2005

[57] RAMACHANDRAN V-S : utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, conseil national de recherches Canada, juin 1981.

[58] Exposé sur gestion et valorisation des déchets 2011.

[59] digeste de la construction au canada division des recherches en construction, conseil national de recherche canada.-et-de-demolition2015.

[60] Hueber D,: "Manuel d'information sur la gestion des déchets solides urbains", editeur GTZ Fmbh, impression en Nakhla, Alger, 2001, P.159

[61] bedjou S., : "contribution à la valorisation des déchets de construction- etude du recyclage des débris de terre cuite", mémoire de magister en génie Civil- ENP d'Alger, 2003.

[62] 1er trimestre 2001 Dossier sur l'environnement 'mens sana in terra sana' ((Le recyclage des plastiques))

- [63] Allal M.A. et Sayagh C, « Recyclage des Déchets de Construction en Voiries IIIème Congrès Algérien de la Route » recueil des communications ,Tome I, ARAL, Alger, 2001, p. 102
- [64] Morsli Meriem, Rahab Khedidja, Bali Abderrahim .Caractérisation D'un Enrobe Bitumineux Recycle ,31émerencontres De L'AUGC.E.N.S.Cachan,29au 31 Mai 2013
- [65] Karam Feth Allah Bendimerad, Abdeldjalil Zadjouli. Contrôle Des Travaux De Revêtement En Béton Bitumineux _A Module _Elevé : Cas De l'Ouest Algérien. Rencontres Universitaires De Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.<Hal-01167622>
- [66] MELBOUCI B. ; SADOON S. and BILEK A. : Study of strengthening of recycled asphalt concrete by plastic aggregates. International Journal of Pavement Research and Technology. Vol 7, N°4, juL.2014. Pp.280-286. ISSN 1997-1400 (on-line) 1996-6814
- [67] Jinal.V.Patel, Dr.H.R.Varia, Prof.C.B.Mishra, Design of Bituminous Mix With and Without Partial Replacement of Waste Ceramic Tiles Material, International Journal of Pavement ISSN/2278-0181 Research and Technology, vol6 issue 04, April-2017
- [68] Cagdas Kara, Murat Karacau, Use of Ceramic Wastes in Road Pavement Design .Proceedings of The World Congress on New Technologies, Barcelona, Spain (july 15-17, 2015). (p. 226)
- [69] Faroudja Meziani, Amar Kahil Et Smail GABI, AMÉLIORATION DE LA RÉSISTANCE MÉCANIQUE DES CHAUSSÉES SOUPLES PAR AJOUT DE GRANULATS DE PNEUS RECYCLÉS, Communication Science & Technologie N° 12, Janvier 2013, Costantine
- [70] Hocine HADIDANE, Hocine OUCIEF , Mouloud MERZOUD, Contribution A l'Amélioration Du Comportement Des Couches d'Assises Par l'Utilisation Des Débris De Démolition, 13th Arab Structural Engineering Conference University Of Blida 1 December 13-15, 2015 ALGERIA
- [71] Fabiana da Conceição Leite, Rosângela dos Santos Motta, Kamilla L. Vasconcelos, Liedi Bernucci, Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements, Construction and Building Materials 25 (2011) 2972–2979, journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat
- [72] Seybatou Diop, Momar Samb, Fary Diome, Meissa Fall, Etude de caractérisation des matériaux de la carrière de Sindia (Sénégal occidental) pour une utilisation en géotechnique routière, **Revue du CAMES** – Sciences Appliquées et de l'Ingénieur , Cames 2014 - Published Online 2014 <http://publication.lecames.org/> Vol. 1(2), pp. 79-85, Online January 2015
- [73] Boudlala Et All, Etude Du Comportement Mécanique D'un Mélange De Granulats Naturels Et Du Verre Pour Une Utilisation Dans La Construction Routière ,22ème Congrès Français De Mécanique Lyon, 24 Au 28 Août 2015

[74] K. ROUABAH ,M.N. GUETTECHE, UTILISATION DES LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX DANS LA CONSTRUCTION DES ROUTES , Sciences & Technologie B – N°27, Juin (2008), 17-24.

[75] William Fedrigoff, Washington Peres Nuñez, Thaís RadunzKleinert, Matheus Ferreira Matuella, Jorge Augusto Pereira Ceratti , Strength, shrinkage, erodibility and capillary flow characteristics of cement-treated recycled pavement materials, , International Journal of Pavement Research and Technology 10 (2017) 393–402

[76] Hassan Ziari a, AlirezaTeymooriBarakoochi b, Ali Moniri b, Laboratory investigation of the effect of temperature on frictional properties of concrete pavements containing crushed glass International Journal of Pavement Research and Technology 10 (2017) 297–303


[77] BourmatteNaadjwa ,Thèse De Doctorat En Science En Génie Civil , Granulats Recycles De Substitution Pour Bétons Hydrauliques , Université De Constantine,2017

[78] MohsenTennich, Mongi Ben Ouezdou, AbderrazekKallel, Effets des déchets de marbre et de carrelage sur les propriétés à l'état durci du béton auto plaçant, ConferencePaper ,2015.

[79]K. GADRI, A. GUETTALA, Etude du comportement physico-mécanique des bétons de sable à base de déchets de polissage de carrelage, HAL Id: hal-01144551 <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01144551>, 2015

Annexe

Annexe A Calculer masse volumique et absorption d'eau des gravillons (Panier triller) de déchet de carrelage

Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville		
Laboratoire National de L'habitat et de la Construction		
Direction Régionale de L'Est, Unité de Skikda		
		
Client :	Feuille d'essai de laboratoire	vérifié Matériel ...
Dossier N°:	Masse volumique et absorption d'eau des gravillons (Panier triller)	Document de référence
Échantillon N° :.....		NF EN 1097-6
Provenance du matériau:		Date de prélèvement:
Classe granulaire d/D 0/5		Date d'essai:
Expression des résultats		
Essai		Résultats
Poids de l'échantillon pour essai (M)	(g)	5000
Poids de l'échantillon + panier dans l'eau (M2)	(g)	4110
Température de l'eau (T)	(C°)	22
Poids du panier remplis d'eau (M3)	(g)	1077
Poids l'échantillon séché en surface (M1)	(g)	5250
Poids de l'échantillon séché à l'étuve (M4)	(g)	4998
Masse volumique de l'eau		1,00
Masse volumique absolue		2,54
Masse volumique réelle		2,25
Masse volumique saturée		2,37
Coefficient d'absorption		5,04
porosité		11,37
Mode opératoire		
<p>- Placer la prise d'essai préparée dans le panier en treillis et immerger le tout dans le récipient rempli d'eau à une température de (22 ± 3) °C, la hauteur de l'eau au dessus du panier étant de 50 mm au moins.</p> <p>- Dès le début de l'immersion, éliminer l'air occlus de la prise d'essai préparée en la soulevant à environ 25 mm au dessus du fond du récipient et en la laissant retomber à 25 reprises, une par seconde, environ.</p> <p>- Laisser le panier contenant les granulats complètement immergé pendant cette opération pendant une période de $(24 \pm 0,5)$ h.</p> <p>- Secouer le panier et son contenu, et les peser dans une eau à une température de (22 ± 3) °C (M2). Enregistrer la température de l'eau lorsque la masse (M2) a été déterminée.</p> <p>- NOTE Si la pesée de la prise d'essai implique son transfert dans un récipient différent, secouer le panier contenant la prise d'essai 25 fois dans le nouveau récipient, comme décrit plus haut, avant de le peser (M2).</p> <p>- Sortir le panier et son contenu de l'eau et les laisser s'égoutter pendant quelques minutes. Verser doucement les granulats du panier sur un chiffon sec. Remettre le panier vide dans l'eau, le secouer 25 fois et le peser dans l'eau (M3).</p> <p>- Sécher doucement la surface des granulats et les transférer sur l'autre chiffon sec, doux et absorbant, quand le premier chiffon n'absorbe plus d'eau. Bien étaler les granulats sur ce chiffon en une couche mono-granulaire et les laisser exposés à l'air libre mais à l'abri des rayons du soleil ou de toute autre source de chaleur jusqu'à ce que les films d'eau visibles aient disparu, les granulats gardant toutefois un aspect humide. Peser les granulats (M1).</p> <p>- Transférer les granulats sur un plateau et le placer dans l'étuve à une température de (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante (M4).</p>		



Ministère de l'habitat, de l'urbanisme et de la ville
Laboratoire National de L'habitat et de la Construction
Direction Régionale de L'Est, Unité de Skikda

Client :	Feuille d'essai de laboratoire	vérifié Matériel ...
Dossier N° :	Masse volumique et absorption d'eau des gravillons (Panier triller)	Document de référence NF EN 1097-6
Échantillon N° :		
Provenance du matériau:	Date de prélèvement:	
Classe granulaire d/D 5	Date d'essai:	

Expression des résultats

Essai	Résultats
Poids de l'échantillon pour essai (M)	(g) 5000
Poids de l'échantillon + panier dans l'eau (M2)	(g) 9413
Température de l'eau (T)	(C°) 22
Poids du panier remplis d'eau (M3)	(g) 6300
Poids l'échantillon séché en surface (M1)	(g) 5371
Poids de l'échantillon séché à l'étuve (M4)	(g) 5000
Masse volumique de l'eau	1,00
Masse volumique absolue	2,65
Masse volumique réelle	2,21
Masse volumique saturée	2,38
Coefficient d'absorption	7,42
porosité	16,43

Mode opératoire

- Placer la prise d'essai préparée dans le panier en treillis et immerger le tout dans le récipient rempli d'eau à une température de (22 ± 3) °C, la hauteur de l'eau au dessus du panier étant de 50 mm au moins.
- Dès le début de l'immersion, éliminer l'air occlus de la prise d'essai préparée en la soulevant à environ 25 mm au dessus du fond du récipient et en la laissant retomber à 25 reprises, une par seconde, environ.
- Laisser le panier contenant les granulats complètement immergé pendant cette opération pendant une période de $(24 \pm 0,5)$ h.
- Secouer le panier et son contenu, et les peser dans une eau à une température de (22 ± 3) °C (M2). Enregistrer la température de l'eau lorsque la masse (M2) a été déterminée.
- **NOTE** Si la pesée de la prise d'essai implique son transfert dans un récipient différent, secouer le panier contenant la prise d'essai 25 fois dans le nouveau récipient, comme décrit plus haut, avant de le peser (M2).
- Sortir le panier et son contenu de l'eau et les laisser s'égoutter pendant quelques minutes. Verser doucement les granulats du panier sur un chiffon sec. Remettre le panier vide dans l'eau, le secouer 25 fois et le peser dans l'eau (M3).
- Sécher doucement la surface des granulats et les transférer sur l'autre chiffon sec, doux et absorbant, quand le premier chiffon n'absorbe plus d'eau. Bien étaler les granulats sur ce chiffon en une couche mono-granulaire et les laisser exposés à l'air libre mais à l'abri des rayons du soleil ou de toute autre source de chaleur jusqu'à ce que les films d'eau visibles aient disparu, les granulats gardant toutefois un aspect humide. Peser les granulats (M1).
- Transférer les granulats sur un plateau et le placer dans l'étuve à une température de (110 ± 5) °C jusqu'à masse constante (M4).

Annexe B Calculer la Formulation bitumineuse et résultats d'essai de performance
La Formulation bitumineuse

$$\Sigma = 8.03 \quad \sqrt[5]{\Sigma} = 1.51 \quad \alpha = 2.65/2.81 = 0.94 \quad K = 2.75$$

$$Tl = \sqrt[5]{\Sigma} * \alpha * K$$

$$TL = 1.51 * 0.94 * 2.75$$

$$Tl = 3.90$$

Résultats d'essai de performance « essai Duriez »

Tableau A. 01 Les résultats d'essai Duriez

M	K	Pb	Pa ₁	Pa ₂	Pa ₃	Pa ₄	Db	Da ₁	Da ₂
0	2,75	3,9	46	12	21	21	1044	2820	2820
10	2,75	3,9	46	12	21	21	1044	2820	2820
20	2,75	3,9	46	12	21	21	1044	2820	2820
30	2,75	3,9	46	12	21	21	1044	2820	2820

Da ₃	Da ₄	mva g	mvr _g	V _m	mv _g /mvr _g	C
2810	2780	2375	2542,57	6,59	93,4094	93,41
2810	2780	2361	2542,57	7,14	92,8588	92,86
2810	2780	2320	2542,57	8,75	91,2462	91,25
2810	2780	2300	2542,57	9,54	90,4596	90,46

R air (mpa)	r eau (mpa)	r/R
12,06	10,50	0,87052239
13,9425	12,40	0,89
10,0415	9,14	0,91
8,58	6,458	0,75

Annexe C Calculer l'écart type

1- Ecart type de rapport r/R

A- Ecart type de 0% (G.O 100% + G.R 0%)

-Calculer la moyenne

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \sum \frac{x}{n} \\ X &= \frac{0.84 + 0.89 + 0.88}{3} \\ &= 0.87 \end{aligned}$$

Tableau B.1 La moyenne de rapport r/R à 0% de D.D.C

r/R	0.84	0.89	0.88
(x - X)	(x - X)	(x - X) ²	(x - X) ²
0.84-0.87	-0.03	(-0.03) ²	0.0009
0.89-.0.87	0.02	(0.02) ²	0.0004
0.88-0.87	0.01	(0.01) ²	0.0001

- Calculer l'écart type

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}} \\ S &= \sqrt{\frac{0.0009 + 0.0004 + 0.0001}{3}} \\ S &= 0.027 \end{aligned}$$

B- Ecart type de 10% (G.O 90% + G.R 10%)

- Calcul la moyenne

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \sum \frac{x}{n} \\ X &= \frac{0.85 + 0.928 + 0.889}{3} \\ &= 0.889 \end{aligned}$$

Tableau B.2 La moyenne de rapport r/R à 10% de D.D.C

r/R	0.85	0.928	0.889
(x - X)	(x - X)	(x - X) ²	(x - X) ²
0.850-0.889	-0,039	(-0.039) ²	0.001521
0.928-0.889	0,039	(0,039) ²	0.001521
0.889-0.889	0	(0) ²	0

- Calculer l'écart type

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}} \\ S &= \sqrt{\frac{0.001521 + 0.001521 + 0}{3}} \\ S &= 0.032 \end{aligned}$$

C- Ecart type de 20% (G.O 80% + G.R 20%)

- Calcul la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{0.99 + 0.83 + 0.91}{3}$$

$$= 0.91$$

Tableau B.3 La moyenne de rapport r/R à 20% de D.D.C

r/R	0.99	0.83	0.91
(x - X)	(x - X)	(x - X) ²	(x - X) ²
0.99-0.91	0.08	(0.08) ²	0.0064
0.83-0.91	- 0,08	(-0,08) ²	0.0064
0.91-0.91	0	(0) ²	0

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.0064 + 0.0064 + 0}{3}}$$

$$S = 0.065$$

D- Ecart type de 30% (G.O 70% + G.R 30%)

- Calcul la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{0.714 + 0.733 + 0.752}{3}$$

$$= 0.733$$

Tableau B.4 La moyenne de rapport r/R à 30% de D.D.C

r/R	0.714	0.733	0.752
(x - X)	(x - X)	(x - X) ²	(x - X) ²
0.714-0.733	-0.0019	(-0.0019)	0.000361
0.733-0.733	0	(0) ²	0
0.752-0.733	0.0019	(0.0019) ²	0.000361

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.000361 + 0.000361 + 0}{3}}$$

$$S = 0.015$$

2- Ecart type de volume des vides

E- Ecart type de 0% (G.O 100% + G.R 0%)

- Calcul la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{5.93 + 6.80 + 6.59}{3}$$

$$= 6.44$$

Tableau B.5 La moyenne de volume des vides à 0% de D.D.C

V%	5.93	6.80	6.59
$(x - X)$	$(x - X)$	$(x - X)^2$	$(x - X)^2$
5.93-6.44	-0.51	$(-0.51)^2$	0.2601
6.8-6.44	0.36	$(0.36)^2$	0.1296
6.59-6.44	0.15	$(0.15)^2$	0.0225

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.2601 + 0.1296 + 0.0225}{3}}$$

$$S = 0.37$$

F- Ecart type de 10% (G.O 90% + G.R 10%)

- Calcul la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{6.97 + 7.83 + 7.14}{3}$$

$$= 7.31$$

Tableau B.6 La moyenne de volume des vides à 10% de D.D.C

V%	6.97	7.83	7.14
$(x - X)$	$(x - X)$	$(x - X)^2$	$(x - X)^2$
6.97-7.31	-0.34	$(-0.34)^2$	0.1156
7.83-7.31	0.52	$(0.52)^2$	0.2704
7.14-7.31	-0.17	$(-0.17)^2$	0.0289

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.1156 + 0.2704 + 0.0289}{3}}$$

$$S = 0.371$$

G- Ecart type de 20% (G.O 80% + G.R 20%)

- Calcul la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{7.94 + 8.92 + 8.75}{3}$$

$$= 8.53$$

Tableau B.7 La moyenne de volume des vides à 20% de D.D.C

$(x - X)$	$(x - X)$	$(x - X)^2$	$(x - X)^2$
7.94-8.53	-0.59	$(-0.59)^2$	0.3481
8.92-8.53	0.39	$(0.39)^2$	0.1521
8.75-8.53	0.22	$(0.22)^2$	0.0484

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.3481 + 0.1521 + 0.0484}{3}}$$

$$S = 0.427$$

H- Ecart type de 30% (G.O 70% + G.R 30%)

- Calcul la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{8.03 + 9.04 + 9.54}{3}$$

$$= 8.87$$

Tableau B8 La moyenne de volume des vides à 30% de D.D.C

V%	8.03	9.04	9.54
$(x - X)$	$(x - X)$	$(x - X)^2$	$(x - X)^2$
8.03-8.87	-0.84	$(-0.84)^2$	0.7056
9.04-8.87	0.17	$(0.17)^2$	0.0289
9.54-8.87	0.67	$(0.64)^2$	0.4489

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$S = \sqrt{\frac{0.7056 + 0.0289 + 0.4489}{3}}$$

$$S = 0.62$$

3- Ecart type de Compression

- Calculer la moyenne

$$\bar{X} = \sum \frac{x}{n}$$

$$X = \frac{9.95 + 11.047 + 12.395}{3}$$

$$r = 11.13$$

$$X = \frac{11.72 + 12.4 + 13.942}{3}$$

$$R = 12.68$$

Tableau B.9 La moyenne de compression à 0% de D.D.C

r	9.95	11.047	12.395
R	11.72	12.4	13.942
	$(x - X)$	$(x - X)^2$	$(x - X)^2$
r	9.95-11.13	$(-1.18)^2$	1.3924
	11.047-11.13	$(-0.083)^2$	0.006889
	12.395-11.13	$(1.265)^2$	1.600225
R	11.72-12.68	$(-0.96)^2$	0.9216
	12.4-12.68	$(-0.28)^2$	0.0784
	13.942-12.68	$(1.262)^2$	1.592644

- Calculer l'écart type

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - X)^2}{n}}$$

$$Sr = \sqrt{\frac{1.3924 + 0.006889 + 1.600225}{3}}$$

$$Sr = 0.99$$

$$SR = \sqrt{\frac{0.9216 + 0.0784 + 1.592644}{3}}$$

$$SR = 0.99$$

Annexe D Les photos d'essai Proctor et l'essai Duriez



Photo C.1 Essai de granulométrie

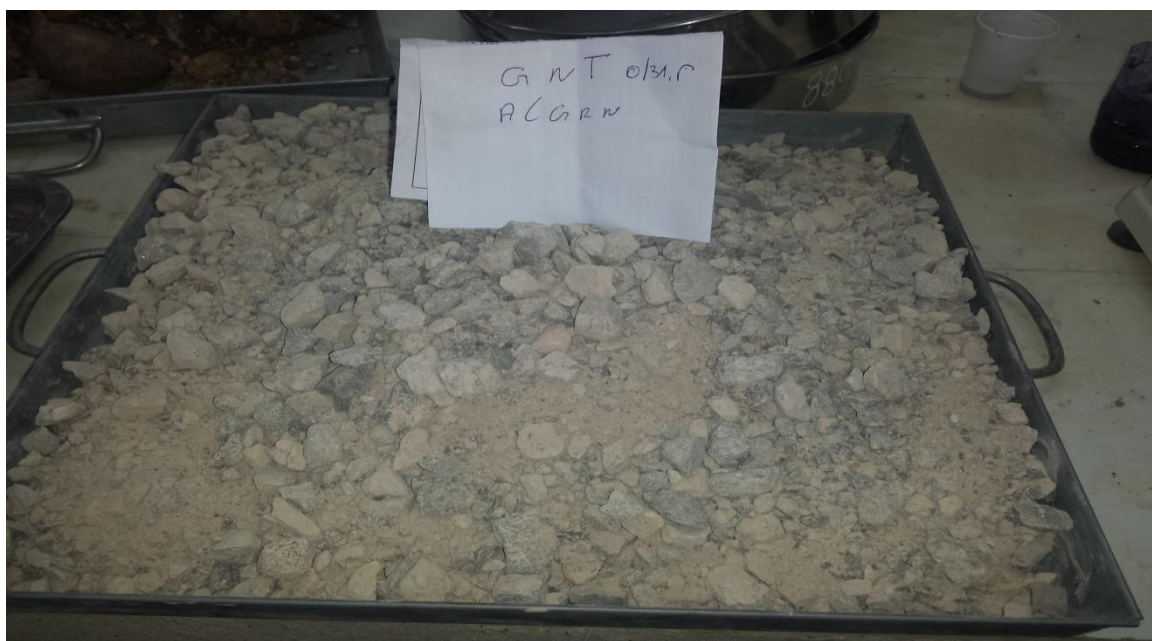


Photo C.2 Granulats GNT 0/31.5 pour faire l'essai Proctor

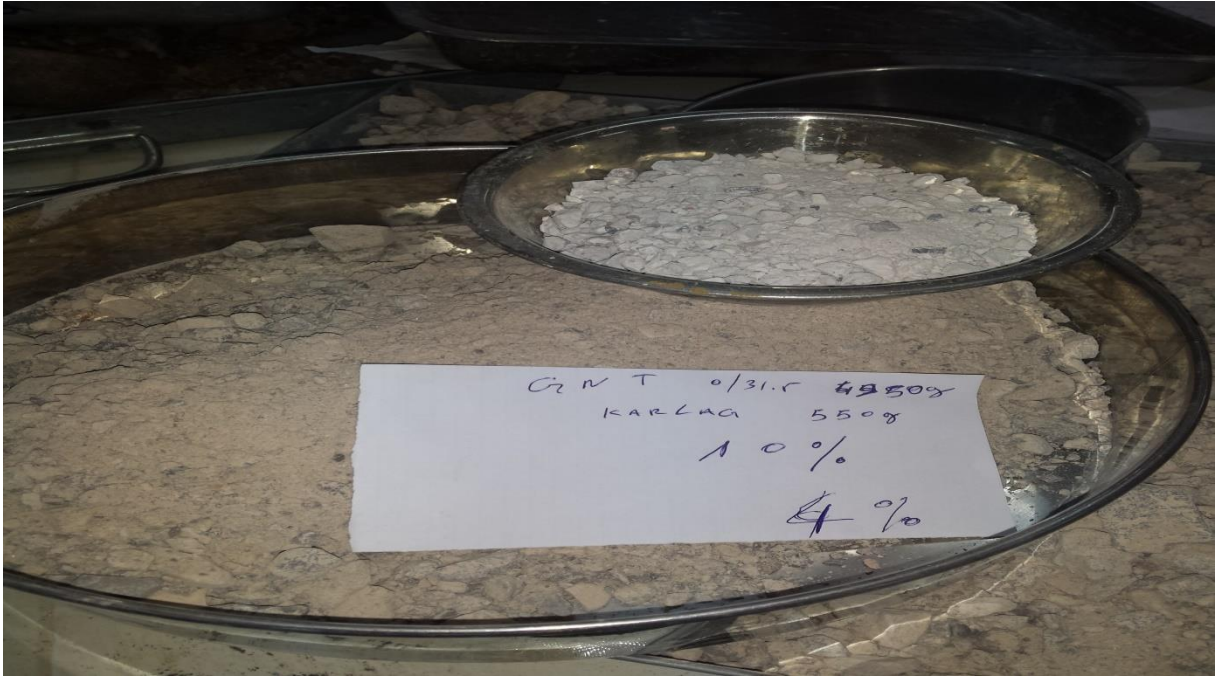


Photo c.3 Granulats GNT 0/31.5 DE 10% D.D.C.

Les photos d'essai Duriez



Photo c.4 mélange des G.O et G.R



Photo C.5 éprouvette à l'air de l'essai de duriez



photoC.6 éprouvette à l'eau de l'essai duriez