

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériau de construction

Présenté par : SIDIBE AISSATA

ET

HAMADI HOUSSAM

**Thème : AMELIORATION DU BETON BITUMINEUX
PAR DES POLYMERES ISSUS DU RECYCLAGE**

Sous la direction de : Pr NAFA ZAHREDDINE

Septembre 2020

Remerciements

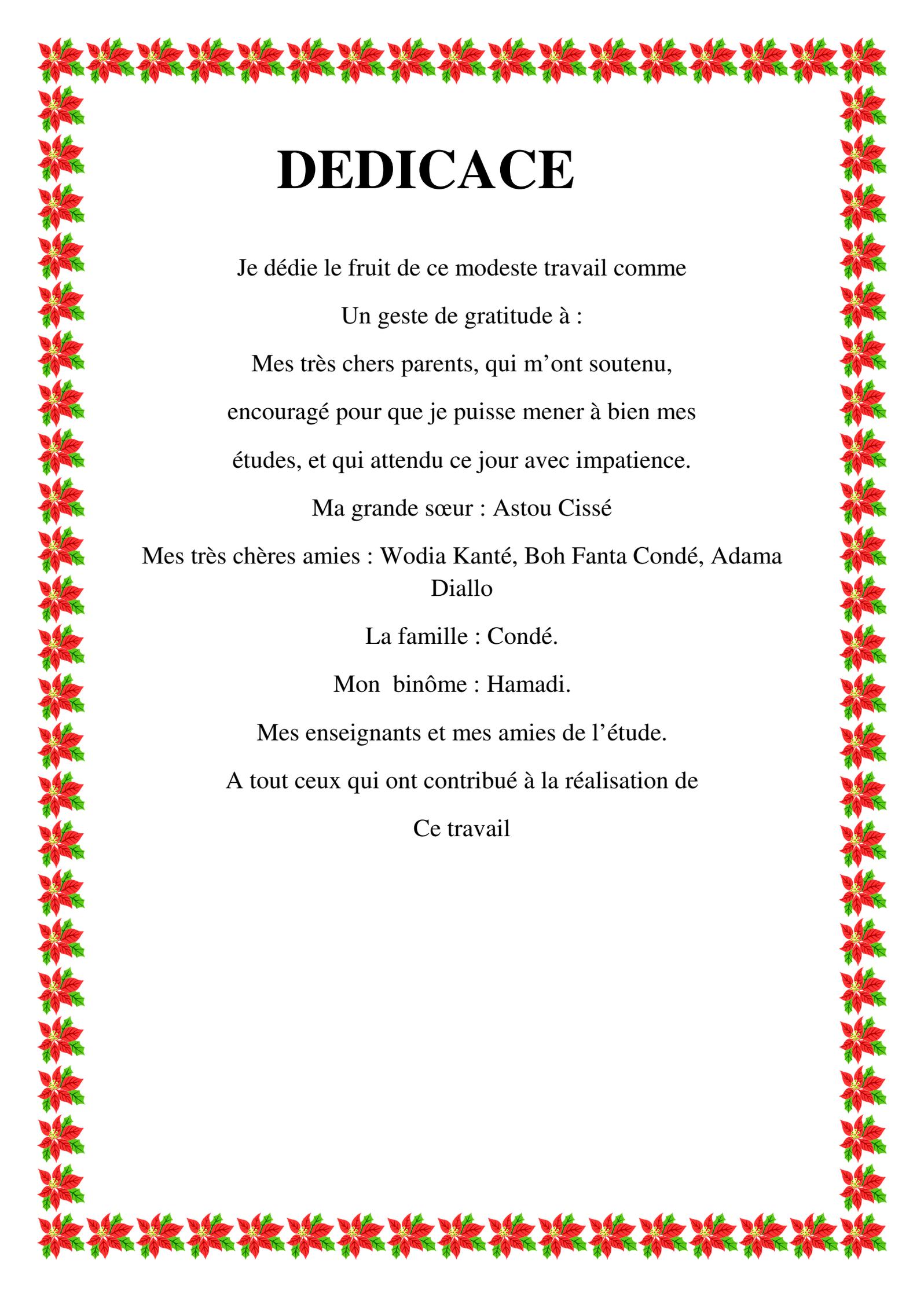
Tous d'abord, Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de bien mener ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Pr Nafa Zahreddine qui a été notre encadreur et qui nous a beaucoup aidé pour l'élaboration de ce mémoire, ses aides précieuses, son conseil, son soutien et pour tous ses efforts.

Nous tenons aussi à remercier le Doctorant Mr Zaimia Youssef Khalil qui nous a aidé dans la partie expérimentale de notre travail.

Nous remercions également tous nos enseignants pour nous avoir donné de la connaissance.

Merci à tous



DEDICACE

Je dédie le fruit de ce modeste travail comme

Un geste de gratitude à :

Mes très chers parents, qui m'ont soutenu,
encouragé pour que je puisse mener à bien mes
études, et qui attendu ce jour avec impatience.

Ma grande sœur : Astou Cissé

Mes très chères amies : Wodia Kanté, Boh Fanta Condé, Adama
Diallo

La famille : Condé.

Mon binôme : Hamadi.

Mes enseignants et mes amies de l'étude.

A tout ceux qui ont contribué à la réalisation de
Ce travail

Résumé

Le but de ce travail est le renforcement de l'enrobé bitumineux par des fibres de polymère (PET : Polyéthylène téréphtalate), issues des recyclages des bouteilles.

L'utilisation des fibres améliore le comportement du béton bitumineux. Cette amélioration se traduit par :

- Une augmentation de la stabilité, la compacité, et le quotient Marshall,
- Une diminution du fluage Marshall,
- Une augmentation de la résistance à la traction indirecte

En plus de l'amélioration des caractéristiques des enrobés bitumineux qui se répercutera sur la durabilité des structures bitumineuses, l'environnement sera ainsi préservé de la pollution des bouteilles d'eau.

Mots Clés : Bitume, enrobé bitumineux, granulats, fibre de polymère, fibres PET, Essais Marshall.

Abstract

The aim of this work is to reinforce the bituminous mix with polymer fibers (PET: Polyethylene terephthalate), resulting from the recycling of bottles.

The use of fibers improves the behavior of asphalt concrete. This improvement results in:

- ❖ An increase in stability, compactness, and the Marshall quotient,
- ❖ A reduction in Marshall creep,
- ❖ An increase in indirect tensile strength

In addition to improving the characteristics of asphalt mixes which will affect the durability of bituminous structures, the environment will thus be preserved from pollution from water bottles.

Key words: Bitumen, bituminous mix, aggregates, polymer fiber, PET fibers, Marshall Test.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقوية المزيج الاسفلتي بألياف البوليمر (PET: البولي إيثيلين تيريفثاليت) الناتجة عن إعادة تدوير الزجاجات.

يحسن استخدام الألياف سلوك الخرسانة الإسفلتية . ينتج عن هذا التحسين:

زيادة الاستقرار والاكتناز وحاصل مارشال ،
? انخفاض في سيولة مارشال ،
زيادة مقاومة الشد غير المباشر
بالإضافة إلى تحسين خصائص خلائط الأسفلت ، والتي ستؤثر على متانة الهياكل
البيتومينية ، سيتم الحفاظ على البيئة من التلوث الناتج عن زجاجات المياه.

الكلمات المفتاحية: البيتومين ، خليط البيتومين ، الحصى ، ألياف البوليمر PET ، إختبار مارشال

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre I : Etude bibliographique

CHAPITRE I : L'étude Bibliographique du Béton Bitumineux	2
I-1 Introductions	2
I-2 Généralités Sur les Routes	2
I-2-1 Les Différentes couches des Chaussés	2
I-3 Les bétons bitumineux	3
I-3-1 Granulat	3
I-3-2 Types des granulats et leur classification	3
I-3-3 Généralités sur les granulats routiers :	4
I-3-4 Liant	5
I-3-5 Les Différents Types de Liants	6
I-3-4 Liants hydrocarbonés	6
I-4-1 Les différente types des produits noirs :	6
I-4-2 La Différence entre le Goudron et le Bitume :	7
I-5 Définition du Bitume.....	7
I-5-1 Historique	7
I-5-2 Composition du bitume:	8
I-5-4 Origine du bitume	8
I-6 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume :	11
I-6-1 Essais de caractérisation des bitumes :	11
I-7 Classification	12
I-7-1 Bitume naturel.....	13
I-7-2 Bitumes artificiels : productions industrielles	13
I-8 Propriétés physico-chimiques	14
I-9 Les types de béton bitumineux	15
I-10 Familles d'enrobés bitumineux	16
I-10-1 Produits chauds	17
I-10-2 Produits froids.....	17
I-10-3 Produits tièdes	17
I-11 Formulation Des Bétons Bitumineux	18
I-11-1 Paramètres Influençant Le Choix D'une Formulation	18
I-12 Effet de la température	19

I-14 Propriétés Mécaniques Des Enrobe Bitumineux	20
I-14-1 Essai Marshall (EN 12697-34)	26
I-14-2 Essai Duriez (NF P9-251-1).....	27
I-15 Fabrication	28
I-16 Transport et stockage	29
I-17 Application	30
I-18 L'entretien du béton bitumineux	32
I-19 Le prix du béton bitumineux	32
Conclusion	32

Chapitre II L'utilisation Des Fibres Dans Le Béton Bitumineux

II -1- Les Fibres Dans Le Béton	33
II-2 RÔLE DES FIBRES	33
II-3 REVUE DES LITTÉRATURES.....	34
II-4 DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES POUR LES BÉTONS	35
II-5 Variétés de géo-grilles et leurs propriétés	37
Produits pour le renforcement du béton bitumineux	37
II-6 Géo-grilles en polymère	38
II-7 La production	38
II-8 L'utilisation	38
II-10 Fibres métalliques	41
II-11 Les inconvénients des fibres	43
CONCLUSION	43

Chapitre III L'utilisation De Fibre de Polymère Dans L'enrobe Bitumineux

III-1 Objectif de la modification	44
III-2 Les différents agents modifiants	44
III -3 Principaux polymères utilisés en génie civil	45
III-4-. Bitume modifié	45
III-5 Fibres de polyester.....	46
III-6 Définition du PET	46

Chapitre IV : Parti expérimentale

IV-1 Etude des granulats :	49
IV-1-1 Analyse granulométrique :	49
IV-1-2 Les caractéristiques intrinsèques et de fabrication :	49
IV-2 Le Bitume :	50
VI-3 Enrobé bitumineux :	51
VI-3-1 Etude de formulation de l'enrobé :	51
VI-3-2 Détermination du teneur en liant :	52
VI-3-3 Mode de fabrication des éprouvettes :	53
IV-4 Essais mécaniques sur l'enrobé :	55
IV-4-1 Essai Marshall :	55

Listes des figures
Chapitre I : Etude bibliographique

Figure I-2: Composition de béton bitumineux	3
Figure I-3: Gisement et carrière de la production des agrégats.	4
Figure I-4: Les deux familles de granulats	5
Figure I-5 : Concasseur,	6
Figure I-6: Types de Liants hydrocarbonés	7
Figure I-7: Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles	8
Figure I-8. Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.....	11
Figure I-9 : Principe de l'essai de pénétrabilité.	12
Figure I-10 : Principe de ramollissement.	13
Figure I-11 : Morceaux de bitume provenant d'un gisement naturel en bordure de la mer Morte.	14
Figure I-12:Quelques-uns des 14 169 fûts de bitume de Trinidad débarqués à Brisbane (Australie) par le navire Larchbank, en 1938.	15
Figure I-13 :Nids-de-poule rebouchés à l'aide d'enrobé à froid.	18
Figure I-14 : Schématisation des sollicitations induites par la température.....	21
Figure I-15 : Fissures transversales	21
Figure I-16 : Fissures de gel	22
Figure I-18: Déformation de la surface (Ornière à grand rayon)	24
Figure I-19: Machine d'essai Marshall	26
Figure I-20: Machine d'essai Duriez	26
Figure I-21 : Le processus de fabrication d'enrobé	27
Figure I-22 : Une usine de fabrication d'asphalte.	28
Figure I-24 : calorifugeage	29
Figure I-25 : Optimisation Finisseur et Compacteurs - solutions Trimble.....	30
Figure I-26: Un finisseur en cours d'application, on remarque le camion vidant sa benne d'enrobé dans la trémie.....	30

Chapitre II

Figure II-1 : Propagation d'une fissure dans un matériau en état de service (Beddar, 2007).....	33
Figure II-2 Des fibres de verre pour renforcer la chaussée	36
Figure II-3 de Géo-grille	37
Figure II-4 Géo-grille en polymère	38
Figure II-5 Géo- grille routier.....	40
Figure II-6 Caractéristiques et géométrie de la géo-grille CIDEX 100 SB de 6D Solutions [ARS11].....	40
Figure II-8 Photos de différentes fibres métalliques pour bétons (CT 2014). [10]	43
Figure II-9 la grille métallique.....	43

Chapitre III

Figure III-1 les thermodurcissables.....	44
Figure III-2 thermoplastiques.....	45
Figure III-3 Poudre de caoutchouc.....	45
Figure III-4 Poly téréphtalate d'éthylène fig III-5 Fibre de bouteille de PET.....	47
Figure IV-1 : Principe de l'essai de pénétration d'un bitume.....	51
Figure IV-2 :L'appareil de pénétrabilité.....	51

Figure IV-3 : La courbe corrigée.....	52
Figure IV-4 : Matériels utilisés pour fabrication les éprouvettes.....	54
Figure IV-5 : Pied à coulisse.....	54
Figure IV-6 : Presse d'écrasement Bain thermique.....	55

Liste des tableaux

Tableau I-4 : L'avantage et inconvénient	32
Tableau I-2: Fractions granulaires 0/14 des BB [2]	20
Tableau I-1 Essai de qualification des bitumes	11
Tableau II-1: Compositions des fibres de verre (BEDDAR 2007).	36
Tableau II-3 Différentes formes des fibres d'acier (BEDDAR 2007).....	41
Tableau II-2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier (BEDDAR 2007)	41
Tableau IV-1 Sable et gravier	48
Tableau IV-2 Caractéristiques des granulats	49
Tableau IV-3 le résultat de l'essai.....	50
Tableau IV-4 les résultats corrigé d'analyse granulométrie	51
Tableau IV-5 les résultats	53
Tableau IV-6 de l'essai de Marshall	54

INTRODUCTION GENERALE

Le trafic routier en Algérie est de plus en plus important, ceci ajouté aux températures élevées sont à l'origine des pathologies observées sur les couches supérieures de la chaussée sur nos routes. Essayer d'améliorer la durée de vie de la couche de roulement n'a cessé de préoccuper les chercheurs en Algérie et de part le monde, plusieurs solutions sont proposées ici et là en utilisant tantôt des aditions au bitumes tantôt en jouant sur la formulation du béton bitumineux.

Le travail qui nous a été proposé dans le cadre de notre projet de fin d'étude de master rentre dans le cadre d'un thème de recherche sur lequel travaille l'équipe "matériaux" du laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma et qui vise à améliorer la résistance mécanique des revêtements routiers par ajout de fibres polyester provenant de bouteilles de plastique recyclés.

L'objectif est double alors, d'un coté améliorer les performances du béton bitumineux et d'un autre coté participer à l'action écologique du recyclage des résidus domestiques en occurrence les bouteilles de plastique.

Le mémoire est divisé en deux parties, la première est une revue bibliographique sur le béton bitumineux en général et de l'utilisation des fibres en vue de l'amélioration des performances du béton bitumineux. elle est divisées en trois chapitres.

Dans la deuxième partie, on a essayer de présenter le début de la partie expérimentale qui a été malheureusement fortement perturbée par les mesures prises par l'administration de l'université en réaction à la propagation de la pandémie covid 19.

Le mémoire est clôturé par une conclusion générale ainsi qu'un recueil des références bibliographiques utilisées dans cette étude.

CHAPITRE I : L'étude Bibliographique du Béton Bitumineux

I-1 Introductions :

Le bitume est un matériau présent naturellement dans l'environnement ou pouvant être fabriqué industriellement après distillation de certains pétroles bruts. Il est composé d'un mélange d'hydrocarbures, peut se trouver à l'état liquide ou solide, et a une couleur brunâtre à noirâtre. Le bitume est liquéfiable à chaud et adhère aux supports sur lesquels on l'applique. Il possède un certain nombre de qualités physico-chimiques dont l'Homme a su faire usage depuis la Préhistoire. Dans le langage courant, on le confond souvent avec la poix, le goudron d'origine houillère, ou l'asphalte routier dont il n'est qu'un composant. [1]

La chaussée est la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules Elle assure les déplacements des usagers et le transport des marchandises. Une chaussée est constituée d'une superposition de couches de matériaux différents dont l'ensemble est appelé superstructure et reposant sur une infrastructure. Dans l'infrastructure nous avons le sol de plate-forme et une couche de forme en cas de remblai; pour la superstructure nous avons la couche de fondation, la couche de base et la couche de surface ou le revêtement [2]

I-2 Généralités Sur les Routes :

Définition de la route « Le mot route vient du mot latin « via rupta » qui signifie « voie frayée » c'est donc une voie de communication terrestre permettant de relier un point à une autre, un village à un autre, etc.1 Nous allons également définir la route moderne comme étant « un espace correctement aménagé pour recevoir un ou plusieurs courants de circulation construite dans le respect des règles d'art »[3]

I-2-1 Les Différentes couches des Chaussés :

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

L'objectif des différentes couches étant de permettre au sol support de résister aux contraintes liées à la circulation, en fonction de sa portance et des charges auquel on va le soumettre.

Chaque couche doit pouvoir supporter les charges de couches supérieures et être suffisamment compactée pour permettre un effet d'enclume lors du compactage. [3]

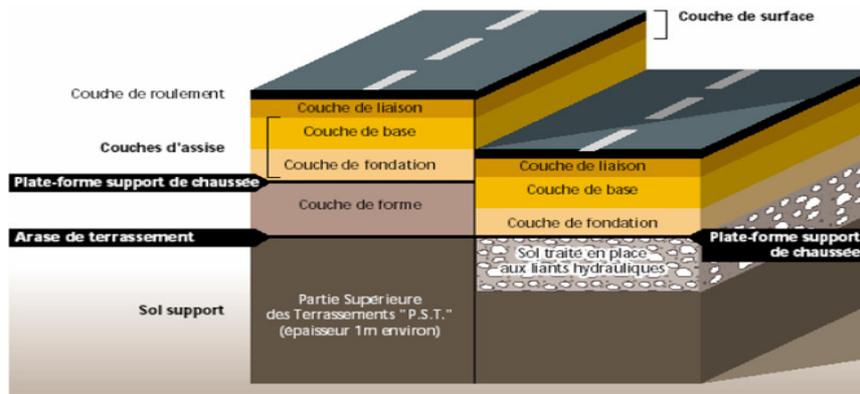


Figure I-1 Les couches du chaussés [3]

I-3 Les bétons bitumineux :

Béton bitumineux est un enrobé riche en bitume constitué d'un mélange de granulats (sable, gravier et fines), 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. Le béton bitumineux est composé de différents éléments : [2]

- Gravillons.
- Sable.
- Filer. - bitume utilisé comme liant.

Le béton bitumineux crée généralement la couche supérieure des chaussées appelée couche de surface. [2]

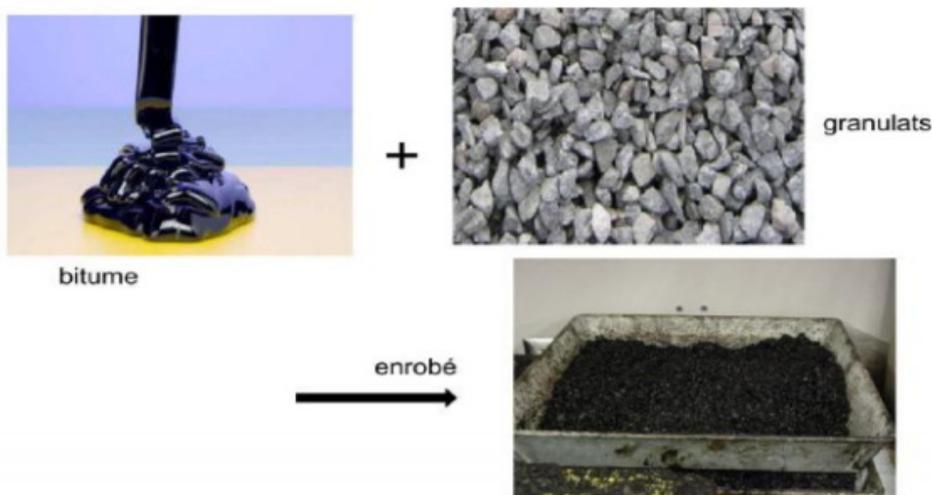


Figure I-2: Composition de béton bitumineux [2]

I-3-1 Granulat :

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire. [2]

Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat.

L'intégration des granulats dans le mélange bitumineux nécessite de connaître différentes caractéristiques :

- Celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs).
- Celles 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. [2]



Figure I-3: Gisement et carrière de la production des agrégats. [2]

I-3-2 Types des granulats et leur classification

Les granulats utilisés pour composer un béton sont soit d'origine naturelle ou artificielle [2]

- Granulats Naturels :

Les granulats naturels d'origine minérale sont issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). Ceux issus des gisements alluvionnaires, dits roulés, dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière ou en mer éventuellement. [2]

Géologiquement parlant, les granulats naturels sont de nature :

- ❖ Éruptives : granites, basaltes porphyres.
- ❖ Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites.
- ❖ Métamorphiques : gneiss, amphibolites.
- ❖ Granulats Artificiels :

Les granulats artificiels sont soit des sous-produits de l'industrie sidérurgique, soit fabriqués en vue d'obtenir un produit particulier. Ils proviennent de la transformation à la fois

thermique et mécanique des roches ou des minerais. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé, obtenu par refroidissement lent à l'air ; le laitier granulé de haut fourneau, obtenu par refroidissement rapide dans l'eau et les granulats allégés par expansion ou frittage (l'argile ou le schiste expansés). Les granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usage spécifique. [2]

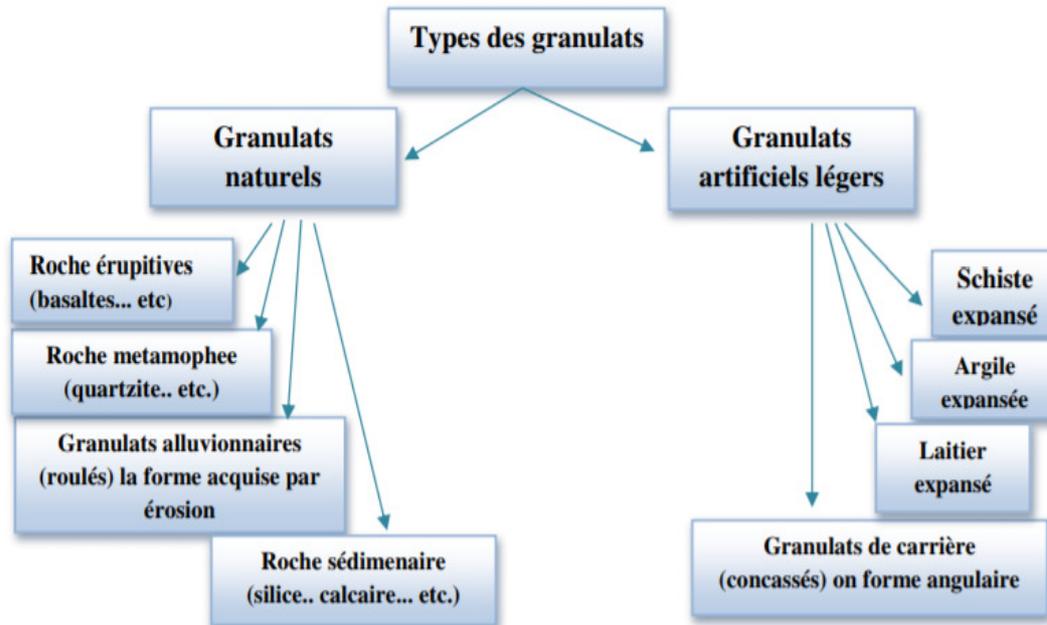


Figure I-4: Les deux familles de granulats [2]

I-3-3 Généralités sur les granulats routiers :

D'une manière générale, les granulats destinés à la fabrication des bétons bitumineux peuvent avoir des origines différentes :

- Carrières de roches massives.
- Carrières de matériaux alluvionnaires (ballastières). [2]

La fabrication des granulats est assurée par des installations de concassage-criblage dont la taille et la nature des différents composants varient selon l'importance des chantiers et la nature des matériaux bruts à traiter. [2]

Les équipements standards communs à toutes les installations de concassage-criblage sont :



Figure I-5 : Concasseur, [4]

- Trémies d'alimentation et trémies tampon.
- Concasseurs primaires à mâchoires.
- Des concasseurs giratoires à cône (secondaire ou tertiaire).
- Des cribles vibrants.
- Des convoyeurs ou sauterelles.

L'assemblage et le nombre de ces différents équipements est défini par la nature et les caractéristiques des granulats à produire, la nature du matériau brut à traiter. Les stations de concassage-criblage sont souvent caractérisées par leur capacité de Production exprimée en Tonne/heure, toutes catégories confondues. [2]

I-3-4 Liant :

Un **liant** est un produit qui sert à agglomérer en masse solide des particules solides sous forme de poudre ou de granulats (appelés aussi agrégats ; dans le cas des peintures et mastics, on parle de charges).

Les liants rentrent dans la fabrication des peintures, des colles, des constructions, etc. [5]

I-3-5 Les Différents Types de Liants :

Selon leur composition, les liants peuvent être classés en deux grandes familles : les liants minéraux et les liants organiques.

- les liants minéraux : selon leur mode de durcissement, ils peuvent être classés en deux sous-familles :
 - les liants aériens : durcissement à l'air dû à une réaction de carbonatation : chaux aériennes, argiles ;
 - les liants hydrauliques : durcissement en milieu humide ou dans l'eau dû à une réaction d'hydratation de silicates ou d'aluminates : chaux hydrauliques, ciments (ciment prompt, ciment Portland, ciment alumineux), plâtres, laitiers.

- les liants organiques :
 - les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ;
 - les résines et surtout polymères : les aminoplastes, par exemple, sont des polymères largement utilisés dans l'industrie du bois et de ses dérivés. [3]

Dans notre cas nous allons utiliser les hydrocarbonés

I-3-4 Liants hydrocarbonés :

Les liants hydrocarbonés est d'une manière générale un matériau adhésif (un liant) contenant du bitume, du goudron ou les deux, cet élément agrégé avec des granulats fournit des « matériaux enrobé », la masse volumique du bitume est prise égale à 1.03 t/m³, qui jouent également un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps. On distingue trois familles de liants hydrocarbonés: [2]

I-4-1 Les différents types des produits noirs :

Les goudrons : Ils proviennent de la distillation rapide (1100c°) ou lente (800c°) de diverses variétés de la houille de charbon. C'est un liquide noir brillant plus ou moins visqueux de densité supérieure à 1. Il faut 20 tonnes de houilles pour donner une tonne de goudrons brute. Les goudrons ne sont plus utilisés fréquemment, mais ils le sont en Grande Bretagne où la houille demeure encore une source majeure de ce liant. [6]

Les Bitumes : La plus grosse source de bitumes est actuellement la distillation directe suivie ou non d'un léger soufflage, de pétrole brute d'origine très diverses dont ils constituent la fraction la plus lourde le bitume, qui se présente sous l'aspect d'un corps de couleur noir, composé d'hydrocarbures saturés de poids moléculaire élevé [6]

I-4-2 La Différence entre le Goudron et le Bitume :

Les principales différences entre le goudron et le bitume sont :

- a) Leur constitution chimique : le bitume comprend surtout des hydrocarbures saturés, alors que les goudrons certains surtout des hydrocarbures non saturés.
- b) Les bitumes vieillissent plus vite que les goudrons.
- c) Les bitumes sont plus adhérents que les goudrons et plus stables. [6]

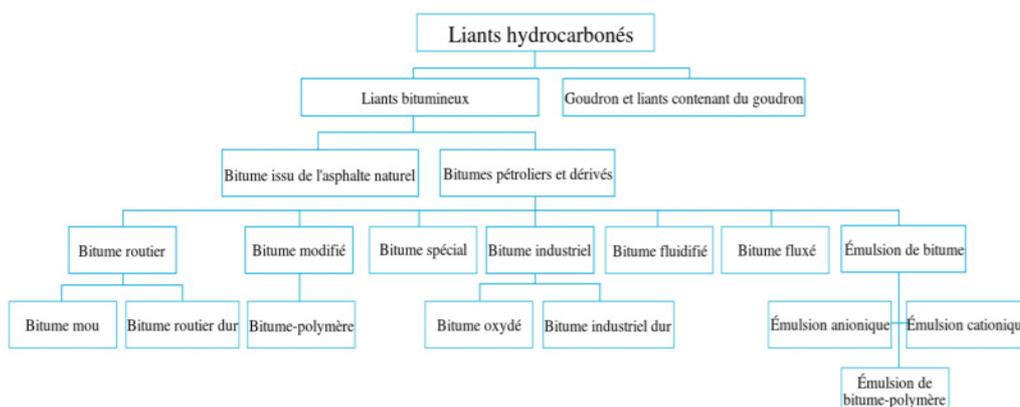


Figure I-6: Types de Liants hydrocarbonés [2]

I-5 Définition du Bitume :

Les bitumes sont des sous-produits d'hydrocarbures lourds, résidus noirs de pétrole brut obtenus soit par distillation naturelle, soit par distillation en raffinerie. Les bitumes de distillation directe sont utilisés pour la confection d'enrobés à chaud. [2]

I-5-1 Historique :

On distinguera, très schématiquement, les périodes suivantes :

- De 1900 à 1930 : Goudron de houille.
- De 1930 à 1950 : Emulsions de bitumes.
- Les années 70 : les bitumes polymères.
- Les années 80 : les liants modifiés et les additifs.
- Les années 90 : les bitumes spéciaux.

I-5-2 Composition du bitume:

A température ordinaire, les bitumes se présentent comme des corps visqueux ou des solides susceptibles de fluer sous leurs poids propre. [2]

La séparation du bitume par solvant permet de séparer les bitumes en asphaltènes et en maltènes: les asphaltènes représentent 10 à 30% des bitumes, ils constituent la partie insoluble des bitumes dans les solvants de type n-alcanes et se présentent sous la forme d'un solide dur friable, brun-noir qui contribue largement à la couleur noir du bitume. Les maltènes, partie soluble correspondent à l'association des résines et des huiles; les résines ont un rôle essentiel vis-à-vis la stabilité colloïdale du bitume, les huiles représentent 40% à 60% du bitume. [2]

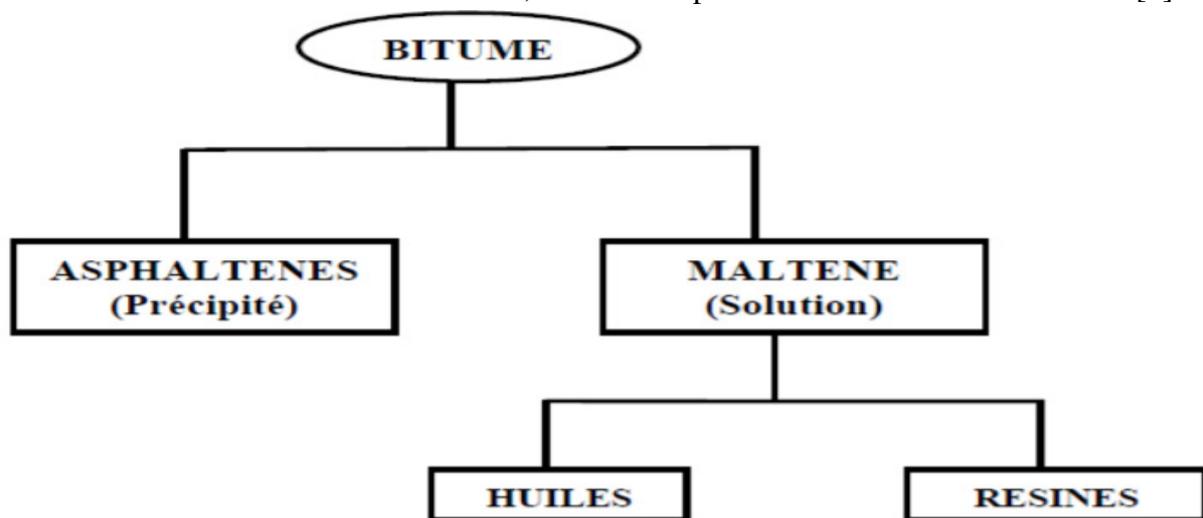


Figure I-7: Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles [2]

I-5-3 Différents types de bitume :

Le bitume utilisé dans les enrobés confère des propriétés viscoélastiques aux revêtements de chaussées. Un bitume ayant les caractéristiques appropriées assure des performances élevées sur le plan de la résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration de fatigue et l'arrachement.

Ses caractéristiques contribuent à la réalisation de revêtements sécuritaires, durables et économiques.

On rencontre les types suivants de liants à base de bitume :

- Les bitumes purs

Ils sont obtenus par raffinage de bruts pétroliers et ne comportent aucun ajout.

D'après leur mode de fabrication, on peut obtenir des bitumes dont la consistance est variable.

Les conditions climatiques et le type de projet déterminent le choix du type approprié. On distingue ainsi cinq principaux types de bitume allant du plus dur aux plus mous identifiés par les classes : 20/30 ; 35/50 ; 50/70 ; 70/100 et 180/220.

- Les cut-backs

Ce sont des bitumes fluidifiés obtenus par un mélange de bitume pur soit avec des fractions légères de distillation du pétrole telles que le kérosène, soit avec des huiles légères provenant de la distillation de la houille afin de réduire leur viscosité. À leur exposition aux conditions atmosphériques, les solvants s'évaporent et laissent le bitume semi-dur remplir sa fonction. On utilise les cut-backs pour des enrobés pour couches de scellement et couches d'accrochage.

On distingue ainsi :

- Les cut-backs à prise rapide (RC) : Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de haute volatilité comme l'huile de naphte ou de gazoline.
- Les cut-backs à prise moyenne (MC) : Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de volatilité moyenne comme le kérosène.
- Les cut-backs à prise lente (SC) : Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'huiles de volatilité lente.

- Les bitumes fluxés

Ce sont des bitumes purs dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant de la distillation du pétrole pour au moins cinquante pour cent des ajouts, et de la distillation de goudron de houille.

- Les bitumes composés

Mélanges comportant au moins cinquante pour cent de bitume pur.

On utilise comme additifs du brai de houille ou du goudron de houille.

- Les bitumes modifiés

Ce sont des bitumes composés avec ajout de substances; le plus souvent macromoléculaires autres que les fines minérales ou additifs d'adhésivité.

- Les émulsions de bitume

Les émulsions de bitume sont des dispersions de fines particules de bitume dans l'eau au moyen généralement d'un agent émulsif qui est un type de savon résineux qui stabilise le produit.

L'une des particularités des émulsions est qu'ils éliminent les dangers d'incendie et l'effet toxique ; ce qui n'est pas le cas pour les cut-backs.

On distingue également plusieurs types d'émulsions suivant la teneur en agent émulsif :

- Les émulsions à prise rapide (RS).
- Les émulsions à prise moyenne (MS).
- Les émulsions à prise lente. [2]

Quant aux bitumes préparés industriellement, ils sont réalisés à base de trois sortes de pétrole :

- les pétroles paraffiniques (Pennsylvanie, Galicie, Canada, Ohio) qui ne tiennent pas de bitume à l'état naturel mais peuvent en donner par transformations se produisant en cours de distillation;
- les pétroles paraffiniques (Bakou, Californie, Venezuela) qui sont exempts de paraffines dures et qui contiennent beaucoup de bitume obtenu comme résidu de distillation;
- les pétroles asphaltes-paraffiniques (Illinois, Mexique, Texas, Roumanie) qui donnent des bitumes mais ayant une teneur en paraffine dure plus ou moins forte, qu'il convient d'éliminer car les paraffines en excès nuisent aux qualités de cohésion et d'adhésivité des bitumes. La préparation industrielle des bitumes asphaltiques ou brais de pétrole comprend trois opérations principales :
 - la déshydratation des pétroles (séparation de l'eau libre ou émulsionnée) ;
 - la distillation fractionnée, séparant les composants du pétrole brut en plusieurs groupes homogènes;

Le raffinage, destiné à purifier certains des produits de distillation. A ces procédés se rattachent un certain nombre d'opérations à savoir : la réfrigération, la filtration, le cracking, l'hydrogénation, la polymérisation, le soufflage [2]

Tableau I-1 Essai de qualification des bitumes

Type de bitume	norme	Nature de l'essai de qualification	nb	Classes
Bitumes purs	NF EN 12591 ²	Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C	9	20-30 ; 30-45 ; 35-50 ; 40-60 ; 50-70 ; 70-100 ; 100-150 ; 160-220 ; 250-330
		Pénétrabilité à l'aiguille à 15°C	4	250/330 ; 330/430 ; 500/650 ; 650/900
		Viscosité cinématique à 60°C	4	V1500 ; V3000 ; V6000 ; V12000
Bitumes routiers durs	NF EN 13924 ⁵	Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C	2	10/20 ; 15/25
Bitumes industriels durs	NF EN 13305 ⁵	Point de ramollissement bille et anneau	5	H80/90 ; H85/95 ; H90/100 ; H100/110 ; H155/165
Bitumes oxydés	NF EN 13304 ⁵	Point de ramollissement bille et anneau	8	85/25 ; 85/40 ; 95/25 ; 95 /35 ; 100/40 ; 105/35 ; 110/30 ; 115/15
Bitumes fluidifiés	XP T 65-002 ⁵	Pseudo-viscosité 25°C	5	0-1 10-15 ; 150-250 ; 400-600 ; 800-1400
Bitumes fluxés	XP T 65-003 ⁵	Pseudo-viscosité 25°C	6	0-1 10-15 ; 150-250 ; 400-800 ; 800-1600 ; 1600-3200
Bitumes modifiés	NF EN 14023 ⁶	Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C	10	10-40 ; 25-55 ; 45-80 ; 40-100 ; 65-105 ; 75-130 ; 90-150 ; 120-200 ; 200-300

I-5-4 Origine du bitume :

Tous les bitumes sont des produits du pétrole brut où ils se trouvent

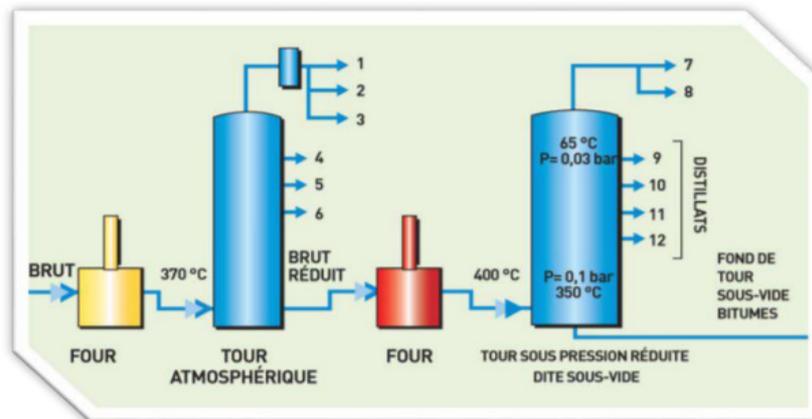
En solution.

Ils sont le résultat de l'élimination des huiles servant de solvant par évaporation ou distillation du pétrole brut. Sachant que de tels processus pourraient se produire dans la nature, au niveau des couches souterraines, les bitumes proviennent en conséquence de deux sources : naturelle ou industrielle. [2]

- - Origine naturelle: La production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 milles tonnes.
- - Origine industrielle.
- Ce dernier compose deux parties :
- - **Distillation direct** : Distillation atmosphérique : Ce mode de

Raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340 °C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit. [2]

➤ - **Distillation sous vide** : A ce stade, le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage aux alentours de 400 °C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite à quelques dizaines d'hPa². Il est possible, dans ce type d'unité, de fabriquer directement toutes les classes de bitumes du 20/30 au 160/220. [2]



- | | | |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. Gaz | 5. Carburateur | 9. Gasoil sous -vide |
| 2. Essence légère | 6. Gasoil | 10. 1 ^{er} Sous -vide |
| 3. Essence | 7. Vers éjecteurs de vapeur | 11. 2 ^e Sous -vide |
| 4. White-spirit | 8. Gasoil entraîné | 12. 3 ^e Sous -vide |

Figure I-8 : Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole. [2]

I-6 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume :

Le bitume confère à l'enrobé sa flexibilité et sa capacité à résister à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs dont le trafic, les conditions climatiques du site, etc.

A température de service élevée, le bitume doit demeurer suffisamment visqueux afin d'éviter que ne se produise le phénomène d'orniérage. A l'opposé, à basse température, le bitume doit conserver une certaine élasticité pour éviter le phénomène de fissuration par retrait thermique et la fragilisation de l'enrobé. Aux températures intermédiaires, il doit être résistant à la fatigue sous l'effet du trafic répété. [2]

I-6-1 Essais de caractérisation des bitumes :

- Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66 – 004) :

- Définition :

La pénétrabilité est exprimée en dixième de millimètre, correspondant à la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

- Principe d'essai :

Mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné (Bitume). Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales à (500 x 0,1mm), sont : Température 25 °C, Charge appliquée 100g, Durée d'application de la charge 5s. Pour les pénétrations supérieures à cette limite, la température d'essai doit être de 15 °C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangées.

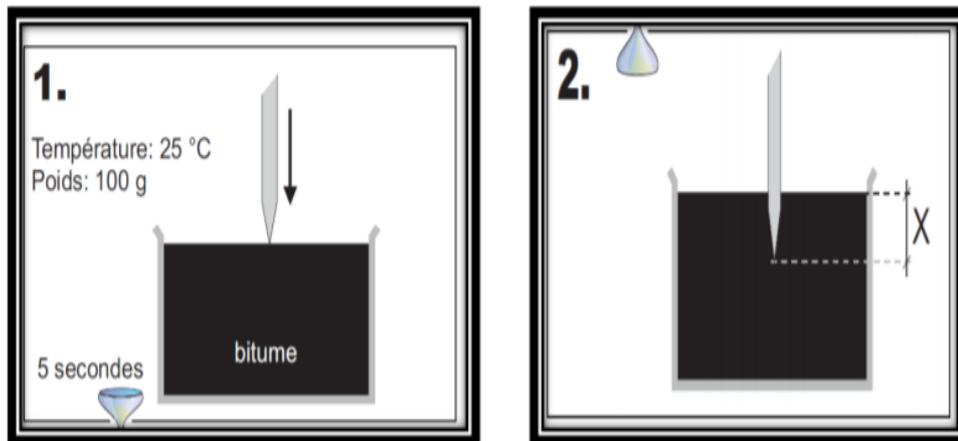


Figure I-9 : Principe de l'essai de pénétrabilité. [2]

- Essai de point de ramollissement bille et anneau (NF T66 – 008) :

- Définition :

Température de ramollissement c'est à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance. Donc cet essai consiste à déterminer la température du ramollissement des bitumes et des liants bitumineux, dans la plage des températures de 30 °C à 200°C.

- Principe d'essai :

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de 25mm.

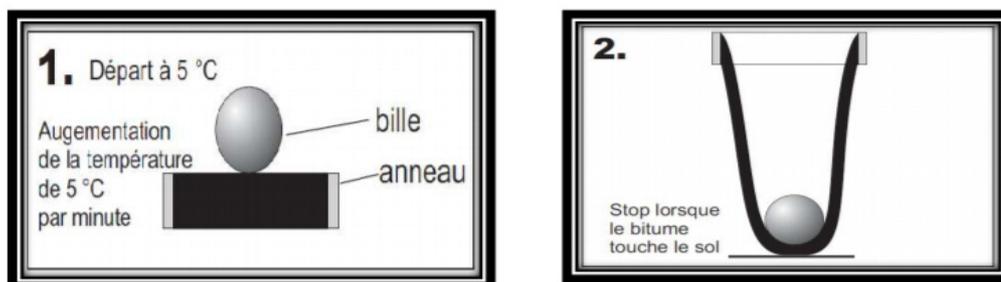


Figure I-10 : Principe de ramollissement. [2]

I-7 Classification :

Les bitumes peuvent être classés suivant leur origine:

- les bitumes naturels: le bitume natif de Trinidad, le bitume natif des Bermudes ;

- les bitumes d'extraction de roches: le bitume extrait des asphaltes naturels notamment calcaires asphaltiques; les bitumes contenus dans du sable: découverts en Afrique (Angola, Congo, Madagascar) ;

Les bitumes obtenus par calcination de certaines roches contenant des hydrocarbures telles que les schistes bitumineux d'Autun ou les schistes bitumineux d'Aveyron;

- les bitumes asphaltiques de distillation ou brais de pétrole;
- les bitumes asphaltiques soufflés;
- les bitumes asphaltiques de cracking.

Ils peuvent être également classés suivant leurs possibilités d'emploi routier. C'est le classement suivant la dureté ou plutôt suivant la pénétration.

Les bitumes routiers sont de six (6) catégories:

- les bitumes durs de pénétration 40/50 et 60/70 ;
- les bitumes semi-durs de pénétration 80/100 ;
- les bitumes semi-mous de pénétration 180/220 ;
- les bitumes mous de pénétration 280/300 ;
- les bitumes très mous de pénétration **300/350** ;
- les bitumes fluides (cut-backs et road-oils) de pénétration supérieure à 350

Les quatre (4) premières catégories (durs, semi-durs, semi-mous et mous) servent pour les répandages à chaud ou pour la fabrication des enrobés, des bétons et des mortiers bitumineux ainsi que des émulsions et du goudron-bitume. [4]

I-7-1 Bitume naturel :

Bitumes naturels variétés des compositions et des gisements

Le bitume existe à l'état naturel sous forme de résidu d'anciens gisements de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par une sorte de distillation naturelle, les éléments légers étant très volatils à température ambiante. Extrait à ciel ouvert de gisements qui se présentent comme de véritables lacs appelés fosses à bitume, le bitume peut aussi se présenter sous forme de filons en sous-sol. Le plus connu de ces bitumes naturels est le bitume de Trinidad qui relève du premier type de gisement.

La production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 000 t.

Les bitumes naturels ne sont guère utilisés que comme ajouts pour certaines utilisations particulières, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques (aptitude à être colorés, effet stabilisateur pour les asphaltes coulés, etc.).

Bitume de Trinidad épuré : il est extrait par raffinage, il contient une partie minérale, sa masse volumique est voisine de 1,40 g/cm³, la pénétration à 25 °C est comprise entre 1 et 4 dixièmes de millimètre, et la température bille-anneau supérieure à 90 °C. (Le bitume « soluble » a une pénétration standard de 3 à 12 dixièmes de millimètres et une température bille-anneau comprise entre 68 et 78°C).

Poudre de Trinidad 50/50 : il s'agit un mélange composé de 50 % de bitume de Trinidad épuré et de 50 % de charge calcaire.

Gilsonite : il s'agit d'un hydrocarbure naturel, qui se présente sous forme de 0/2. La masse volumique est de 1,05 g·cm³, la pénétration standard est voisine de 0 dixième de millimètre et

la température bille-anneau supérieure à 150 °C. Le dosage varie de quelques pour cent à 10 % des granulats secs. [1]



Figure I-11 : Morceaux de bitume provenant d'un gisement naturel en bordure de la mer Morte. [1]

I-7-2 Bitumes artificiels : productions industrielles

- Bitume brut dérivé du pétrole

Les bruts à bitume sont des bruts lourds venant du Venezuela (Boscan, Bachaquero, Lagunillas et Tia Juana) ou du Moyen-Orient (Safaniya (ou Arabe lourd) et Kuwait).

Ces bitumes comprennent les bitumes purs normalisés (norme NF EN 12591) et les bitumes spéciaux divisés en bitumes de grade « dur » (NF EN 13924) et en bitumes à susceptibilité améliorée.

- Un bitume fluidifié, ou cut back, est un bitume dont on a réduit la viscosité en lui ajoutant un diluant assez volatil (du pétrole ou du kérosène par exemple).

- Un bitume fluxé est un bitume dont la viscosité a été réduite par l'ajout d'une huile de fluxage.

Les bitumes sont classifiés selon un essai de qualification. Les bitumes purs et les bitumes routiers durs sont classés à l'aide de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille, les bitumes industriels durs et les bitumes oxydés avec l'essai de point de ramollissement bille et anneau, les bitumes fluidifiés et les bitumes fluxés selon leur pseudoviscosité mesurée au viscosimètre.

Les domaines d'utilisation sont variables selon les pays. En Europe, la classification est la suivante (les dates des normes mentionnées en référence sont celles de l'adoption de la norme européenne par la France) :



Figure I-12: Quelques-uns des 14 169 fûts de bitume de Trinidad débarqués à Brisbane (Australie) par le navire Larchbank, en 1938. . [1]

I-8 Propriétés physico-chimiques :

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 électrique.

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. Il est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels.

Ses propriétés peu courantes et la complexité de sa composition ont d'abord conduit à introduire des essais empiriques destinés à repérer les différentes variétés obtenues, mais l'importance et la multiplicité des applications qui en sont faites ont ensuite amené producteurs et utilisateurs à l'étudier plus complètement.

Les moyens modernes d'investigation ont permis d'analyser l'influence de la composition sur les propriétés physiques et de s'orienter ainsi vers des qualités répondant mieux aux besoins des utilisateurs. L'étude des propriétés viscoélastiques a permis de comprendre la signification d'essais empiriques utilisés jusqu'alors et de les relier à des notions fondamentales. Elle a également permis le calcul du comportement mécanique des bitumes au même titre que celui des autres matériaux de construction, tels que le béton ou les métaux [7]

I-9 Les types de béton bitumineux :

On distingue de nombreux types de béton bitumineux, chacun avec ses caractéristiques propres :

- **Le béton bitumineux mince (BBM)** : possède une granulométrie de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux est facilement compactable et est parfaitement imperméable. Principalement utilisé pour les parkings ou les trottoirs, son épaisseur varie de 2.5 à 5 cm.
- **Le béton bitumineux très mince (BBTM)** : c'est sans doute l'enrobé le plus intéressant en termes de rapport qualité-prix. En effet, il dispose d'une très bonne durée de vie ainsi que d'une facilité de mise en œuvre. Quelle que soit la granulométrie (0/10 ou 0/6), le BBTM dispose d'une épaisseur comprise entre 1.5 et 3 cm.
- **Le béton bitumineux ultra mince (BBUM)** : destiné à une couche de roulement, c'est-à-dire en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, il est tout indiqué pour un parking par exemple. Son épaisseur varie de 1 à 1.5 cm.
- **Le béton bitumineux souple (BBS)** : comme son nom l'indique, ce béton est constitué d'un bitume assez mou pour obtenir un enrobé déformable. Cependant, il possède une faible résistance à l'orniérage.
- **Le béton bitumineux drainant (BBM)** : l'avantage principal de ce type de béton bitumineux réside dans son excellente adhérence, aussi bien par temps de pluie ou de forte chaleur. De plus, il réduit le bruit de roulement. Pour une allée de jardin, il est alors parfaitement adapté
- **Le béton bitumineux semi-grenu (BBSG)** : celui-ci est l'enrobé à chaud de référence. En effet, il répond à de nombreux besoins (trottoir, allée...) et est très adapté pour un trafic aussi bien moyen que lourd. Son épaisseur varie de 3 à 9 cm, suivant la granulométrie.
- **Le béton bitumineux à modules élevés (BBME)** : ce béton bitumineux fait partie des enrobés structurants. Il possède une excellente rigidité, une durée de vie importante et une bonne résistance à l'orniérage. Son épaisseur peut varier de 4 à 9 cm par couche. [7]
- **Asphalte**: roche calcaire imprégnée de bitume. Expression qui désigne le revêtement des routes.

I-10 Familles d'enrobés bitumineux :

- **Les différentes formules d'enrobés sont caractérisées par :**
- **Leur granulométrie ;**
- **Le type de liant et la teneur en liant ;**
- **Le procédé de fabrication (chaud ou froid) ;**
- **L'adjonction éventuelle de matériaux particuliers.**

I-10-1 Produits chauds :

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

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. [8]

Béton bitumineux ultra mince (BBUM)1: 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)2 : 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.
- 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).[8]

On distingue également d'autres formules :

- Enrobé à module élevé (EME) utilisés en couche d'assise ;
- Béton bitumineux drainant³ ;
- Enrobé avec adjonction de colorant ;
- Enrobé avec adjonction de polyéthylène ;
- Enrobé avec adjonction de verre ou miroir pilé ;
- Enrobé avec adjonction de matériau local.
- Enrobé phonique [8]

I-10-2 Produits froids :

Il s'agit d'enrobés fabriqués et appliqués à froid, par adjonction d'émulsion de bitume garantissant la malléabilité du matériau.

Enrobé froid : enrobé de faible granulométrie (0/4,05 ou 0/6 mm en principe) avec une forte teneur en liant et en fines, généralement utilisé de manière temporaire pour permettre la circulation de véhicules sur des voies en cours de travaux, ou encore pour reboucher des petites tranchées, trous, et nids-de-poule sur des chaussées déformées. Cet enrobé est très utilisé au printemps en période de dégel, pour réparer les détériorations de la chaussée dus au gel ;

Grave émulsion : mélange de grave avec une faible proportion d'émulsion de bitume ;

Il existe aussi des enrobés bitumineux à froid qui sont destinés à la réalisation de couches de roulement. Ce sont des enrobés hydrocarbonés à froid (non stockables) ou tous les granulats sont recouverts de liant. [8]



Figure I-13 :Nids-de-poule rebouchés à l'aide d'enrobé à froid. [8]

I-10-3 Produits tièdes :

Il s'agit des enrobés fabriqués entre 100 °C et 140 °C et appliqués à chaud (aux alentours des 120 °C). On distingue encore les enrobés tièdes (fabriqués à plus de 100 °C) et les enrobés semi-tièdes, fabriqués à une température inférieure à 100 °C. Ils permettent de réduire la consommation énergétique, contribuant ainsi à une politique de développement durable. Comparés aux enrobés à chaud consommant 7 à 8 litres par tonne, les enrobés tièdes permettent d'obtenir un gain de un litre de fioul par tonne, 1,5 à 3 litres pour les enrobés semi-tièdes.

- Enrobé tiède avec cire Sasobit ;
- Enrobé tiède avec additif chimique Cecabase RT 945 ;
- Enrobé semi-tiède LEA. [8]

I-11 Formulation Des Bétons Bitumineux :

Formuler un enrobé hydrocarboné est déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'atteindre des performances visées: Imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et la fatigue). Donc l'objectif de formulation est de déterminer un mélange de différentes classes granulaires qui constitue un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé.

Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compaction.

Une étude de formulation d'un enrobé bitumineux comporte deux phases principales ; à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant optimale à l'aide des résultats de l'essai Marshall.

I-11-1 Paramètres Influençant Le Choix D'une Formulation :

Les principaux caractères consistent à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour la fabrication de l'enrobé. Ceci sur la base des considérations suivantes [6,7] :

- ✓ Trafic ; volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu,
- ✓ Climat : pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement,
- ✓ Position de la couche : roulement, base, fondation liée,
- ✓ fonction de la couche : adhérence, perméabilité, bruit, orniérage, etc..

a) Méthodologie de formulation 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 choisit une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

Les fractions granulaires sont choisies parmi les suivantes : 0/3, 3/8, 8/15, les caractéristiques des granulats sont représentés comme suit :

- ✓ Fuseau granulométrique :

Tableau I-2: Fractions granulaires 0/14 des BB [2]

Passant Tamis (mm)	BB 0/14
20	/
14	94-100
10	72-84
6.3	50-66
2	28-40
0.08	7-10

b) Détermination de la teneur en bitume :

On appelle teneur en bitume la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, pour cela on utilise la formule suivante [8] :

Teneur en liant = $\alpha \cdot K5$

Σ : surface spécifique conventionnelle.

Σ : $0.25G + 2.3S + 12s + 135f$ en m^2/kg

G : proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : proportion pondérale des éléments compris entre 6.3 et 0.315

s : proportion pondérale des éléments compris entre 0.315 et 0.08

f : proportion pondérale des éléments inférieurs à 0.08 mm

K : module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film autour des granulats.

α : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats.

α = masse volumique des granulats (2,65). [2]

I-12-Effet de la température:

A basse température le bitume possède un comportement fragile (donc fissuration de la chaussée). Cependant, la fissuration thermique peut être facilement évitée à basse température si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume moins "dur", et donc moins "cassant" à basse température. [9]

Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

Plus simplement, on doit donc exiger des enrobés de qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- la stabilité : la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- la flexibilité: soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères (dans notre cas on s'intéresse aux fibres de polymère qui ont un comportement purement élastique). [9]

a/Principaux effets mécaniques de la température :

- Changement du module du matériau : Un béton bitumineux que l'on chauffe devient plus "mou". Plus généralement, ces matériaux sont dits "thermosensibles" c'est-à-dire que leur comportement viscoplastique change selon la température considérée,
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température

Le premier effet est, en général, caractérisé par la dépendance du module de rigidité vis-à-vis de la température et de la vitesse de chargement.

Le deuxième effet est particulièrement néfaste :

- Lors d'un refroidissement, par exemple, la chaussée a tendance à se contracter. Or, les mouvements de contraction sont empêchés dans le sens longitudinal de la chaussée.

Cela revient donc à exercer une traction sur cette chaussée dans le sens longitudinal, d'où l'amorçage éventuel de fissures transversales. Ces dernières sont ensuite susceptibles de se propager à travers la structure lors de cycles thermiques (journaliers ou autres).

- Lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structures semi-rigides). En effet, cette couche traitée aux liants hydrauliques est sujette au retrait thermique et de prise. Le retrait, empêché par le frottement à l'interface, peut provoquer une fissure dans la couche en béton bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut progressivement traverser la couche. [9]

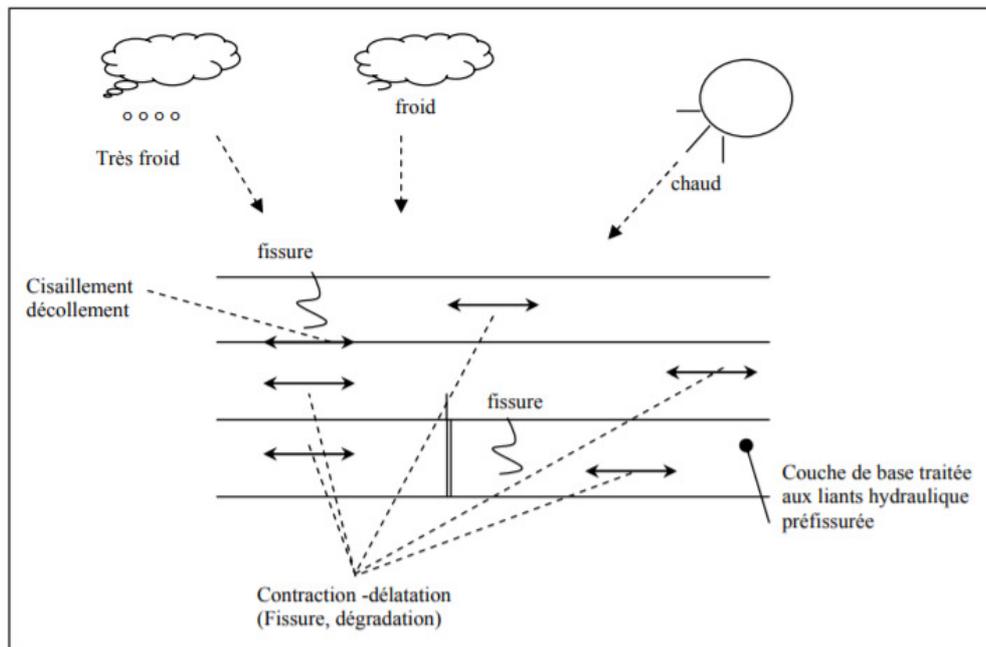


Figure I-14 : Schématisation des sollicitations induites par la température [9]
Dégradations: dans ce qui suit (figure) on site quelques types de dégradations [9]

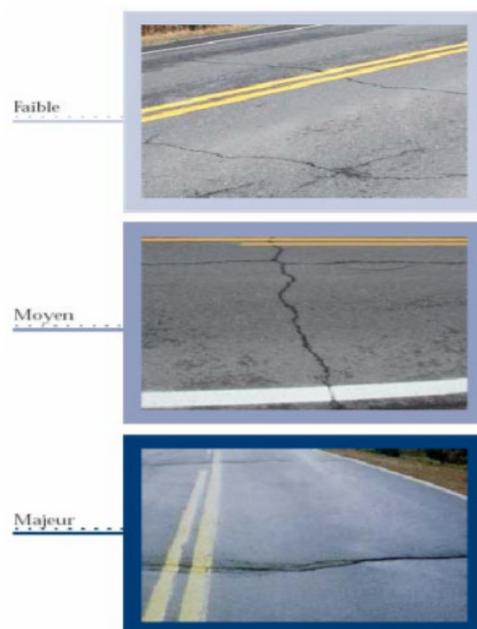


Figure I-15 : Fissures transversales [9]

✓ **Description**

Rupture du revêtement relativement perpendiculaire à la direction de la route, généralement sur toute la largeur de la chaussée.

✓ **Causes probables**

- Retrait thermique.
- Vieillissement et fragilisation du bitume.

- Remontée de fissures après des travaux de surfacage.
- Joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé).
- Diminution de la section du revêtement (ex. : vis-à-vis des regards ou des puisards).

✓ Niveaux de sévérité

Faible : Fissures simples et intermittentes dont les ouvertures sont inférieures à 5 mm.

Les bords sont en général francs et bien définis. Les fissures avec scellement en place en bonne condition sont incluses dans ce niveau de sévérité ou elles peuvent aussi être comptabilisées à part selon l'usage qui sera fait de l'information.

Moyen : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 5 à 20 mm. Les bords sont parfois érodés et un peu affaissés.

Sans être inconfortable, la fissure est perceptible par l'utilisateur.

Majeur : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 20 mm. Les bords sont souvent érodés et il y a affaissement ou soulèvement au gel au voisinage de la fissure. Le confort au roulement est diminué par les déformations de surface. [9]

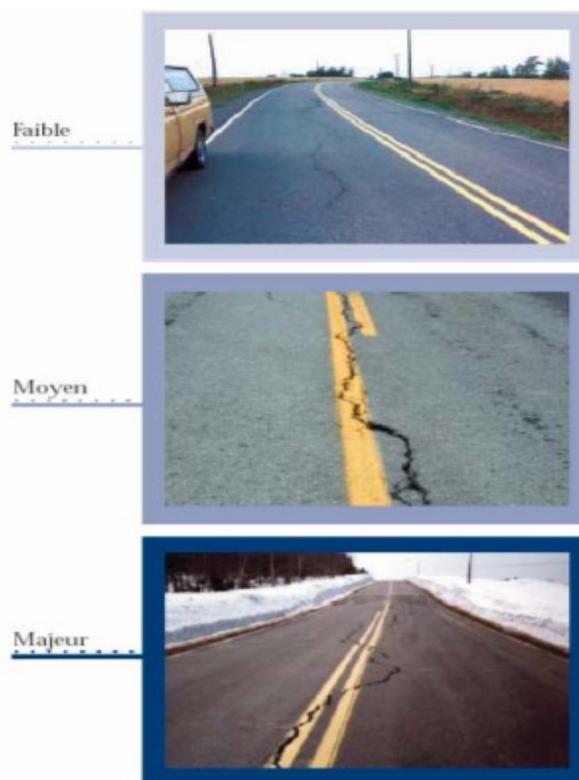


Figure I-16 : Fissures de gel

✓ Description

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

✓ Causes probables

- Infrastructure gélive et soulèvements différentiels.

- Comportement gélif différentiel (ex. : transition aux coupes de roc).
- Remblai instable.
- Drainage inadéquat.

✓ Niveaux de sévérité

Faible : Fissures simples et intermittentes dont les ouvertures sont inférieures à 10mm. Les bords sont en général francs et bien définis. Les fissures avec scellement en place en bonne condition sont incluses dans ce niveau de sévérité ou elles peuvent aussi être comptabilisées à part selon l'usage qui sera fait de l'information.

Moyen : Fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 10 à 25 mm. Les bords sont parfois érodés et un peu affaissés. Sans être inconfortable, la fissure est perceptible par l'utilisateur.

Majeur : Fissures généralement simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 25 mm. Les bords sont souvent érodés et il y a affaissement ou soulèvement au gel au voisinage de la fissure. Le confort au roulement est diminué par les déformations de surface.



Figure I-17 : Fissures en carrelage

✓ Description

Rupture du revêtement sur des surfaces plus ou moins étendues, formant un patron de fissuration à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 300 mm ou moins.

✓ Causes probables

- Fatigue (ex. : épaisseur de revêtement insuffisante).

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

✓ **Niveaux de sévérité**

Faible : Maillage composé de fissures simples aux bords francs.

Moyen : Maillage composé de fissures simples aux bords faiblement détériorés.

Majeur : Maillage composé de fissures simples aux bords détériorés.

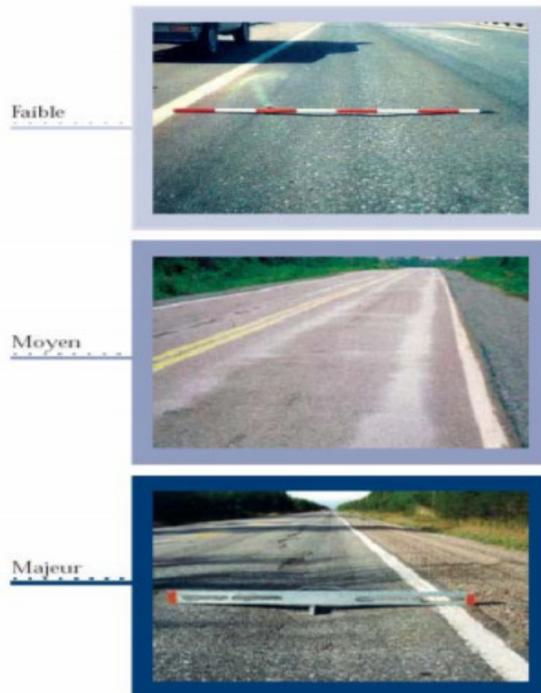


Figure I-18: Déformation de la surface (Ornière à grand rayon)

✓ **Description**

Dépression longitudinale simple située dans les pistes de roues (bandes 2 et 4). La forme transversale de la dépression correspond à celle d'une courbe parabolique très évasée.

✓ **Causes probables**

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

✓ **Niveaux de sévérité**

Faible : Profondeur de l'ornière inférieure à 10 mm.

Moyen : Profondeur de l'ornière de 10 à 20 mm.

Majeur : Profondeur de l'ornière supérieure à 20 mm.

I-13 La Compacité :

La compacité "C" est une conséquence directe de la formulation ;

✓ Compacité % = 100 - V %.

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). 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.

Pb : le pourcentage en poids du bitume;

PG1, PG2, PG3 ...ceux des agrégats.

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

$$\gamma_{rel} = 100 / (Pb / \gamma_b) + (PG1 / \gamma_{G1}) + (PG2 / \gamma_{G2}) + \dots$$

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

$$V_v = 100 / (\gamma_{rel} - \gamma_{app}) / \gamma_{rel}$$

La compacité C : $C = 100 - V_v$

I-14 Propriétés Mécaniques Des Enrobe Bitumineux :

Pour connaître les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux ; on fait un essai ou le plus souvent une série d'essais normalisés [2]

I-14-1 Essai Marshall (EN 12697-34) :

L'essai Marshall est un essai destructif, effectué en laboratoire selon un mode opératoire bien précis

L'essai permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données le "pourcentage de vides", la "stabilité" et le "fluage" dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

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) [2].

Principe de l'essai

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. Sur les éprouvettes ainsi confectionnées, on détermine entre autre :

- La stabilité Marshall : C'est la résistance à l'écrasement de l'éprouvette à la température de 60°C.
- Le fluage Marshall: C'est l'affaissement de la même éprouvette au moment de la rupture.



Figure I-19: Machine d'essai Marshall [2]

I-14-2 Essai Duriez (NF P9-251-1) :

Cet essai est réalisé sur une éprouvette cylindrique d'enrobé bitumineux de poids et de section bien déterminés. Celle-ci est soumise à une compression statique.

Les éprouvettes ainsi confectionnées sont conservées :

- Les unes à 18°C pendant une durée de sept jours dans l'air
- Les autres à 18°C pendant une durée de sept jours dans l'eau.

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

- La résistance des éprouvettes conservées à l'air pendant une durée de sept jours R
- La résistance des éprouvettes conservées dans l'eau pendant une durée de sept jours r
- 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 I-20: Machine d'essai Duriez

- **Un enrobé bitumineux est constitué de différents matériaux :**

Des granulats : graviers de diamètre supérieur à 63 micromètres ;

Des « fines » (ou « fillers ») : sables et poussières de section inférieure à 63 micromètres. Ces éléments, présents naturellement en faible quantité dans les granulats, sont essentiels pour réaliser l'enrobage du liant (le bitume) avec les granulats, car ce sont les fines qui agrègent le bitume ;

De nos jours les liants hydrocarbonés sont composés essentiellement de bitume. [6]

I-15 Fabrication:

Les enrobés sont fabriqués par une centrale d'enrobage (ou poste d'enrobage), à froid ou à chaud. Il existe des centrales fixes, situés généralement à proximité d'une carrière, ou mobiles, principalement utilisées lors des grands travaux tels que la construction d'une autoroute.

Le processus de fabrication d'enrobé suit les étapes suivantes :

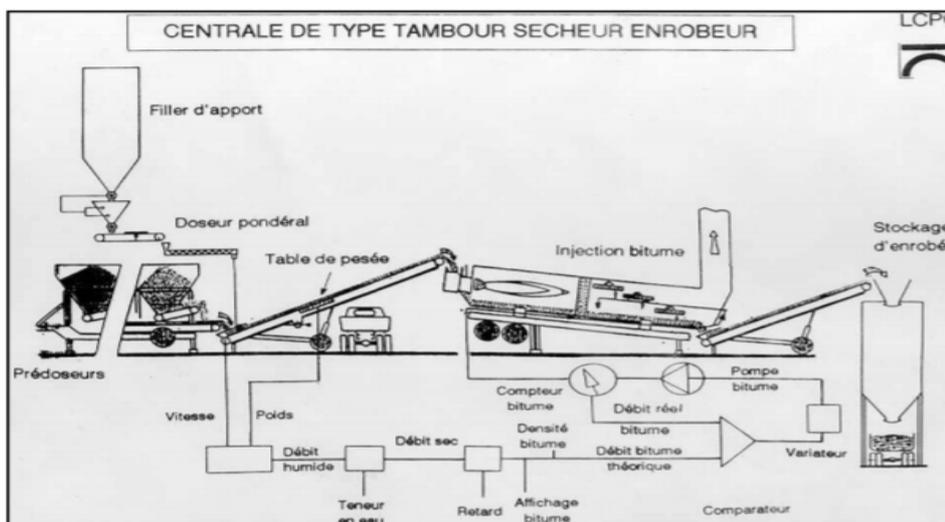


Figure I-21 : Le processus de fabrication d'enrobé [14]

- Alimentation : remplissage de trémies (« prédoseurs ») avec les différentes coupures de granulats, à l'aide d'un chargeur.
- Adjonction éventuelle de fillers contenu dans un silo.
- Convoyage : les prédoseurs déversent leur contenu à des vitesses différentes correspondant à la proportion désirée par coupure de matériau (en fonction de la formule d'enrobé à produire), sur un tapis convoyeur.
- Séchage : les matériaux sont enfournés dans le tambour malaxeur de la centrale, qui est un cylindre pouvant mesurer plus de 10 mètres de long et 2 m de diamètre, animé par des galets provoquant sa rotation, et disposant à l'autre extrémité d'un brûleur (généralement alimenté au fioul lourd ou au gaz naturel, dont la flamme peut mesurer

plusieurs mètres. À l'entrée du tambour, et tout au long de leur progression à l'intérieur de celui-ci, les matériaux sont séchés par la température de la flamme.

- Malaxage : tout au long de leur progression, les matériaux sont mélangés grâce à la rotation du tambour et des lames placées à l'intérieur.
- Adjonction des fines de recyclage : les fumées issues du séchage sont filtrées et les fines contenues dans ces fumées sont réinjectées dans le tambour afin de respecter la granulométrie initiale.
- Adjonction du bitume : les matériaux parvenant à l'autre extrémité du malaxeur sont « enrobés » avec le bitume injecté à l'aide d'une pompe selon la teneur désirée, et un dernier malaxage est effectué.
- Stockage : l'enrobé produit est ensuite stocké en trémies, soit à l'aide d'un chariot (ou skip) dans lequel on déverse l'enrobé en sortie du malaxeur par gâchées, soit en continu à l'aide de tapis adaptés.
- Chargement : l'enrobé stocké est ensuite chargé dans les camions qui se placent sous les trémies de stockage, où se trouve une bascule.



Figure I-22 : Une usine de fabrication d'asphalte. [6]

I-16 Transport et stockage :

Les enrobés chauds sont transportés dans des camions disposant d'une benne munie de trappes à l'arrière.



Figure I-23 : Benne à fond ouvrant - 1 trappe [15]

La législation dans un grand nombre de pays occidentaux impose que les bennes soient bâchées lors du transport d'enrobés chauds. Un enrobé stocké dans la benne d'un camion bâché peut rester plusieurs heures à température, mais il est indispensable de l'appliquer rapidement avant qu'il refroidisse (au-dessous de 130 °C, un enrobé est très difficile à travailler, et la qualité de l'application peut être remise en cause).

Pour réduire en partie le problème de refroidissement, le transport dans des bennes rondes avec un calorifugeage .



Figure I-24 : calorifugeage [14]

(Ex: laine de roche) assure un meilleur maintien de la température.

Les enrobés froids ou grave émulsions peuvent être stockés plusieurs semaines à l'abri des intempéries. [6]

I-17 Application :

✓ L'application du béton bitumineux :

Pour appliquer le béton bitumineux, il est indispensable de faire appel à une entreprise. En effet, les professionnels disposent du matériel (centrale d'enrobage et de malaxage) et des connaissances adéquates. Ils sont également en mesure de vous conseiller sur le type d'enrobé bitumineux à choisir pour votre projet. Toutefois, avant de faire appel à des professionnels vous devez vous assurer de la propreté de votre surface à enrober. [3]

L'application de l'enrobé est effectuée, en fonction de la surface à couvrir :

Manuellement, à l'aide de râpeaux, par la technique dite du « tirage au râteau » pour les petites surfaces ;

Avec un accessoire monté sur mini pelle lorsque la surface est intermédiaire ;

À l'aide d'un finisseur (ou « finisher ») pour les rues, routes et autoroutes.



Figure I-25 : Optimisation Finisseur et Compacteurs - solutions Trimble [17]

L'application doit se faire sur un sol pas trop froid 8 °C, sinon le compactage ne se fait pas correctement avec un risque de fissures. À la suite de l'application, un compactage est assuré à l'aide de compacteurs à pneus ou à jante lisse vibrant (les petits compacteurs sont également nommés « cylindres »). On peut appliquer seul l'enrobé dit « à froid ».



Figure I-26: Un finisseur en cours d'application, on remarque le camion vidant sa benne d'enrobé dans la trémie. [6]

Avantages et inconvénients : Le béton bitumineux, comme tout type de béton, dispose d'atouts et d'inconvénients qu'il vous faut prendre en compte avant la réalisation de votre ouvrage :

Tableau I-4 : L'avantage et inconvénient

Avantages	Inconvénients
Les enrobés sont 100 % recyclables.	Impossible de stocker le béton bitumineux à froid (utilisation sous 24 h après réalisation)
Excellente adhérence	Le dosage des constituants doit être effectué précisément pour ne pas être défectueux.
Très bonne résistance	Prix assez élevé
Facilité de mise en oeuvre	
Importante durée de vie : entre 10 et 15 ans	

Le climat est un facteur influant sur le choix du béton bitumineux. En effet, suivant la température, le béton peut se ramollir ou se durcir. Par temps de neige ou de pluie, le béton bitumineux peut facilement laisser apparaître du verglas. [3]

I-18 L'entretien du béton bitumineux :

Avant toute chose, il est fortement recommandé de vérifier régulièrement la surface de béton bitumineux. En effet, pour éviter tout risque de nids de poules, l'étendue doit être plane et régulière. Sachez aussi que la couche de roulement est à refaire tous les 12 ans environ. [3]

I-19 Le prix du béton bitumineux :

Bien entendu, le prix du béton bitumineux dépend de plusieurs critères : Le type d'enrobé bitumineux : qu'il s'agisse d'un enrobé à froid ou à chaud, le prix peut varier. De manière générale, l'enrobé à chaud est plus onéreux du fait de la complexité de sa mise en place.

L'épaisseur du béton bitumineux : en fonction de vos besoins et du type de travaux, l'épaisseur du béton bitumineux risque d'être différente et de jouer sur le prix. ! [3]

L'étendue de béton : il est important de noter que plus l'étendue n'est importante, moins le prix au m² est élevé L'accessibilité au chantier : si vous vous faites livrer le béton par un camion toupie, il est tout d'abord primordial de vérifier l'accès au chantier.

En Algérie, le coût est de 50000DA Tonne soit 1200DA la quantité de bitume utilisé dans un mètre carré de route

En effet, si l'entreprise doit faire des travaux supplémentaires pour accéder au chantier, le prix sera plus important.

A titre d'exemple, pour une surface de 200 m² à enrober, on estime le prix du béton bitumineux à 5200DA/m². Ce prix peut tout de même monter jusqu'à 6500 DA/m² pour un enrobé à chaud.

Conclusion :

Comme nous avons vu précédemment, le béton bitumineux est constitué de deux éléments principaux, les granulats et le bitume. La liaison entre ces deux composants 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:

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

Par ailleurs les essais de caractérisation et de contrôle des bétons bitumineux nécessitent du matériel spécifique et une technicité propre, surtout dans les régions où les conditions d'exploitation sont particulièrement sévères à l'exemple des régions sahariennes : trafic intense des poids lourds et température élevée).[5

Chapitre II L'utilisation Des Fibres Dans Le Béton Bitumineux

II -1- Les Fibres Dans Le Béton

Le domaine de la construction est un domaine d'innovation et de technologie qui converge vers la recherche pour avoir de nouveaux matériaux et de nouvelle technologie de construction.

Les chercheurs sont tous le temps en concurrence pour trouver des matériaux performant, écologique et a un coût économique abordable pour des projets conséquents.

L'utilisation des fibres remonte à plusieurs décennies, ce matériau procure des caractéristiques très intéressantes avec une incorporation et une mise en place très faciles. Ce chapitre illustre certaines fibres et leurs caractéristiques ainsi que leurs domaines d'utilisation qui existent dans le domaine de la construction. [15]

II-2 RÔLE DES FIBRES

Au début, les chercheurs ont pensé a ajouté des fibres dans le béton afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques telles que la résistance à la compression et à la traction.

Cependant, l'avancement technologique a permis de trouver de nouvelles techniques permettant d'offrir des résistances très élevées à un coût abordable. Après plusieurs années d'étude, les chercheurs ont conclu que l'addition de fibre peut contribuer à deux principaux rôles :

- Le contrôle de la propagation d'une fissure dans un matériau en état de service en réduisant l'ouverture des fissures.
- Transformation du comportement fragile d'un matériau en un comportement ductile qui augmente la sécurité lors des états de chargement ultimes. [15]



Figure II-1 : Propagation d'une fissure dans un matériau en état de service (Beddar, 2007). [15]

II-3 REVUE DES LITTÉRATURES

L'un des modes de détresse les plus importants dans les chaussées souples est la fissuration par fatigue. L'action de sollicitations répétées provoquées par le trafic induit des contraintes de traction et de cisaillement dans les couches liées qui conduisent à la perte progressive de l'intégrité structurale du matériau. La fatigue provoque des fissures dans la trajectoire de la roue aux points où se produisent des déformations et des contraintes de traction critiques. Une fois que les dommages ont commencé aux endroits critiques, l'action du trafic provoque finalement la propagation de ces fissures à travers toute la couche liée, Al-Khateeb et Shenoy, 2011. [23]

Moghaddam, et al, 2011, ont décrit que la résistance à la fatigue du mélange d'asphalte est sa capacité à résister à des flexions répétées sans fracture. La plupart des analyses utilisent des contraintes de flexion ou des déformations sur la face inférieure des couches de chaussée en béton bitumineux pour évaluer la résistance à la fatigue.

Comme cité par Deacon, et al., 1994, au début des années 1960, Monismith et al., Et Pell ont établi les relations entre la résistance à la fatigue de l'asphalte mélangé à chaud (HMA) et la contrainte de traction horizontale ou la déformation de traction à la couche d'asphalte inférieure en utilisant les formes de base montrées dans les équations. (1) et (2).

$$N_f = k_1 \left[\frac{1}{\sigma} \right]^{k_2} \quad (1)$$

$$N_f = k_3 \left[\frac{1}{\varepsilon} \right]^{k_4} \quad (2)$$

Où N_f est le nombre de répétitions jusqu'à la rupture, σ est l'amplitude de la contrainte de traction appliquée à plusieurs reprises, et ε est l'amplitude de la contrainte de traction appliquée de manière répétée, et k_1 , k_2 , k_3 et k_4 sont les coefficients déterminés expérimentalement.

Une déclaration intéressante déclarée par Serfass et Samanos, 1996, a démontré que l'ajout de fibres permet de développer des mélanges d'asphalte riches en bitume qui créent une résistance élevée au vieillissement, aux effets de l'eau et à la fissuration par fatigue ainsi qu'une résistance mécanique élevée au cisaillement, à la tension et à la flexion. .

Asmael, et al, 2010, ont montré que les fibres de polyester améliorent les performances du mélange d'asphalte car elles améliorent la stabilité, principalement en raison de leur fonction de renforcement stabilisatrice et multidirectionnelle. Ils absorbent également le bitume et épaississent le film de bitume adhérent à l'agrégat, ce qui renforce la résistance du mélange d'asphalte aux perturbations environnementales et aux dégâts d'eau.

Chen, et al, 2009, ont utilisé des fibres de polyester comme renforcement pour améliorer la résistance à la fatigue du mélange d'asphalte, en effectuant l'essai de poutre de fatigue sur du béton bitumineux à granulométrie dense, ils ont conclu que l'ajout de fibres ralentit le développement de la déflexion et l'évolution des fissures. Significativement pour les applications routières de chargement lourd.

Qunshan, et al., 2009, ont utilisé trois types de fibres, y compris les fibres de polyester, les fibres de cellulose et les fibres minérales comme modificateurs pour le mélange d'asphalte avec le dosage de 0,30%, 0,35% et 0,40% par le poids total du mélange d'asphalte. Les propriétés de fatigue du mélange d'asphalte ont été étudiées à différents rapports de contrainte. Leurs travaux approfondis ont montré que les paramètres de fatigue des mélanges d'asphalte

avec des fibres étaient diminués, ce qui indiquait que la propriété de fatigue pouvait être améliorée par des modificateurs de fibres.

Xu, et al. 2010, ont étudié l'effet des fibres de polyester avec différents pourcentages (0,00%, 0,20%, 0,35% et 0,50% en poids du mélange) sur les propriétés de fatigue des mélanges de béton bitumineux. Un essai de fatigue en flexion au troisième point avec mode contrôlé par contrainte a été réalisé à 20 ° C. Ils ont rapporté que l'ajout de fibres dans le mélange a entraîné une augmentation de la résistance à la fatigue. Par conséquent, la résistance à la fatigue du courant alternatif avec des fibres de polyester était supérieure à celle des autres mélanges. Comme mentionné dans leur étude, l'amélioration de la caractéristique de fatigue est attribuée à l'effet de mise en réseau tridimensionnel des fibres en courant alternatif et à la stabilisation du liant à la surface de l'agrégat. [23]

Anurag et al, 2009, ont utilisé des fibres de déchets de polyester de toiture avec deux longueurs (0,635 cm et 1,270 cm) et deux teneurs (0,35% et 0,50% en poids du mélange total). Après avoir effectué le test de résistance à la traction indirecte des mélanges de béton bitumineux, ils ont signalé que l'addition des fibres de polyester était bénéfique pour améliorer les propriétés de résistance à la traction en plus d'augmenter les paramètres suivants; teneur en vides, teneur en asphalte, poids unitaire et stabilité Marshall, en outre, ils ont constaté que des fibres de 0,635 cm de long avec une teneur de 0,5% se sont avérées être la meilleure combinaison.

Dans une autre étude réalisée par Ye, et al. 2009, qui ont été réalisées sur les propriétés de fatigue de trois types de fibres de liant modifié contenant des fibres de cellulose, des fibres de polyester et des fibres minérales. Il a été montré que les paramètres de fatigue (module dynamique $|E^*|$ et angle de phase (δ)) étaient diminués, donc les propriétés de fatigue des mélanges d'asphalte modifiés par des fibres ont été améliorées. [23]

II-4 DIFFÉRENTS TYPES DE FIBRES POUR LES BÉTONS

Le domaine de la construction et plus précisément les bétons, les recherches sont intensifiées pour améliorer ce matériau et lui conférer des caractéristiques avantageuses pour son utilisation.

L'ajout de fibres est une option pour conférer au béton des caractéristiques élevées à plusieurs niveaux (mécaniques, physiques et durabilité). Plusieurs types de fibres existent pour le renforcement des bétons, quelques types sont présentés ci-dessous. [15]

✓ Fibre de verre

Le verre est un matériau solide qui s'est formé par refroidissement d'un liquide visqueux. Il est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration, par contre élaborée sous forme de fibre de faible diamètre, le verre perd cette fragilité. Ces fibres sont alors fabriquées à partir de verre fondu qui passe dans une filière, chauffé par effet Joule, qui comporte 50 à 800 trous d'un diamètre de l'ordre de 10 à 100 μm . Elles sont disponibles dans le commerce sous forme de bobines (découpage à la demande) ou sous forme de morceaux prédécoupés de 3, 6, 12, et 50 mm de long. Ils sont regroupés en trois types : la fibre de verre classique (silice, soude, chaux), la fibre de verre au zirconium et les

fibres de verre au borosilicate. Les compositions moyennes de ces trois types de fibres sont données dans le tableau 4 [15]

Tableau II-1: Compositions des fibres de verre (BEDDAR 2007).

COMPOSITION	SiO ₂	AL ₂ O ₃	B ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
Verre en alumino Borosilicate (type E)	53 - 54	14 -15.5	6.5 - 9	20 -24	20 -24	1
Verre cem-fil	70	0.2	8	00	00	12
Verre sodo calcique (Verre à vitre)	70 -72	1	--	10	--	14

Les géo-grilles en fibre de verre sont utilisées comme éléments de renforcement et pièces de protection pour l'installation et la réparation des routes fédérales et régionales, des aéroports, des ponts et des viaducs.



Figure II-2 Des fibres de verre pour renforcer la chaussée [16]

L'utilisation de filets en fibre de verre pour le renforcement des chaussées en béton bitumineux permet une augmentation du temps de fonctionnement pendant les réparations de 2-3 fois. Le coût d'entretien des routes dans les régions où les géo-grilles en fibre de verre sont activement utilisées est réduit de 40%. De tels matériaux ont des propriétés techniques et physiques élevées: résistance aux milieux agressifs, capacité à résister à des charges

transversales et longitudinales élevées. Les géo-grilles en fibre de verre améliorent considérablement la résistance et les propriétés mécaniques des éléments renforcés [9]

II-5 Variétés de géo-grilles et leurs propriétés

La géo-grille détermine son utilisation. Outre le matériau et la taille de la cellule, le matériau se distingue par son mode de formation: biaxial (double orientation) et uniaxial (mono-orienté). Produits biaxiaux à cellules rectangulaires conçus pour la construction de routes, y compris sur des sols meubles. Les géo-grilles à double orientation répartissent bien les charges, ce qui contribue à prolonger leur durée de vie. Les couches uniaxiales de cellules allongées ont une résistance à la traction élevée, sont excellentes pour renforcer le sol, les zones de glissements de terrain et les piliers d'aspersion. [19]

Produits pour le renforcement du béton bitumineux

Une géo-grille routière pour le renforcement du béton bitumineux permet de répartir les charges externes locales sur tout le volume de toile à proximité. Ce matériau est utilisé pour prolonger la durée de vie des autoroutes à base de béton, qui croît de plus en plus chaque année. De plus, cette grille répartit les contraintes internes dues au retrait du béton durci progressivement. [19]

Géo-grille pour la construction de routes

Le trottoir est exposé quotidiennement aux charges des flux de circulation, ce qui entraîne inévitablement sa destruction et la formation de trous, de bosses et de fissures. La raison principale en est une préparation de base insuffisante. La géo-grille de la surface de la route permet d'augmenter la résistance de la bande de béton bitumineux, la résistance à l'allongement et l'optimisation de la détection des contraintes horizontales. [19]



Figure II-3 de Géo-grille [19]

L'utilisation de ces matériaux, à la fois dans la construction de nouvelles routes et dans la réparation des routes existantes, nous permet d'augmenter considérablement les propriétés opérationnelles et d'augmenter la durée de vie du revêtement. L'utilisation de géo-grilles pour la construction de routes en combinaison avec le géotextile vous permet de réduire la quantité de matériaux non métalliques en vrac nécessaires pendant la construction de routes, ce qui réduira considérablement les coûts du projet sans altérer la qualité de la conception. [19]

II-6 Géo-grilles en polymère

Les géo-grilles routières recouvertes de polyester sont recouvertes d'une technologie de tricotage et de perçage. Cela vous permet de conserver la haute résistance d'origine du matériau. Une structure de géo-grille est une cellule fixe de taille supérieure au matériau à remplir. En conséquence, le remblai est interconnecté avec le substrat (sol, roche, autre substrat de matériaux utilisés dans la construction). [19]



Figure II-4 Géo-grille en polymère [19]

Les matériaux polymères sont utilisés comme couche de renforcement dans les couches inférieures du pied de la route. L'utilisation de filets polymériques dans les structures routières permet le renforcement de la base de la route et la prévention de l'entrelacement de matériaux de différentes couches de contact. Le renforcement est obtenu en limitant le mouvement des granules en vrac en vrac à travers la cellule. La couche composite moulée (géo-grille + matériau granulaire) a une résistance élevée aux charges dynamiques. [19]

II-7 La production

Aujourd'hui, les principaux types de géo grilles suivants sont fabriqués:

- polymère extrudé;
- fibres de verre collées;
- Filets anti-crevaison en polyester et fibre de verre

II-8 L'utilisation

La géo-grille utilisée comme renforcement de l'enrobé est la grille en fibre de verre induite CIDEX 100 SB de 6D Solutions, Représente dans la (figure).

Le grillage carré de mailles de 40 x 40 mm², résulte de l'assemblage des réseaux de fils

Diamètre de grains [mm] Passant [%]

Modélisation du comportement en fatigue d'un béton bitumineux renforcé par géo-grille 5 chaîne et trame avec une partie non-tissé. Les deux types de fils sont composés des fibres de verre continues et de résine.

Le renforcement par géo-grille se fait à l'interface entre la couche de roulement et la couche d'assise, à l'aide d'une émulsion de bitume résiduel pour le collage. Le renforcement a le rôle de retarder la fissuration de fatigue. [13]

II-9 Géo-grille d'application routière

La construction de nouvelles routes et la réparation de routes existantes à diverses fins est la principale industrie où la géo-grille est utilisée. Selon la technologie, la pose peut être effectuée sur toutes les couches de la chaussée. Objectif principal du réseau routier:

- Renforcement des sites lors des réparations. La géo-grille est posée sur la partie endommagée de l'asphalte et une nouvelle couche est posée dessus. Les propriétés structurelles de la maille empêchent le nouveau revêtement de toucher les anciennes fissures. Dans ce cas, la couche assume la plupart des contraintes horizontales.
- Dans les endroits avec la charge la plus élevée sur la chaussée, des bosses et des ornières peuvent se produire. Pendant la réparation, la géo-grille est posée dans des puits sur du béton bitumineux enterré. Cela vous permet de répartir la charge uniformément sur toute la zone, empêchant la formation de nouveaux bosses.
- La pose de la géo-grille dans la chaussée se fait en combinant différents types de revêtements (par exemple asphalte et ciment-béton) pour éviter les fissures.
- Renforcement des joints entre les dalles de béton. Lors de l'application d'asphalte sur des dalles de béton, des points faibles se forment au niveau des joints sur lesquels la géo-grille routière est posée pour renforcer la grille.
- En élargissant la route à la jonction des revêtements existants et nouveaux, des fissures sont possibles. Pour éviter cela, le joint est renforcé par une géo-grille.
- Les technologies modernes prévoient souvent le renforcement préliminaire du sol. La géo-grille est également utilisée pour cela. L'utilisation de la couche de renfort dans la production de toiles autoroutières fait partie intégrante du processus. [19]



Figure II-5 Géo- grille routier [19]

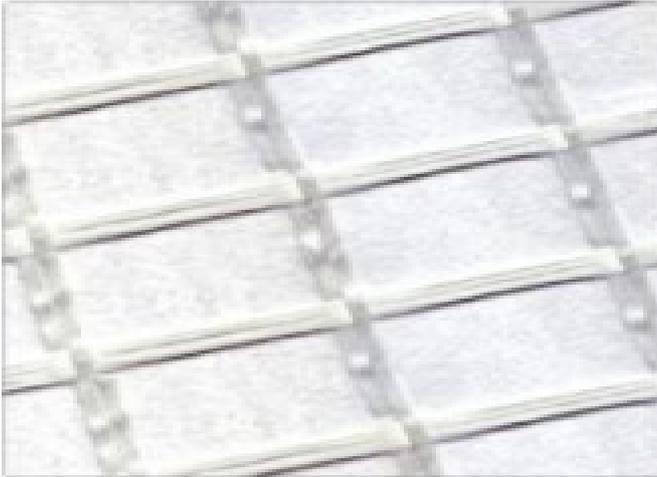


Figure II-6 Caractéristiques et géométrie de la géo-grille CIDEX 100 SB de 6D Solutions [ARS11][13]

GRILLE CIDEX 100 SB

Grille: Fibre de verre + résine (type SB) : 383 g/m²

Fibre de polyester: 17 g/m²

Résistance à la rupture: 100 KN/m

Résistance à 1% déformation: 35 KN/m

Bitume résiduel pour collage: 600 g/m² [13]

II-10 Fibres métalliques

Ce type de fibre, qui regroupe les fibres d'acier et les fibres de fonte amorphe, a été et reste encore l'objet de recherches très importantes dans le monde. On se limite aux fibres d'acier qui sont, sans doute, les plus utilisées dans le domaine du génie civil. La résistance d'adhésion entre les fibres métalliques et la matrice cimentaire influe positivement sur les propriétés mécaniques du béton renforcé par ce type de fibres. Les chercheurs ont essayé d'augmenter l'adhérence fibre-matrice par la modification de certaines caractéristiques telles que l'irrégularité de la surface, variation du diamètre, de la longueur, forme de la section et mécanisme de fonctionnement. La figure II.2 représente les différentes formes des fibres d'acier utilisées comme renfort pour les différents types de béton. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement entre 0.1 et 0.7 mm, avec des longueurs de 10 à 70 mm. On note ici que les fibres de diamètre 0.5 mm ont été utilisées dans les lieux où il y a risque de corrosion, mais leur rigidité peut causer une rupture locale de la matrice due aux contraintes de traction latérale imposées sur le béton lorsque les fibres s'arrachent à un angle aléatoire. La résistance de ces fibres varie généralement entre 700 et 2000 MPa, mais cette résistance est rarement utilisée dans le composite dû au phénomène de pull out des fibres. Les principales propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier sont regroupées dans le tableau 6.2 [10]

Tableau II-2 : Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier (BEDDAR 2007) [10]

Fibre	Acier
Diamètre moyen (en μm)	50 - 1000
Longueur (mm)	20 à 50
Masse volumique (en g/cm^3)	7,85
Résistance à la traction (en N/mm^2)	1000 - 2500
Module d'élasticité (en GPa)	150 - 200
Allongement à la rupture (en %)	3 - 4

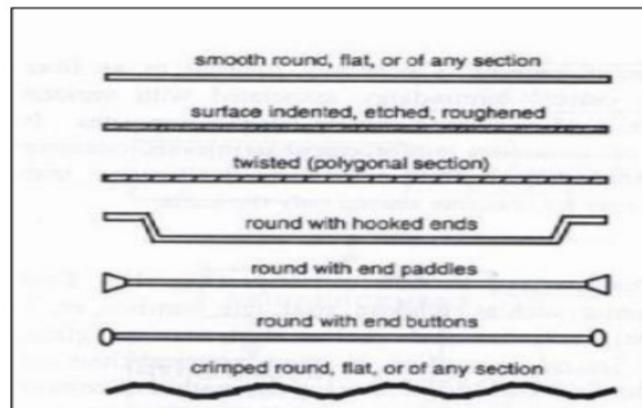


Tableau II-3 Différentes formes des fibres d'acier (BEDDAR 2007). [10]



Figure II-8 Photos de différentes fibres métalliques pour bétons (CT 2014). [10]



Figure II-9 la grille métallique [12]

II-11 Les inconvénients des fibres

Bien que les fibres présentent de nombreux avantages tels que vus précédemment, elles présentent également certains inconvénients. En Effet, l'introduction des fibres dans l'enrobé peut parfois rendre son Installation plus complexe et donc plus couteuse. De plus, étant donné que les fibres sont utilisées à faible dosage, le degré de précision peut être difficile à contrôler pour le producteur. Et finalement, cela demande plus de manipulation, donc, encore une fois, des couts supplémentaires. [20]

CONCLUSION

Les fibres sont utilisées couramment dans les usines d'enrobés bitumineux pour leurs grandes surfaces spécifiques qui donnent aux routes une résistance à la fatigue et donc, qui augmentent leur durée de vie. De plus, sont utilisées pour leurs résistances aux efforts de tensions, ce qui augmente la résistance à la fissuration des routes. Bien que les fibres soient dispendieuses et qu'elles rendent la mise en œuvre plus complexe, elles restent très utilisées pour leur avantage multiple [20]

Chapitre III L'utilisation des Polymères Dans L'enrobe Bitumineux

Est largement reconnu que les autoroutes jouent un rôle important dans le développement économique et social des sociétés, c'est pourquoi de nombreuses études visent à modifier les propriétés des chaussées. En Algérie ainsi que dans d'autres pays, les fissures de la surface des chaussées sont considérées comme un problème majeur affectant les performances des réseaux routiers. Afin d'éviter la progression de la fissuration de la couche d'asphalte, de nombreux efforts sont consacrés à l'amélioration des performances des mélanges d'asphalte, d'où l'utilisation de nombreux additifs à cet effet. Des fibres de polyester sont incorporées dans la production de mélanges d'asphalte pour améliorer la résistance des chaussées souples contre la fissuration par fatigue.

Le renforcement comprend généralement l'addition de matériaux qui ont certaines propriétés souhaitées à d'autres matériaux qui n'ont pas ces propriétés. Le renforcement en fibres a été utilisé pour supporter les charges de traction, améliorer la résistance de la chaussée à certains détresses ainsi que pour empêcher la formation et la propagation de fissure. [24]

III-1 Objectif de la modification

L'amélioration des qualités intrinsèques du liant se traduit par les effets suivants :

- Augmentation de l'intervalle de plasticité défini par les températures de Fraass et de Bille et Anneau.
- Augmentation de la cohésion du liant aux températures de service élevées.
- Amélioration des propriétés élastique donnant un meilleur comportement en fatigue et une diminution du risque d'orniérage des enrobés.
- Possibilité d'employer un dosage en liant plus élevé, propriété intéressante dans certains cas, tel celui des enrobes drainants. [25]

Cependant, toutes ces qualités ne peuvent pas être trouvées avec un bitume pur et c'est pourquoi on utilise et met au point des enrobés modifiés [Bru 1986].

III-2 Les différents agents modifiants

a) **Les polymères thermodurcissables** qui durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique (structure réticulées).



Figure III-1 les thermodurcissables [21]

b) **Les polymères thermoplastiques** qui se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible. [25]



Figure III-2 thermoplastiques [22]

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue, (rigidité, déformabilité résilience). [25]

- **Les plastomères**, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante.
- **Les élastomères** présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante.

c) **Les polymères de synthèse** il s'agit notamment de la poudrette de caoutchouc et des latex



Figure III-3 Poudrette de caoutchouc [22]

III -3 Principaux polymères utilisés en génie civil

Le tableau ci-après dresse une liste des principaux agents modifiants du bitume employés en technique routière classés par catégorie. [25]

III-4-. Bitume modifié

Un bitume modifié est un mélange de bitume et d'additif, ces additifs sont limités à des substances macromoléculaires destinées à modifier certaines propriétés intrinsèques du liant de base. Celles-ci sont en général des élastomères naturels ou de synthèse ou des plastomères.

➤ Les liants modifiés élastomères (SBS)

Les bitumes modifiés par addition de SBS ont les propriétés suivantes :

- Susceptibilité thermique très faible dans le domaine des températures de service;
- Consistance à chaud permettant une utilisation dans les conditions d'emploi;
- Cohésion plus élevée dans une gamme de température plus grande;
- Forte capacité d'allongement avant rupture, même à basse température; meilleur comportement a la fatigue. [25]

➤ Les liants modifiés plastomères (EVA)

Est utilisé depuis longtemps dans les modifications de bitume. Il est généralement ajouté à une teneur de 5 % en poids de bitume [Mur 2000, Sao 2009, Had 2008], la modification du bitume avec l'EVA est caractérisée par une diminution ainsi la susceptibilité thermique [25]

III-5 Fibres de polyester

Les fibres de polyester sont filées, non tissées et continues. Ce déchet de garniture de produit commercial a été obtenu à partir des rouleaux de polyesters utilisés pour la toiture. Sur la base des littératures mentionnées précédemment, les fibres de polyester incorporées dans le présent travail ont deux tailles de longueur de 6,35 mm et 12,70 mm avec une taille de largeur de 3,00 mm comme le montre la figure 1. La mise en œuvre de ces tailles de fibres est facilitée par l'utilisation d'une déchiqueteuse à papier. Le contenu de ces fibres a trois pourcentages; 0,25%, 0,50% et 0,75% en poids de mélange. [24]

III-6 Définition du PET

Le poly (téréphtalate d'éthylène), plus connu sous le nom anglais de polyéthylène téréphtalate (parfois francisé de manière impropre en « polyéthylène téréphtalate ») ou PET, que l'on trouve également avec l'abréviation PETE, est un polymère de type polyester saturé, par opposition aux polyesters thermodurcissables. Ce polymère est obtenu par la polycondensation de l'acide téréphtalique avec l'éthylène glycol. [26]

Polymère de synthèse produit par polycondensation de l'éthylène glycol avec l'acide téréphtalique. Cette matière plastique est principalement utilisée pour la fabrication de bouteilles, flacons, pots, films et feuilles, fibres, ... De la famille du thermoplastique, il est recyclable. [26]

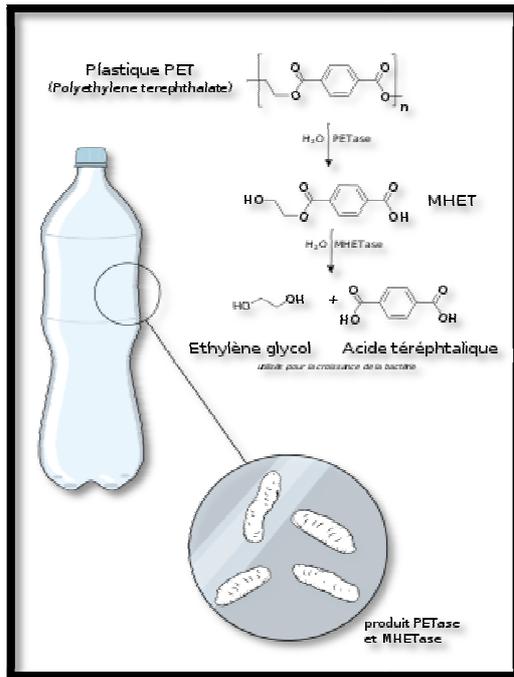


Figure III-4 Poly téréphthalate d'éthylène [27] fig III-5 Fibre de bouteille de PET

Comme vous voyez dans figure III-5 nous avons coupé la bouteille d'eau de PET en fibre de 3 cm.

Chapitre IV Partie expérimentale

Dans cette partie nous présentons l'étude expérimentale consacrée aux essais caractérisation effectués sur les granulats, le bitume et enrobé bitumineux

IV-1 Etude des granulats

Les granulats représentent près de 95% d'un enrobé bitumineux. Il est donc important de bien les caractériser afin de faire un choix optimal lors de la formulation et de la fabrication d'un enrobé performant

Dans notre étude nous avons utilisé les granulats suivants :

- Fraction G3/8, G6/10, G10/14 provenant de la carrière d'Hamman Debagh wilaya Guelma (Algérie)

IV-1-1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est un essai qui permet de déterminer les dimensions des grains et leur pourcentage.

Tableau IV-1 Analyse granulométrique Sable et gravier

TAMIS	REFUS	TAMISAT	REFUS%	TAMISAT%
3,35	1,36	295,62	0,45	99,54
2	45,56	250,06	15,34	84,20
1,4	49,03	201,03	16,50	67,69
1,18	19,26	181,77	6,48	61,20
600	60,7	121,07	20,43	40,76
300	47,8	73,27	16,09	24,67
150	32,93	40,34	11,08	13,58
63	19,77	20,57	6,65	6,92
FOND	20,57	0	6,92	0
TOTAL	296,98		100	

Sable

TAMIS	REFUS TOTAL	TAMISAT	REFUS %	TAMISAT%
14	126,13	1872,02	6,31	93,68
11,2	490,2	1381,82	24,53	69,15
10	304,56	1077,26	15,24	53,91
8	581,3	495,96	29,09	24,82
6,3	380,66	115,3	19,05	5,77
3,35	114,7	0,6	5,74	0,03
2	0,6	0	0,030	0
FOND	0	0	0	0
TOTAL	1998,15		100	

Gruvier

IV-1-2 Les caractéristiques intrinsèques et de fabrication

Les caractéristiques des différentes classes de granulats sont données par le (tableau IV-2)

Tableau IV-2 Caractéristiques des granulats

Classe Essai	3/8	6/10	8/15	Observation
Los Angeles en %	-	-	28,82	28.82 <LA<30 Faible
Micro-Deval en % Sec	2,52	1,56	5,84	MDS < 13 Très bon

Les résultats du tableau IV-2 indiquent que les fractions 3/8, 6/10, 8/15 ont des caractéristiques mécaniques moyennes.

Les granulats ont donc de moyen caractéristique mais nous pouvons les utilisés dans la fabrication des enrobés bitumineux

IV-2 Le Bitume

L'étude expérimentale a été effectuée avec un bitume de classe 40/60.

Il provient de la société de fabrication de bitume (NAFTAL)

IV-2-1 Essai sur le Bitume

Le seul essai réalisé est la Pénétrabilité

La pénétrabilité d'un liant bitumineux est la consistance (la propriété de ses diverses particules d'adhérer entre elles) exprimée comme la profondeur, en dixièmes de millimètres, correspondant à la pénétration d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

L'essai consiste à mesurer l'enfoncement d'une aiguille standard dans l'échantillon d'essai conditionné.

Les conditions opératoires s'appliquant aux pénétrations :

- Température fixée à 25°C
- Charge appliquée 100g
- Durée d'application de la charge fixée à 5s

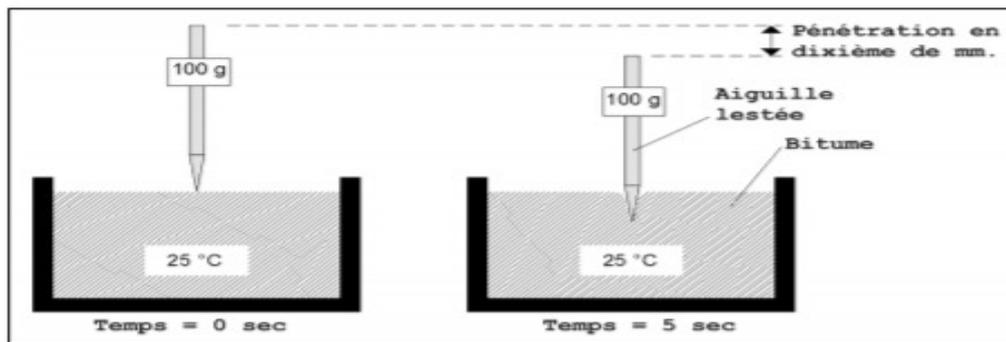


Figure IV-1 : Principe de l'essai de pénétration d'un bitume.



Figure IV-2 :L'appareil de pénétrabilité

Tableau IV-3 le résultat de l'essai

Essai	1	2	3	moyenne
Pénétrabilité (10 ⁻¹ mm)	50	48	49	49

Le résultat obtenu est montré sur le tableau IV-3 ces résultats confirment la classe (40/60)

VI-4 Enrobé bitumineux

Dans cette partie nous comptons exposer l'essai mécanique (Marshall) que nous devons effectuer sur des éprouvettes en béton bitumineux préparées à base d'un bitume pur et d'autres éprouvettes préparées avec une part du bitume remplacé par les fibres de polyéthylène téréphtalate (PET) afin d'étudier l'impact de ce dernier sur les différentes caractéristiques mécaniques (résistance, fluage...) de l'enrobé bitumineux modifié. Malheureusement, et pour les causes de restrictions d'accès au laboratoire liées à la pandémie du covid19, nous n'avons pas pu achever nos essais, nous ne présentons que les premiers.

VI-4-1 Etude de formulation de l'enrobé

Les mélanges hydrocarbonés sont constitués de deux matériaux :

- Les granulats qui constituent le squelette minéral ;

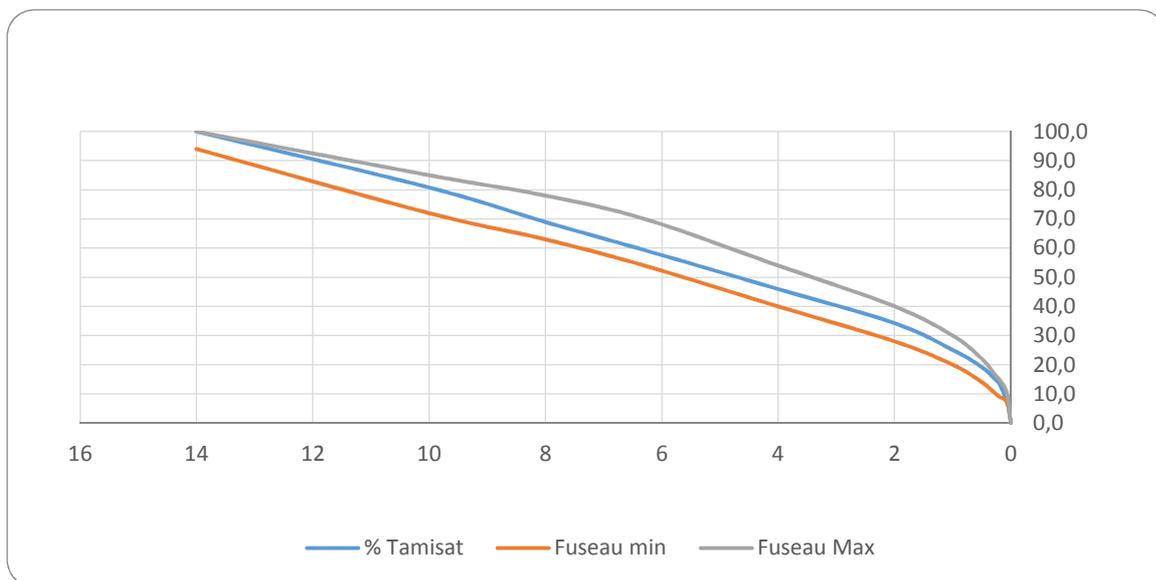
- Le bitume qui a pour but d’assurer la liaison entre ces derniers, confère aussi au mélange ses propriétés viscoélastiques.

Le travail consiste à établir :

- Un mélange optimal des différents granulats qui s’insère dans un fuseau de référence appelé «fuseau de spécification »
- Un dosage en liant qui peut envelopper toute la surface de mélange granulaire et qui résiste au phénomène de ressuage ou glaçage

Tableau IV-4 les résultats corrigé d’analyse granulométrie

Tamis	Refus	Tamisat	% Refus	% Tamisat	Fuseau min	Fuseau Max
14	0	1196,73	0	100,0	94	100
10	230	966,73	19,21903855	80,8	72	85
8	142	824,73	11,86566728	68,9	63	78
6,3	115	709,73	9,609519273	59,3	54	70
4	160	549,73	13,36976595	45,9	40	54
2	140	409,73	11,6985452	34,2	28	40
1	110	299,73	9,191714088	25,0	20	30
0,5	70	229,73	5,849272601	19,2	14	22
0,25	55	174,73	4,595857044	14,6	9,8	16
0,2	13	161,73	1,086293483	13,5	9	15
0,063	77,22	84,51	6,452583289	7,1	7	10
0	84,51	0	7,06174325			
	1196,73		100			



La courbe corrigée

VI-4-2 Détermination du teneur en liant

La teneur en liant est déterminée en pourcentage du poids des agrégats, de la surface spécifique et du coefficient de richesse par la formule suivante :

$$TL(\%) = \alpha * K * \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec $\alpha = \frac{2.65}{MVR}$ MVR : la masse volumique réelle des granulats ;

K : le module de richesse ;

Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg) ayant pour expression :

$$\Sigma = (0.25G + 2.30S + 12s + 135f)/100$$

Où

G : Pourcentage de refus supérieur ou égal à 6.3mm.

S : Pourcentage de refus compris entre 0.315mm et 6.3mm.

s : Pourcentage de refus compris entre 0.08mm et 0.315mm.

f : Pourcentage de passant à 0.08mm

Les résultats obtenus sont :

MVR _g	Σ	$\sqrt[5]{\Sigma}$	α	K	TL(%)
2.5 g	11.53	1.63	1.06	3.45	5.96

$$TL(\%) = 1.06 * 3.45 * 1.63 = 5,96$$

$$\frac{5.96 * 1196.7}{100} = 71.32$$

$$71.32 * 4 = 285,28g$$

Le 285.28g est la quantité du bitume qu'on va utiliser pour les trois éprouvettes

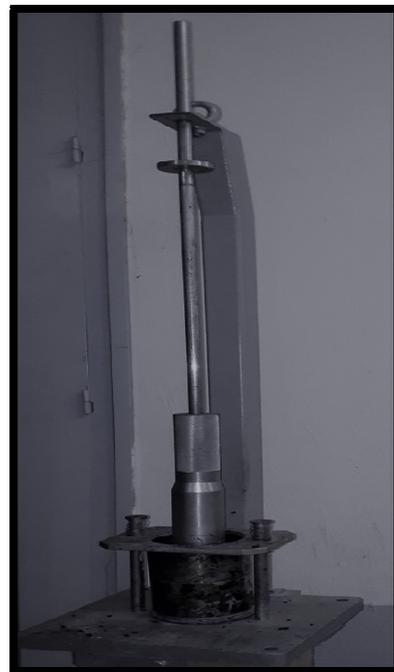
VI-4-3 Mode de fabrication des éprouvettes



Etuve



Malaxeur



compacteur

Figure IV-3 : Matériels utilisés pour fabrication les éprouvettes

Tous les matériels utilisés pour l'enrobage (moules, hausse, etc...) et les matériaux (granulats et bitume) sont chauffés à la température d'enrobage désirée (environ 160°C). Ensuite, les granulats sont pesés et homogénéisés (mélanges dans le malaxeur de quelques secondes), enfin on ajoute la quantité de bitume nécessaire et on malaxe l'ensemble jusqu'à obtenir une homogénéisation correcte, les différents poids sont déterminés à partir de la formulation visée. Ont pesé des quantités de mélange, chaque quantité correspondant à une éprouvette, ces quantités sont placées dans l'étuve pendant quelques minutes avant le moulage, les éprouvette doivent être compactées (50 coups sur chaque face) dans une plage acceptable de température donnée.

Après le compactage les éprouvettes sont refroidies pendant 15minutes sous un jet circulaire d'eau froide, maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'enrobé, on le laisse ensuite une heure à température ambiante avant démoulage.

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées vingt-quatre heures à la température ambiante sans risque de déformation, puis sont soumises aux différents essais.

Avant de commencer à réaliser les essais, on pèse les éprouvettes, puis on les mesure au moyen d'un pied à coulisse (figure IV-4) à raison de 6 mesures pour la hauteur et 3mesures pour le diamètre.

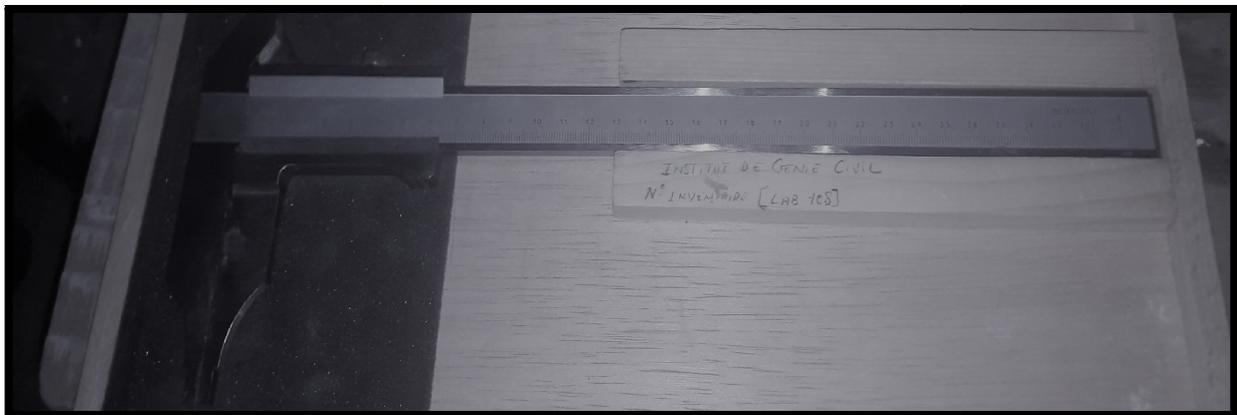


Figure IV-4 : Pied à coulisse

Dans ce tableau nous avons les mesures des éprouvettes d'enrobé

Tableau IV-5 les résultats

Poids (g)	Hauteur de l'éprouvette (mm)	Masse à l'eau g	Masse immergé g	Masse volumique Kg/dm ³	indice de vide	Densité
1174,2	64,75	1188	679	2,3068	0,027	2.307
1180,2	67,12	1195	676	2,2739	0,028	2.274
1193	66,5	1207	692	2,3165	0,027	2.317

$$M_{\text{volumique}} = \frac{\text{Masse}}{\text{Ma l'eau-Mimmerge}}$$

$$M_{\text{indice des vides}} = \frac{M_{\text{a l'eau-Masse}}}{M_{\text{a l'eau-Mimmergé}}}$$

Densité (sans unité) = M volumique (kg/dm³)

IV-5 Essais mécaniques sur l'enrobé

IV-5-1 Essai Marshall

La figure IV-5 représente la presse d'écrasement avec un enregistreur effort-déformation. L'écrasement s'est effectué à la de 0,850mm/s après avoir conservé les éprouvettes dans un bain thermique a une température de 60°C pendant 1h. Trois (03) éprouvettes ont été testées dans chaque cas.

A l'issu de l'essai, nous avons mesuré la stabilité et le fluage correspondant.

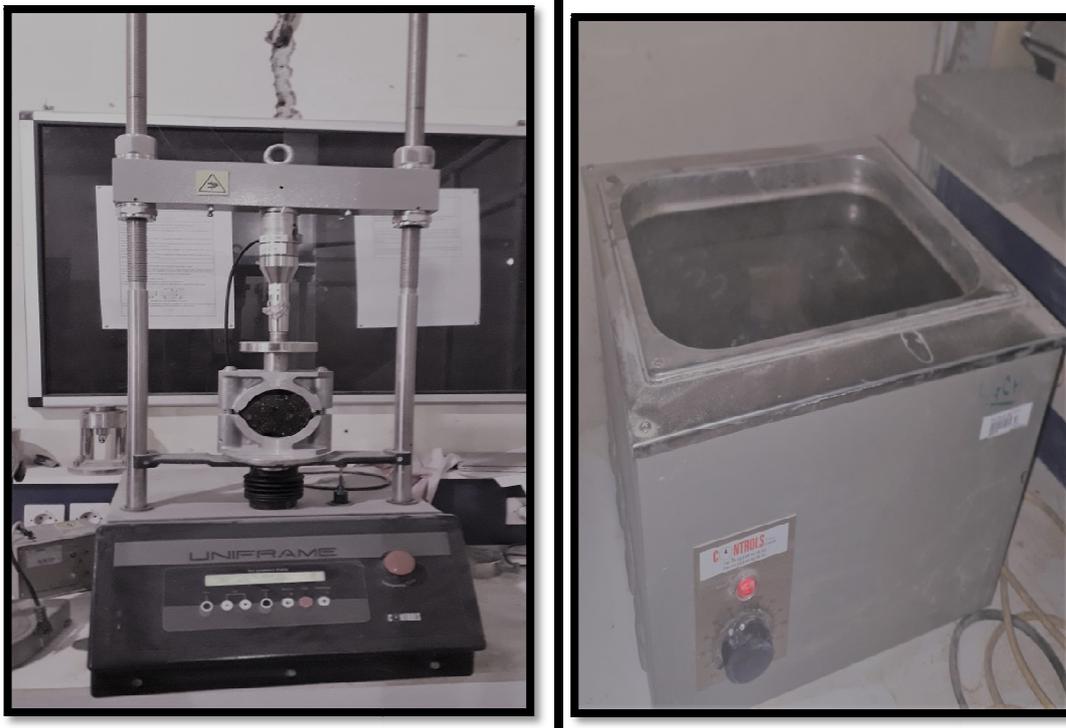


Figure IV-5 : Presse d'écrasement Bain thermique

Dans le tableau IV-3 nous avons les résultats de l'essai de Marshall sur les enrobes

Tableau IV-6 de l'essai de Marshall

	Eprouvette 1	Eprouvette2	Eprouvette3	Total
Stabilité (KN)	7.101	9.349	10.889	9.113>9
Fluage (mm)	4.07	4.78	4.40	4.41>3

La stabilité est acceptable

L'essai sur le fluage est à refaire car dans la norme anglaise BS 598 le fluage doit être inférieur ou égal à trois

Conclusion

Malheureusement et en absence de temps, ne nous pouvons réaliser d'autres essais que ceux déjà faits. Logiquement on devrait réaliser d'autres éprouvettes avec moins de bitume pour abaisser la valeur du fluage Marshall.

Conclusion générale

En premier lieu, le but de ce travail était d'étudier la possibilité d'améliorer les performances du béton bitumineux par l'incorporation de fibres issues du recyclage des bouteilles PET. C'est un travail expérimental dépendant de plusieurs paramètres, comme la disponibilité du matériel scientifique au niveau du laboratoire ou tout autre aléa imprévu.

Dans notre cas, la courante situation sanitaire mondial (Covid 19) a imposé des restrictions de travail au niveau de notre université,

Nous n'avons alors pas pu faire les essais qui ont été prévus

Le travail programmé était de renforcer l'enrobé par des fibres de PET d'une longueur de 3 cm et 2 cm, avec deux pourcentage de fibres différents 1.3%, 1.0%.

Les essais à faire étaient :

- Les essais d'identification des matériaux
 - Essai los Angeles
 - Essai micro Duval
 - Essai de pénétrabilité pour le bitume
 - Essai de ramollissement du bitume
- Formulation du béton bitumineux
- Essai Marshall
- Essai Duriez

A cause des restrictions nous avons pu réaliser seulement une partie du travail programmé

Les travaux réalisés sont les suivants :

- Les essais d'identification des matériaux
 - Essai los Angeles
 - Essai micro Duval
 - Essai de pénétrabilité pour le bitume
- Formulation du béton bitumineux

Pour la formulation on put faire l'essai de Marshall sur les éprouvettes de contrôle, qui ont donné une valeur de la stabilité 9,113 KN ce qui est correcte par rapport à la réglementation et un fluage supérieur à 3 (4.41 mm). Ce qui n'est pas admissible dans la formulation. Cela est causé par une forte teneur en liant 5,96%, pour avoir un fluage conforme, on devait refaire la formulation avec une teneur en bitume réduite.

Malheureusement, on n'a pas eu le temps de le faire

le sujet traité dans cette étude est très intéressant et sur plusieurs angles, il nous a déjà permis de se familiariser avec l'environnement d'un laboratoire de recherche et d'essais, de se faire une idée des difficultés rencontrées chaque jour par les chercheurs. Ce travail nous a aussi permis d'avoir une initiation au traitement des résultats expérimentaux et de leur analyse et interprétation. On espère pouvoir poursuivre ce travail de recherche et même si d'autres étudiants le feront dans le future on serait très contents d'en connaitre les résultats.

Références bibliographiques

- [1] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Bitume> (15/06/2019) Consulté le 01/01/2020
- [2] Boukra Bettayeb.O ECO (Formulation et caractéristique d'un béton bitumineux à base des matériaux université Ahmed Draia Adrar
[https://dspace.univadrar.dz/jspui/bitstream/123456789/2326/1/PFE.BB.BOUKRA A%20BETTAYEB%20.ALLAOUI.%20Formulation%20et%20Caract%C3%A9ristique.pdf](https://dspace.univadrar.dz/jspui/bitstream/123456789/2326/1/PFE.BB.BOUKRA%20BETTAYEB%20.ALLAOUI.%20Formulation%20et%20Caract%C3%A9ristique.pdf)
(07/09/2020)
- [3] <https://www.wikip.fr/essais-de-sol/les-differentes-couches-de-chaussee>
(10/01/2014) Consulté 07/09/2020
- [4]https://img.via-mobilis.com/10/concasseur_crible.jpg(01/01/2020)Consulté 09/08/2020
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Liant> le 28 décembre 2019 Consulté (07/09/2020)
- [6] Henga.B Rapport de stage à L' ETRHB vieux Kouba ITTPB 2006
https://www.memoireonline.com/12/07/783/m_rapport-de-stage-ETRHB17.html
- [7] <http://www.guidebeton.com/beton-bitumineux> (01/01/2020)
- [8] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Enrob%C3%A9> (19/07/2019) Consulté 02/01/2020
- [9] Addaci.B Comproement mecanique des enrobés Bitumineux renforces par la fibre de verre (Université de Batna 2008)
[file:///C:/Users/abdqa/HP/Downloads/inj%20ADDACI%20BADRA%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/abdqa/HP/Downloads/inj%20ADDACI%20BADRA%20(2).pdf)
- [10] Pierre T ;Darchies ing.Msc fabrication des enrobés (sintra mise en place montreal 2006)
<http://www.bitumequebec.ca/wpcontent/uploads/2015/06/fabricationenrobes.pdf>
(le 09/08/2020)
- [11]<https://www.axess-industries.com/bennes-a-fond-ouvrant/benne-a-fond-ouvrant-1-trappe-p-120506.1-600x600.jpg> Consulté (le 09/08/2020)
- [12]<https://www.sitechfrance.fr/wpcontent/uploads/2018/08/21.jpg>
Consulté (le09/08/2020)
- [13] Ioana-M.A, Cyrielle.C Eco (Modélisation du comportement en fatigue d'un béton bitumineux renforcé par géo-grille) XX^e Rencontre Universitaire de génie civil. Chembery, 8juin 2012

<http://www.6dsolutions.com/wp-content/uploads/2015/05/article-augc.pdf>

Consulté (02/01/2020)

[14]<https://www.rdsfrance.com/wp-content/uploads/2018/03/benne-chauffante-enrobe-asphaltherm-60s.jpg> (le 09/08/2020)

[15] Benouah. A (Etude du comportement d'un béton compacté au rouleau armé de fibre) Université de M'sila Faculté de Technologie 24/07/2019

http://these.univ-msila.dz/pmb/opac_css/doc_num.php?explnum_id=1117

[18]<https://www.lemoniteur.fr/mediatheque/9/6/5/001455569.jpg>(le 09/08/2020)

[19]<https://fre.mentorbizlist.com/4049725-road-geogrid-application-and-properties> (02/01/2020) Consulté (03/01/2020)

[20] Julie. H, Bianca breton- Lessard (Les Fibres dans les Enrobés Bitumineux) Technologie du génie civil Cégep Limoilou le 17/10/2016

https://www.academia.edu/29246903/Les_fibres_dans_les_enrob%C3%A9s_bitumineux (19/08/2020)

[21]<https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn%3AANd9GcQLyN4iX3LlteA6yDPJ6GRGCCito-ZVTwRV5g&usqp=CAU> (19/08/2020)

[22]https://cdn.futurasciences.com/buildsv6/images/wide1920/6/8/0/68018813d4_50148134_thermoplastique-bouteille.jpg (19/08/2020)

[23] Hiba M. AL-Taher (Renforcement du béton bitumineux par des fibres de polyester pour améliorer la résistance à la fatigue par flexion

[24] Shunzhi. Q (Effet de renforcement des fibres sur le liant bitumineux à basse température) article dans construction et building matériels juin 2014

[25] Chinoun. M (influence de l'association EVA-NBR sur le bitume modifié et les enrobes bitumineux modifiés) Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediene le 21/04/2012

[26]https://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/polyethylene_terephthalate_pet.php4 (02/07/2018) Consulté le (18/09/2020)

[27]https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a3/Ideonella_sakaiensis_PTEase.svg/300px-Ideonella_sakaiensis_PTEase.svg.png