

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



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

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

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par :

TADJER Amina Imen

&

SIDJILANI Chahinaze

Sujet du mémoire

**VALORISATION DES DECHETS PLASTIQUES DANS LA
FABRICATION DES BITUMES ROUTIERS**

Soutenu, le Octobre 2020, devant le jury composé de :

M. SERBAH B.

Président

M. BEKKI H.

Rapporteur

M^{me} DRAOUI A.

Examineur

M^{lle} RENNAK Z.

Examineur

PROMOTION: **2019/2020**

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout **ALLAH** le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures Conditions.

Nous tenons à remercier notre encadreur M. BEKKI H. pour son aide et ses conseils durant la préparation de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement les dirigeants de l'entreprise GBS Tiaret, en particulier, l'ingénieur de laboratoire M. Hicham, de nous avoir permis de réaliser une partie du travail expérimental.

On tient à remercier vivement M. SERBAH.B pour nous avoir fait un grand honneur de présider notre jury de soutenance. Nous exprimons nos remerciements à M^{elle} RENNAK Z. et M^{me} DRAOUI.A qui nous ont fait l'honneur d'être examinatrices de notre travail.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants qui nous ont accompagnés durant notre formation.

Enfin, nos pensées à tous ceux qui nous ont aidé, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents
(mon père et ma mère) et mes sœurs et mon
frère qui m'ont servi de guide*

*Par leurs conseils et leur soutien morale et
affectif.*

A ma famille et mes proches

N'oublie pas mes nièces et neveu

(Nacera ; Mahboub et Batoulle)

*A tout ceux qui me sont chers et qui m'ont
soutenu et accompagné durant mes années*

D'études.

Sidjilani chahinez

Dédicace

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail de fin d'étude :

*A la mémoire de la personne que j'aurais aimé qu'elle y assiste car c'était son souhait qui l'attend passionnément avec ses prière que je l'ai manqué mais dieu a voulu autrement, ma chère **grande mère** que dieu la garde dans son vaste paradis.*

*A la mémoire de mon **grand-père** que dieu le garde dans son vaste paradis*

A mon très cher père

Tu as été et tu seras toujours un exemple pour moi par tes qualités humaines, ta persévérance et perfectionnisme.

Aucune dédicace ne saurait exprimer mes respects, ma reconnaissance et mon profond amour.

Puisse dieu vous préserver et procurer santé et bonheur.

A ma très chère mère

Source de tendresse, de patience et de sacrifice. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.

J'espéré ne jamais te décevoir ni trahir ta confiance et tes sacrifices

Puisse dieu tout puissant te préserver et t'accorder santé longue vie et bonheur.

*A mes frères **Fayçal Imad Eddine, Mohammed Islam, et Madjid Abd El Illah,** que Allah les aide à réaliser leurs rêves.*

*A ma chère **grand- mère** et mon cher **grand père** qui je les souhaite une guérison rapide et une longue vie.*

*Au mes ami(e)s, **Amína, Souheyla, Yanis, Ilies, Oussama,** et a ma chère amie **Djamila.***

*A mes chers oncles et tantes, et toute la famille **Tadjer** de près ou de loin.*

Tadjer Amína Imen

Résumé

Les déchets plastiques menacent de plus en plus notre environnement. En effet, un tiers des déchets plastiques produits dans le monde chaque année finit dans la nature (décharges, sur les routes, dans les parcs, dans les mers et les rivières). Par conséquent, les effets et les dommages du plastique reçoivent une attention généralisée et croissante en tant que polluant à grande échelle.

Dans le cadre de la stratégie du développement durable, le Polytétréphthalate d'éthylène (PET), de part sa nature, peut être utilisé en construction routière ; soit comme additif au bitume, soit comme agrégat dans le mélange d'enrobé.

Dans ce travail, on propose de valoriser le déchet plastique de type PET dans les bitumes routiers afin d'améliorer ses caractéristiques techniques. Le travail consiste à ajouter le plastique broyé, par dispersion, au bitume pur avec des proportions de 1,5% à 4% par rapport à la masse du bitume, puis déterminer les caractéristiques physiques du mélange obtenu (bitume modifié).

Il a été trouvé que l'ajout d'additifs au bitume pur, à raison de 3 à 4,5%, améliore ses caractéristiques physiques (point de ramollissement, Bille et anneau) et donne des résultats proches à ceux de l'additif industriel PRPlast.

Mots-clés : Bitume routier, modification, déchet plastique, essais d'identification, développement durable.

Abstract

Plastic waste is increasingly threatening our environment. Indeed, a third of plastic waste produced in the world each year ends up in nature (landfills, on roads, in parks, in seas and rivers). Therefore, the effects and damage of plastic are receiving widespread and increasing attention as a pollutant on a large scale.

As part of the sustainable development strategy, PolyEthylene Terephthalate (PET), by its nature, can be used in road construction; either as an additive to bitumen or as an aggregate in the asphalt mix.

In this work, it is proposed to value plastic waste (PET-type) in road bitumen in order to improve its technical characteristics. The work consists of adding the crushed plastic, by dispersion, to the pure bitumen with proportions of 1.5% to 4.5% compared to the mass of the bitumen, then determining the physical characteristics of the resulting mixture (modified bitumen).

It has been found that the addition of additive to pure bitumen, at a rate of 3 to 4.5%, improves its physical characteristics (Penetration test and Softening point test) and gives similar results to those of the industrial additive PRPalst.

Keywords: Road bitumen, modification, plastic waste, identification tests, sustainable development.

ملخص:

تهدد النفايات البلاستيكية بيئتنا بشكل متزايد، حيث ينتهي ثلث النفايات البلاستيكية التي يتم إنتاجها في العالم كل عام في الطبيعة (مدافن القمامة، على الطرق، في الحدائق، في البحار والأنهار)، لذلك تحظى مخلفات البلاستيك باهتمام كبير باعتباره ملوثاً واسع النطاق.

كجزء من استراتيجية التنمية المستدامة ، يمكن استخدام نفايات البلاستيكية (PET) في بناء الطرق ؛ إما كمادة مضافة في الزفت أو كمضاف في خليط الأسفلت.

في هذا العمل، يُقترح إعادة تقييم النفايات البلاستيكية من نوع PET في خليط الاسفلت من أجل تحسين خصائصه التقنية. يتكون العمل من إضافة البلاستيك المطحون بواسطة النشر إلى الزفت الخالص بنسب تتراوح من 1.5٪ إلى 4٪ بالنسبة إلى كتلة الزفت ، ثم تحديد الخصائص الفيزيائية للخليط الناتج (الزفت المعدل).

وجد أن إضافة جزيئات PET إلى الزفت الخالص بمعدل 3 إلى 4.5٪ يحسن خصائصه الفيزيائية (نقطة التليين ، الكرة والحلقة) ويعطي نتائج مماثلة لتلك الخاصة بالمضافات الصناعية. PRPlast

الكلمات المفتاحية:

زفت الطريق ، التعديل ، النفايات البلاستيكية ، تجارب التصنيف ، التنمية المستدامة.

Sommaire :

Remerciement	I
Dédicace	II
Résume	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Sommaire	VII
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XII
Introduction	1

CHAPITRE I : Les déchets plastiques

I.1.Introduction :	4
I.2. historique du plastique:	4
I.3. Obtention des polymères (polymérisation)	7
I.3.1 Polyaddition (polymérisation en chaîne) :	7
I.3.2 polycondensation (Polymérisation par étapes):	8
I.4. classification des polymères :	9
I.4.1 selon l'origine:	9
I.4.2 Selon le domaine d'application :	9
I.4.3 Selon la nature chimique :	9
I.4.4. Selon l'architecture de leur chaine et structure moléculaire :	9
I.5. Différents types de plastiques (polymères) :	12
I.5.1 Thermoplastiques :	12
I.5.2 Thermodurcissables :	12
I.5.3 Elastomères :	14
I.6. Propriétés des différents plastiques :	14

I.7. Importance et domaine d’application des polymères :	16
I.7.1 Importance :	16
I.7.2 Domaine d’application :	18
I.8. Identification des plastiques :	19
I.9 recyclage du plastique :	20
I.9.1 Différentes méthodes de recyclage :	20
I.9 Déchets plastiques	20
I.9.1 Déchets plastiques industriels	20
I.9.2 Déchets plastiques de post-consommation	20
I.10.2 Quelles sont les plastiques recyclables ?	22
I.10.3 Le cycle de recyclage du plastique :	22
I.11. Conclusion :	23

CHAPITRE II : Généralités sur les Bitume

II.1. Définition :	25
II.2. Historique :	25
II.3. Origine et fabrication des bitumes :	26
II.3.1. Origine de bitume :	26
II.3.2. Fabrication des bitumes :	27
II.4. Bitume en Algérie :	29
II.4. Classification des bitumes :	29
II.5. Structure physico-chimique :	30
II.6. Structure colloïdale du bitume :	32
II.7 Différentes Structures constituant le bitume :	33
II.7.1 Structure de type 01 « SOL » :	33
II.7.2 structure de type 02 « GEL » :	33
II.7.3 Structure de Type 03 « SOL – GEL » :	34
II.8. Vieillessement des bitumes :	35

II.8. 1. Mécanisme :	35
II.8. 2. Evolution lors de l'enrobage, du compactage et de la mise en service :	36
II.8. 2 Essai de vieillissement RTFOT (Normes NF EN 12607-1) :	37
II.8.3. Facteurs affectant le vieillissement des bitumes :	37
II.9. Relation entre la composition, la structure et le comportement viscoélastique des bitumes :	38
II.10. Propriétés	38
II.11. Caractérisation	39
II.11.1. Essais américains SHRP (Strategic Highway Research Program) :	40
II.12. Essais classiques sur le bitume :	41
II.13. Les bitumes modifiés :	41
II.13.1. Avantages des bitumes modifiés :	41
II.13.1. Bitumes modifiés aux polymères :	42
II.13.2. Différents agents de modification :	42
II.13.2. Evolution des caractéristiques mécaniques des bitumes modifié :	42
II.14. Conclusion	43

CHAPITRE III : Les applications des produits bitumineux

III.1. Introduction:	45
III.1.1. Rôle du bitume dans la chaussée :	47
III.2 Les chaussées :	47
III.2.1. Définition :	47
III.2.2. Les différentes structures de chaussées :	48
III.2.2. 1. Chaussées souples :	48
III.2.2.2. Chaussées semi-rigides :	49
III.2.2.3. Chaussées rigides :	50
III.2.3. Les chaussée avec bitume modifia :	50
III.2.4. les Enrobés :	51

III.2.4.1.Fabrication d'enrobé :	52
III.2.4.2.Enrobe à module élevé (EME) :	53
III.3.Conclusion :	54
<i>CHAPITRE IV : Présentation des essais et interprétation des résultats</i>	
IV.1.Introduction :	56
VI.2. Les additifs utilisés :	56
IV.3. Protocole de modification du bitume :	57
VI.4. L'essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426):	58
IV. 5. L'essai de point de ramollissement (NF EN 1427):	60
IV.6. Analyse des Résultats:	64
IV.6.1 Essai de pénétrabilité à l'aiguille :	64
IV.6.2 Essai Bille et anneau :	65
IV.6.3 Essai de ductilité :	66
IV.7.Conclusion :	66
Conclusions générales	68
Références bibliographiques	70

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Photo montrant une Collection d'objets en parkésine, conservée par le musée de science (à Londres).....	- 5 -
Figure I.2: Types de homopolymères -a- linéaires -b- branchés -c- étoilé	- 10 -
Figure I.3: Modes de copolymères : -a- statistique -b-alterné -c-séquencé -d-greffé	- 11 -
Figure I.4: Représentation schématique de polymères ramifiés	- 11 -
Figure I.5: polymère amorphe Figure 6: polymère cristallin	- 12 -
Figure I.7: Structure des matières plastiques	- 13 -
Figure I.8: Types de plastiques	- 15 -
Figure I.9: la production du plastique	- 19 -
Figure I.10: Schéma de recyclage du plastique.....	- 23 -

Chapitre II

Figure II.2: Fabrication des bitumes	- 27 -
Figure II.3: Séparation par familles chimiques des constituants du bitume.....	- 31 -
Figure II.4: Structure de saturé.....	- 31 -
Figure II.5: structure des aromatiques.....	- 32 -
Figure II.6: structure des asphaltènes	- 30 -
Figure II.7: Etat colloïdal des bitumes	- 33 -
Figure II.8: Structure « SOL » « GEL ».....	- 34 -
Figure II.9: Représentation de la structure colloïdale (Sol-Gel) du bitume	- 34 -
Figure II.10: Vieillissement de l'enrobé bitumineux au cours du temps.	- 37 -
Figure II.11: Classe de comportement du bitume	- 39 -

Chapitre III

Figure III.1 : schéma d'une structure de chaussée	- 48 -
Figure III.2: Schéma d'une structure de chaussée souple.	- 49 -
Figure III.3: Schéma d'une structure de chaussée semi-rigide	- 49 -
Figure III.4: Schéma d'une structure de chaussée rigide.	- 50 -
Figure III.5: Photo pour une chaussée routière	- 51 -

Figure III.6: La composition d'enrobé.....	- 51 -
Figure III.7: Classification des enrobées.....	- 52 -
Figure III.8: Centrales d'enrobés fixes.....	- 53 -

Chapitre IV

Figure IV.1: Additifs Utilisés : (a) PET recyclé ; (b) PRPlast.....	- 56 -
Figure IV.2: Schéma explicatif du protocole de modification du bitume.....	- 57 -
Figure IV.3: Photo montrant : (a) le bac chauffant ; (b) le dispersent ; (c) le capteur de température.....	- 57 -
Figure IV.4: photo montrant l'appareillage utilisé pour l'essai de pénétrabilité	- 58 -
Figure IV.5: Photo montrant le mode opératoire de la pénétrabilité à l'aiguille.	- 59 -
Figure IV.6: Photo montrant l'appareillage et mode opératoire de TBA.....	- 61 -
Figure IV.7: Dimensions du moule de l'essai de ductilité	- 62 -
Figure IV.8: photo montrant l'appareillage et mode opératoire de ductilité.....	- 63 -
Figure IV.9: Comparaison des résultats d'essais de pénétrabilité sur les différents échantillons de bitume.....	- 65 -
Figure IV.10: Comparaison des points de ramollissement des différents échantillons de bitume.....	- 65 -
Figure IV.11: Comparaison des résultats d'essais de ductilité sur les différents échantillons de bitume.....	- 66 -

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1: Tableau détaillé de l'histoire de plastique.....	- 6 -
Tableau 2: Principales matières plastiques.....	- 14 -
Tableau 3: propriétés des thermoplastiques	- 16 -
Tableau 4: propriétés des thermodurcissables.....	- 17 -
Tableau 5: propriétés des élastomères.....	- 17 -
Tableau 6: domaine d'application des plastiques.....	- 20 -
Tableau 7: matériaux, abréviations, numérotations.	- 21 -

Chapitre II

Tableau 8 : Différent types de bitumes en fonction de la composition chimique.....	- 35 -
Tableau 9: Spécifications françaises des bitumes purs (NF T 65-001).....	- 40 -

Chapitre IV

Tableau 10: dimensions normalisées des gobelets.....	- 60 -
Tableau 11: Résultats d'essai de pénétrabilité à l'aiguille	- 60 -
Tableau 12: résultat de l'essai bille-anneau	- 62 -
Tableau 13: les résultats obtenus par l'essai de ductilité	- 64 -

Introduction Générale

Introduction Générale

Le plastique est un matériau polyvalent apparu sur le marché au début du XXe siècle, et il se caractérise par sa solidité et sa durabilité, car il s'agit d'un matériau polymère; Autrement dit, il se compose de particules de grande taille liées par des liens sans fin sous la forme de longues chaînes. Parmi ses qualités, on cite : l'hygiène, résistance aux chocs et aux variations de température, facilité de mise en forme, imputrescibilité, etc. Ces qualités lui ont rapidement permis de se rendre indispensable. Aujourd'hui, il est présente partout autour de nous, des pots de yaourt aux bouteilles de lait en passant par les jouets, les ustensiles de cuisine, le matériel de sport ou encore les fournitures scolaires.

Mais sa suprématie commence à être remise en question, parce que les déchets plastiques menacent de plus en plus notre environnement. En 2019, une étude du World WildlifeFund (**Futura-sciences**) rapportait qu'un tiers des déchets plastiques produits dans le monde chaque année finit dans la nature (décharges, sur les routes, dans les parcs et dans les plans d'eau), mais il faut plusieurs années pour se dégrader en fines particules de plastique. Par conséquent, les effets et les dommages du plastique reçoivent une attention généralisée et croissante en tant que polluant à grande échelle.

Le terme matière plastique s'applique à une large gamme de polymères parmi lesquels le polyéthylène Téréphtalate (PET), l'une des résines thermoplastiques les plus répandues dans le monde, dont sont faites les bouteilles plastiques.

D'autre part, le réseau routier est l'une des principales préoccupations des pays de l'ère moderne, car ce sont les artères par lesquelles passe un continuum d'activités commerciales, sociales et culturelles qui améliorent le cours de l'économie nationale. Par conséquent, les projets de construction de routes occupent le premier choix dans les programmes et projets de développement durable pour les pays qui souhaitent atteindre des taux de développement et de croissance plus élevés.

Avec l'augmentation du trafic routier, il en va de même pour l'utilisation de la chaussée, cela conduit à la détérioration de l'infrastructure routière. Par conséquent, les performances structurelles et fonctionnelles des chaussées doivent être améliorées pour réduire les travaux d'entretien qui ont conduit à l'épuisement des ressources naturelles, en particulier, des matières premières, ce qui a conduit à la détérioration de l'environnement.

Nous avons pensé à répondre à ces deux problèmes (pollution plastique et dégradation de la route) pour améliorer les performances structurelles et fonctionnelles des chaussés. Ainsi, les déchets plastiques seront utilisés pour améliorer les propriétés du mélange d'asphalte utilisé dans la chaussée.

Introduction Générale

Pour réaliser cet objectif, nous avons décidé d'ajouter des particules de plastique PET au bitume chaud et d'évaluer les modifications engendrées par le biais des essais d'identification des bitumes durs.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres ; les trois premiers présentent une revue bibliographique sur les déchets plastiques, les bitumes ainsi que les applications des produits bitumineux. Le dernier chapitre est réservé à la présentation et à l'interprétation des résultats.

Nous terminons notre mémoire par des conclusions générales sur les principaux résultats auxquels nous sommes arrivés et enfin des perspectives quant à la continuité de ce travail.

Chapitre I



Les déchets plastiques

I.1 Introduction :

Les matériaux plastiques ont vu un développement extraordinaire à cause de ses propriétés très attractives et versatiles mais par conséquent la production de déchets plastiques augmente, Un problème social croissant en raison de la pollution de l'environnement et de l'épuisement des sites d'enfouissement, car ils peuvent prendre jusqu'à des milliards d'années pour se dégrader naturellement à cause de sa stabilité ce qui nous oblige de chercher des moyens d'élimination de cette matière.

Dans ce chapitre nous allons voir des définitions sur les plastiques et leurs déchets qui sont importants pour cette recherche.

I.2 historique du plastique:

Le plastique est une matière synthétique fabriqué à partir d'un polymère, qui peut être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de produire un objet souple ou rigide. On appelle polymère une macromolécule constituée de longues chaînes carbonées d'unités fondamentales appelées monomères reliées par des liaisons covalentes (Weiss, 2009).

La majorité du plastique utilisé dans le monde est fabriqué à partir de charbon, pétrole ou de gaz naturel.

L'histoire de l'invention de cette substance débute en 1838 lorsque Henri Regnault (Weiss, 2009) a synthétisé du PVC (Poly Chlorure de Vinyle) pour la première fois par accident. Mais le succès n'est pas immédiat et cette découverte reste sans suite, un an après (1839), le chimiste américain Charles Goodyear et le Britannique Thomas Hancock (Weiss, 2009) inventent le procédé de vulcanisation du caoutchouc par le soufre pour le rendre plus durable ensuite la mise au point du parkésine en 1860 par Alexander Parkes (Weiss, 2009), un matériau pouvant être solide, liquide, rigide, résistant à l'eau, opaque, qui l'a présenté à l'exposition internationale de 1862 à Londres.



Figure I.1.: Collection d'objets en parkésine, conservée par le musée de science (à Londres)

C'est en 1869 que les frères Hyatt (**Weiss, 2009**) ont mis au point le celluloïd qui est considéré comme la toute première matière plastique artificielle à l'occasion d'un concours lancé quelques années plus tôt par la société Phelan & Collender. En effet, la guerre de Sécession empêche l'importation de l'ivoire d'éléphant dont la société a besoin pour la fabrication des boules de billard. Elle promet alors une récompense de 10000 dollars à celui qui trouverait un matériau capable de remplacer l'ivoire. En 1872 que le chimiste allemand Eugen Baumann (**Weiss, 2009**) découvre qu'il était possible de polymériser le chlorure de vinyle par erreur, il en laissa une bouteille exposée au soleil et c'est alors que se forma un composé solide de couleur blanche. En 1889 Jean-Jacques Trillat obtient de galalithe en durcissant la caséine (protéine du lait).

En 1890, les Anglais Cross et Bewandécouvrent (**Weiss, 2009**) une matière très filable et de consistance très sirupeuse qu'ils appellent Viscose. Plusieurs d'autres matériaux sont inventés à base de matière naturelle la cellulose et la galalithe. Mais la grande percée - sans doute la naissance de l'ère des plastiques modernes - est survenue en 1909, avec l'invention de la bakélite nom commercial de la résine synthétique à base de phénols et de formaldéhyde par l'américain d'origine belge Leo Baekeland (**Weiss, 2009**). C'était le premier plastique qui est qualifié de 100% synthétique - le premier à être dérivé non pas de plantes ou d'animaux, mais de combustibles fossiles, depuis sa création a substitué de nombreux matériaux tels que la porcelaine ou encore le celluloïd vu de ses propriétés étonnantes marque le début de l'industrie des plastiques qui se développera au cours du XXe siècle. On commence par la cellophane inventée par l'ingénieur chimiste suisse

Jacques Edwin Brandenberger (**Weiss, 2009**), Puis les découvertes se sont succédé, le tableau suivant détaille l'invention de différents types de plastiques et qui présente une brève chronologie de l'évolution des plastiques :

Tableau I.1.: Tableau détaillé de l'histoire de plastique

INVENTION	DATE	HISTORIQUE
Caoutchouc	1736	Caoutchouc naturel découvert par le français Charles Marie en mission au Pérou.
Nitrate de cellulose	1833	Première application industrielle de poudre de coton par l'allemand Schönbein
Vulcanisation	1839	Stabilisation des propriétés du caoutchouc le rendant utilisable par l'américain Goodyear
Gutta-Percha	1843	Inventé par William Montgomerie
Caoutchoucs artificiels	1860	Isolation de l'isoprène par l'anglais Williams
Acétate de cellulose	1869	Les frères HYATT fabriquent des boules de billard en mélangeant à chaud un plastifiant le camphre et une substance végétale la nitrocellulose
Bakélite	1907	Premier véritable phénol-formaldéhyde en plastique, Inventé par Leo Hendrik Baekeland
La cellophane	1908	premier matériau souple et parfaitement transparent Inventé par Jacques E. Brandenberger
PVC	1913	Polymérisation du chlorure de vinyle par l'allemand Klatt.
Polymères	1922	Mise en évidence de la structure particulière des polymères par l'allemand H. Staudinger
Plexiglas	1924	Barker et Skinner obtiennent un verre organique le poly méthacrylate de méthyle connu sous le nom de plexiglas
Polystyrène	1933	Mise au point par l'allemand Wuff
Polyéthylène basse densité ou LDPE -	1935	Inventé par Reginald Gibson et Eric Fawcett
Polyamide (nylon, kevlar)	1935	Mise au point chez Du Pont de Nemours(USA) les premières fibres polyamides par W.Carothers

Polyuréthanes	1937	Inventés par Otto Bayer
Téflon	1938	Le Tétrafluoréthylène (téflon) est découvert par R.J.Plunkett ingénieur chez Du Pont de Nemours
Polyesters	1938	Premières polyesters thermodurcissable par Ellis
Polyéthylènes	1939	Première gammes de polyéthylènes basse densité(PEBD) obtenues par Fawcett et Gobson suivit du polyéthylène Haute Densité(PEHD) par l'allemand Karl Ziegler en 1953
Polyester insaturé (PET)	1942	également appelé PET - breveté par John Rex Whinfield et James Tennant Dickson
polypropylène (PP)	1954	Polymérisation du propylène par l'italien Natta
Polyuréthane thermoplastique (Estane)	1961	BF Goodrich).
polyamide(Kevlar).	1965	léger et particulièrement résistant à la déchirure, aux chocs, au feu et à la corrosion (StephanieKwolek et H.blades de Du Pont de Nemours)
PEba	1981	Nouvelle famille de matières synthétiques créée par Gérard Deleens, intermédiaire entre les élastomères (caoutchouc) et les plastiques
ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène)	1990	remplace peu à peu les « mélamineformol ». Très utilisé en habillage d'équipements électroménagers, jouets rigides, enjoliveurs, accessoires de salles de bains et dans l'industrie.

I.3 Obtention des polymères (polymérisation) :

La polymérisation c'est le processus de transformation d'un monomère ou d'un mélange d'un polymère de masse molaire plus élevée. Elle désigne plusieurs réactions chimiques organiques successives pour obtenir des motifs de répétition identique ou différente grâce à la présence de réactifs, de catalyseurs et à l'action de la chaleur et de la pression. (Ngono-Ravache, 2007).

Il existe deux grandes voies de polymérisation : la polymérisation en chaîne et la polycondensation.

I.3.1 Polyaddition (polymérisation en chaîne) :

La polyaddition est une réaction qui permet de relier consécutivement les monomères, par additions successives et contrôlées, sur une extrémité de la chaîne macromoléculaire.

La nature du monomère situé à cette extrémité détermine également le nom de la réaction. S'il s'agit d'un radical chimique (c'est-à-dire avec un ou plusieurs électrons non reliés sur sa couche externe), la polyaddition est aussi appelée polymérisation radicalaire. A contrario, si cette extrémité est ionique, on parle de polymérisation anionique ou cationique. La polyaddition se divise en trois phases majeures :

- **La phase d'amorçage**, au cours de laquelle un activateur chimique se lie à un monomère, et forme un centre actif qui définit le point de départ de la polymérisation.
- **La phase de propagation**, qui voit le monomère activé se mettre en relation avec le dernier monomère récupéré en fin de chaîne, et augmenter progressivement la masse du polymère en formation (qui possède ici la même structure que les monomères, puisqu'aucune molécule n'est éliminée durant le processus).
- **La phase de terminaison**, durant laquelle un agent chimique permet au polymère de désactiver le monomère situé à l'extrémité de la chaîne moléculaire.

Plus de 90% de la production mondiale de matières plastiques s'effectue avec des composés issus d'une polyaddition (**Paprec group**).

I.3.2 polycondensation (Polymérisation par étapes):

La structure de certains monomères peut présenter ce qu'on appelle en chimie des groupes fonctionnels, c'est-à-dire un atome, ou un groupe d'atomes, dont les propriétés chimiques restent similaires au sein de composés différents, et peuvent réagir ensemble. Au cours d'une opération de polycondensation, les monomères présentant des groupes fonctionnels réagissent entre eux de manière aléatoire, à l'aide d'un catalyseur chimique (un acide, par exemple) et d'une série d'étapes de condensation, qui se chargent d'éliminer les molécules indésirables, comme celles de l'eau. Les monomères forment alors de petites sections de chaînes qui vont progressivement s'associer, tronçon par tronçon, se transformer en dimères (une molécule ne comportant que deux sous-unités), en trimères, en oligomères, et enfin en polymères artificiels à chaîne longue (ou polymères séquencés). La masse molaire (ou quantité de matière) augmente donc au cours du temps de réaction, et réduit par capillarité la concentration en monomères.

Les polycondensats (polymères obtenus par polycondensation) ne représentent aujourd'hui que 10% de la production mondiale de matières plastiques, mais le cumul de leurs qualités (polyvalence, haute-résistance thermique ou chimique, haute ténacité de la fibre etc.) font d'eux des polymères particulièrement nobles, qui figurent après utilisation parmi les

déchets recyclables. Sont ainsi synthétisées par ce type de réaction - également utilisée en fin de cycle pour la valorisation des déchets plastiques (**Paprec group**).

I.4 classification des polymères :

Il existe plusieurs modes de classification des polymères selon les propriétés retenues pour les caractériser, nous indiquons ci-après les classifications les plus courantes.

I.4.1 selon l'origine:

- **Des polymères naturels** : ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine: d'un polymère naturel, exemple: méthyl cellulose.
- **Des polymères obtenus par modification chimique.**
- **Des polymères synthétiques** : ce sont les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs....etc. (**BENAYAD, 2018**).

I.4.2 Selon le domaine d'application :

- Grande diffusion (polymères de commodité) ;
- Polymères techniques : les polymères substituant les matériaux traditionnels ;
- Polymères spéciaux : destinés pour des applications particulières (ex. les polymères conducteurs)

I.4.3 Selon la nature chimique :

- **Polymères minéraux** : sont constitués par des chaînes renfermant un seul corps simple comme le diamant, le graphite, le phosphore et le soufre ou par des chaînes renfermant plusieurs hétéronomes comme les silicates, les acides poly phosphoriques et les chlorures de poly phosphonitriles.
- **Polymères organiques:** c'est la classe la plus riche, ils constituent presque la totalité des polymères d'utilisation courante. Les principaux polymères organiques de synthèses sont: polyoléfines, les polyvinyles, les poly diènes, les polyamides, les polyesters et les polyacryliques.
- **Polymères mixtes:** sont doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique (300-350 C°). L'hétéroatome peut être soit dans la chaîne principale soit dans les motifs latéraux. (**BENAYAD, 2018**).

I.4.4. Selon l'architecture de leur chaîne et structure moléculaire :

On divise les polymères selon leur architecture en trois classes :

- A. Linéaire :** Il s'agit d'une structure monodimensionnelle longue et flexible, constituée d'une chaîne continue d'unités répétitives disposées en ligne droite. Ils sont exclusivement issus de monomères di-fonctionnels. Les propriétés physico-chimiques varient en fonction du type et de la nature chimique du monomère.

On distingue dans les structures des polymères linéaires les types suivants :

- **Homopolymère:** Est un polymère dont l'ensemble des motifs de répétition sont de même nature chimique et qui est par conséquent préparé, lorsqu'il est de nature synthétique, à partir d'un seul type de monomère, ils existent en plusieurs sortes : linéaires, branchés ou étoilés. **(Figure I.2)**

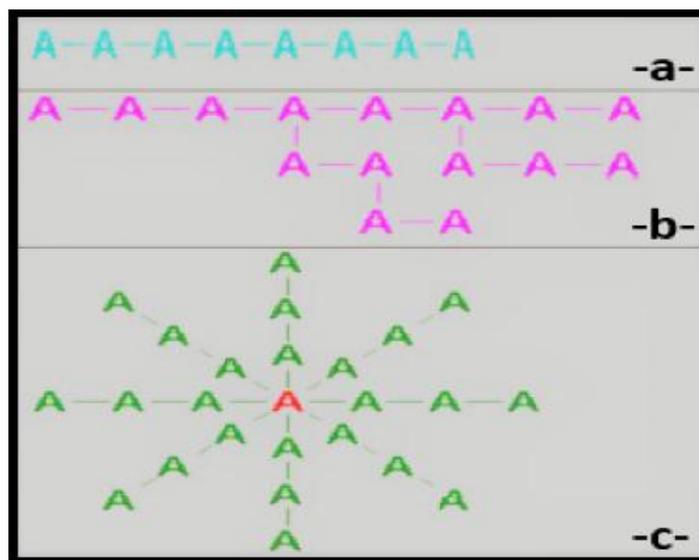


Figure I.2: Types de homopolymères -a- linéaires -b- branchés -c- étoilé

- **Copolymère :** Polymère formé par des chaînes moléculaires contenant un arrangement de deux ou plusieurs types de monomères, et voici les modes de copolymères : statistique, -alterné, séquencé, greffé. **(Figure I.3)**

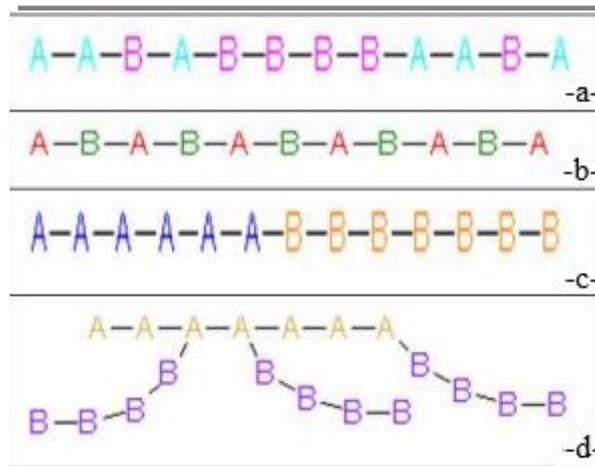


Figure I.3: Modes de copolymères : -a- statistique -b-alterné -c-séquence -d-greffé

B. Polymères ramifiés : Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires. (Weiss, 2009)

On distingue deux types pour cette structure :

- **Homopolymères greffés:** les chaînes moléculaires contiennent des chaînes ramifiées de même motif monomère. (Figure I.4)

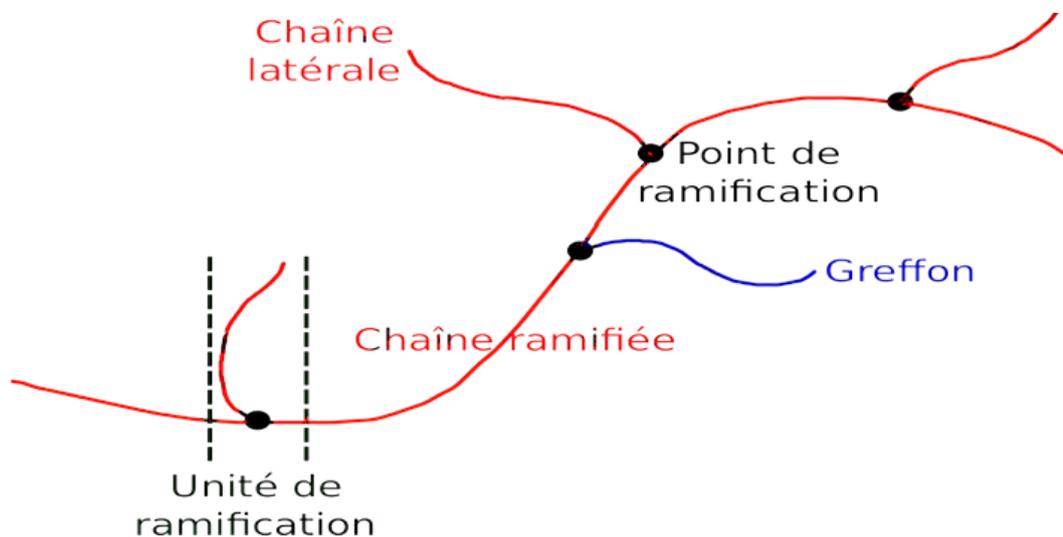


Figure I.4: Représentation schématique de polymères ramifiés

- **Copolymères greffés:** Des branches formées par l'unité structurale B peuvent se greffer sur un tronc d'unités A alignée (**BENAYAD, 2018**).

C. Polymères réticulés : La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau de polymère réticulé.

Il existe plusieurs formes de polymère :

1. **Les polymères amorphes (figure I.5):** on obtient un polymère amorphe quand l'arrangement régulier des chaînes macromoléculaires n'est pas possible. (**alloprof.les matières plastiques**).
2. **Les polymères semi-cristallins :** ils comportent des zones cristallines organisées et des zones amorphes désordonnées. Les polymères orientés ou fibres font partie de cette famille.
3. **Les polymères cristallins (figure I.6) :** ils sont formés uniquement de zones cristallines ; ils se présentent sous forme de solides ordonnés à grande distance.

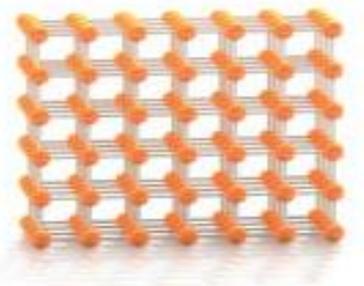
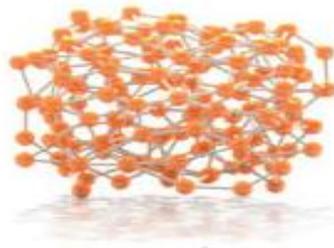


Figure I.5: polymère amorphe Figure I.6: polymère cristallin

I.5 Différents types de plastiques (polymères) :

I.5.1 Thermoplastiques :

Un thermoplastique est une matière plastique qui, sous l'effet de la chaleur, fond ou ramollit suffisamment pour pouvoir être remodelée un nombre infini de fois, et ce, sans que ses propriétés mécaniques soient modifiées.

Les thermoplastiques ont la propriété de ramollir à la chaleur et de durcir au froid. Il est donc possible de leur donner une nouvelle forme, et ce, à répétition, sans affecter leurs propriétés mécaniques initiales. Cette particularité permet un recyclage plus facile de cette

catégorie de plastique, en comparaison avec celui des deux autres types. Les thermoplastiques sont de loin les plastiques les plus utilisés, représentant plus des trois quarts de toutes les matières plastiques produites dans le monde. (**alloprof.les matières plastiques**)

I.5.2 Thermodurcissables :

Un thermodurcissable est une matière plastique qui reste dure en permanence, même sous l'effet de la chaleur. Sa perte d'élasticité est irréversible.

Contrairement aux thermoplastiques qui ramollissent sous l'effet de la chaleur, les thermodurcissables ont perdu cette propriété lors de leur fabrication. Ainsi, il conserve la même rigidité sous l'action de la chaleur jusqu'à l'atteinte de sa température de décomposition. Aussi, une fois produit, on ne peut plus modifier la forme d'un thermodurcissable.

Les thermodurcissables sont difficiles à recycler pour cela ils sont moins utilisés que les thermoplastiques. (**alloprof.les matières plastiques**)

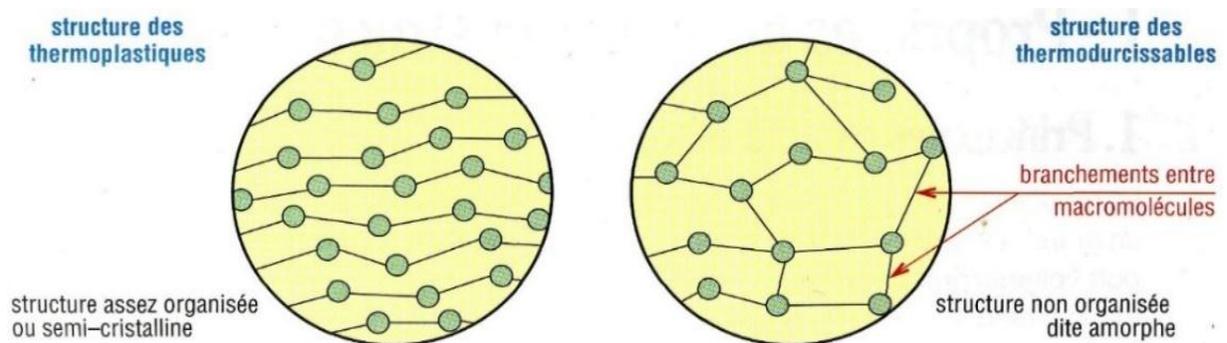


Figure I.7: Structure des matières plastiques

Le Tableau I.2 récapitule les principaux plastiques utilisés :

Tableau I.2: Principales matières plastiques

Principales matières plastiques																									
	polyéthylène	basse densité	PE-LD	TRL-OQ	0,92	100	0,5-3	20-40	200-600	ne casse pas	résistance chimique				(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(3)				
											acides		bases alcalis									solvants	huiles	usinage	moulage
											(2)	(2)	(2)	(2)											
				(1)	densité	températures limites (°C)	R _r (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)	A%	chocs IZOD entaillés	forts	faibles	forts	faibles											
thermoplastiques		haute densité	PE-HP	TRL-OQ	0,96	120	2-4	80-180	20-80		F	B	B	B	B	B	B	B	B	B	① ②				
			PP	TRP-OQ	0,91	130	3-5	140-200	250-600	7-25	F	B	B	B	B	B	B	B	B	B	① ③ ⑥				
		rigide	PVC	TRP-OQ	1,38	70	4-6	150-350	5-80	2-100	B	B	B	B	S	B	B	B	B	B	① ③				
		souple		TRP-OQ	1,20	70	1-3	1-4	150-450												①				
			PS	TRL-OQ	1,05	80	3-5	200-320	5-75	3-20	F	B	B	B	S	B	F	B	B	B	① ② ③ ⑤				
			ABS*	ABS	TRL-OQ	1,10	110	1,7-6	200	10-50	10-50	F	B	B	B	S	B	B	F	B	B	① ② ③			
			PMMA	TRP-OQ	1,20	85	5-8	220-320	4-10	2-3	F	B	S	F	F	B	B	S	B	B	S	② ③ ⑤ ⑥			
			CA	TRP-OQ	1,30	90	3-6	80-250	20-50	6-45	S	F	F	F		B	B	B	B	B	① ② ③ ⑤				
			PA	TRP-OQ	1,15	160	5-10	90-280	15-300	3-50	S	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	① ③ ④			
			PC	TRP-OQ	1,20	130	5-7	240	80-120	65-100	F	B	S	F	F	B	B	B	B	B	B	① ② ⑤			
			POM	TRL-OQ	1,40	90	6-7	300	35-75	5-15	S	B	F	F	B	B	B	B	B	B	B	① ③ ④			
			PTFE	OQ	2,20	+260 -200	2-4	35-80	250-500	16	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	④ ⑥			
thermodurcissables			PF	TRP-OQ	1,3	190	3-6	270-480	750		S	F	S	S	S		B	B	B	B	① ②				
			UP	TRP-OQ	1,2	190	5-15	280-400	250-1500	8-100	S	F	S	F	F		F	B	B	B	② ③				
			EP	TRL-OQ	1,5	280	2-12		250	2-50	F	B	F	B	B	B	B	B	B	B	② ③ ⑥				
			PI		1,6	250	2-4		750		B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	① ⑦				
			SI	OQ	1-2	230	1				F	B	F	F	F	F	F	F	B	B	B	⑦			

(1) TRL : translucide
TRP : transparent
OQ : opaque

(2) B : bon
F : faible à moyen
S : mauvais (soluble)

(3) ① : pièces mécaniques (engrenages, cames, rotors)
② : petits carters, boîtiers, jouets, petit outillage
③ : grands bâtis, cuves, containers, réservoirs, coques
④ : pièces de frottement (coussinets, paliers, glissières)
⑤ : pièces pour l'optique (vitres, luminaires, diffuseurs)
⑥ : applications chimiques, thermiques
⑦ : enrobage, étanchéité, isolant

* acrylonitrile styrène acrylate
** résine phénol formaldéhyde

I.5.3 Elastomères :

Un élastomère est un polymère linéaire ou ramifiée transformé par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble.

Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété d'élasticité caoutchoutière, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contrainte mécaniques. Ils peuvent atteindre de très grandes allongements (jusqu'à 500 %) tout en étant capables de retrouver leur géométrie initiale en restituant au milieu l'énergie qui leur a été fournie lors de la déformation. (BENKACIMI, 2016).

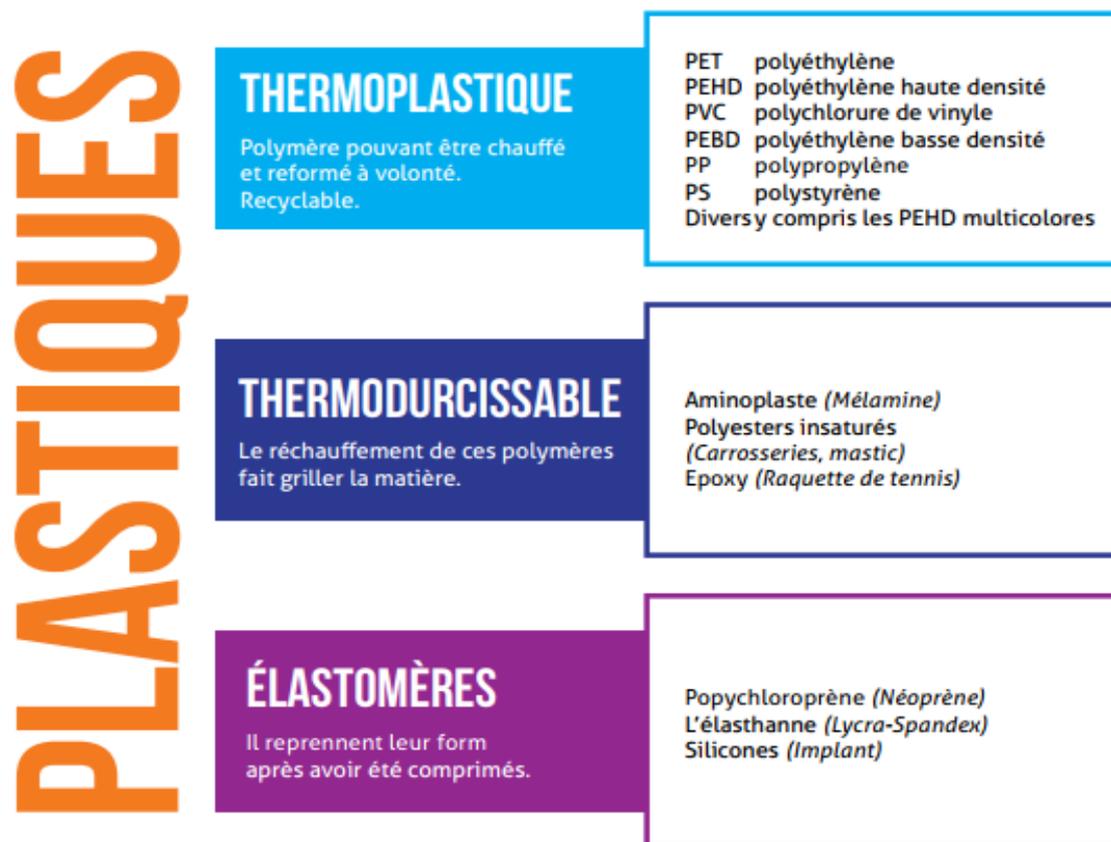


Figure I.8: Types de plastiques

I.6 Propriétés des différents plastiques :

Les propriétés des plastiques sont étroitement liées à leur structure chimique et à leurs adjuvants; ils ont cependant ceci en commun qu'ils sont tous de bons isolants électriques, légères, résistants à la corrosion, Ils sont économiques durables et ont une grande résistance.

Les tableaux suivants définissent les différentes propriétés des matières plastiques :
(Famille de plastique et usages)

Tableau I.1: propriétés des thermoplastiques

Famille	Nom, abréviation	Propriétés
Thermoplastiques	Polyéthylène (PE)	Translucide, inerte, facile à manier, résistant au froid. On distingue deux familles: -le PEBD (polyéthylène basse densité) bonne résistance chimique, olfactivement, gustativement et chimiquement neutre, facilement transformé et soudé. - le PEHD (polyéthylène haute densité)
	polypropylène (PP)	Très facile à colorer. N'absorbe pas l'eau. aspect brillant et résistant à la température (160°C). Difficile à recycler surtout s'il est imprimé
	polystyrène (PS)	Dur et cassant. Trois types: - polystyrène "cristal" transparent - polystyrène "choc" (HIPS) ; acrylonitrile butadiène styrène ABS) - polystyrène expansé (PSE), inflammable et combustible
	polycarbonate (PC)	Excellentes propriétés mécaniques, bonne résistance thermique jusqu'à 120°C, très transparent, physiologiquement neutre Mauvaise résistance aux contacts prolongés avec l'eau, aux agents chimiques et aux rayons ultraviolets
	polyesters et polyéthylène téréphtalate (PET)	mou à moyenne température.
	Poly acétals ou polyoxyméthylène (POM)	Solides et avec des qualités de métaux. Résistant à la plupart des agents chimiques, faible coefficient de frottement. Densité élevée. Assez faible résistance thermique
	polychlorure de vinyle (PCV)	Rigide ou souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore. PVC rigide : aspect lisse et dur
	polyamides (PA)	Différents types de PA (selon la longueur des chaînes), Bon compromis entre qualités mécaniques, thermiques et chimiques. Hydrophiles
	polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	Transparent, même avec une très grande épaisseur (jusqu'à 33 cm d'épaisseur); à la différence du verre L'ajout de PMMA dissout permet aux huiles lubrifiantes et fluides hydrauliques de conserver leur liquidité au froid (jusqu'à -100°C !)

Tableau I.2: propriétés des thermodurcissables

famille	Nom, abréviation	Propriétés
Thermodurcissable	polyuréthanes (PUR)	Grande diversité de dureté et textures en fonction des associations chimiques de différents monomères
	polyesters insaturés	Prix peu élevé, durcissement assez rapide sans élimination de produits secondaires. Imprégnation facile des fibres de verre.
	phénoplastes (PF)	Bonne résistance aux produits chimiques et à la chaleur et électriquement isolantes. Transformable par moulage et par compression. Souvent colorés en brun foncé
	aminoplastes (MF)	Dureté et rigidité exceptionnelles, peu sensibles à l'hydrolyse et à la lumière, résistance à l'abrasion, bonne tenue aux solvants, difficilement inflammables. Peuvent être produits en teintes claires

Tableau I.3: propriétés des élastomères

Elastomères	Caoutchoucs	Chauffés au-dessus de 65 °C, ils commencent à vieillir et deviennent poisseux. Faible résistance à l'huile et à l'ozone. Propriétés d'amortissement et grande extensibilité (jusqu'à 750 % avant rupture). Excellente résistance au déchirement.
	élastomères spéciaux	Température maximum d'utilisation : 150 °C. Selon les matériaux : résistance aux produits pétroliers, aux solvants ; à l'oxydation (O ₂ et O ₃), aux intempéries, aux produits chimiques corrosifs et au vieillissement... Certains sont ininflammables et ont une grande imperméabilité aux gaz. Parfois sensible à la lumière et à l'ozone et au stockage
	élastomères très spéciaux	Très variables en fonction des matériaux (caoutchoucs de silicone, - élastomères fluorés, polyacrylate...)

I.7 Importance et domaine d'application des polymères :

I.7.1 Importance :

Quand on se réfère à la production et consommation mondiales des plastiques on se rend compte facilement de la vitalité et l'importance qu'occupent ces matériaux tellement demandés dans tous les secteurs.

Malgré que le plastique n'est ni écologique ni sain, il est omniprésent et souvent utilisé à cause de leurs propriétés inégalables (**figure I.9**) :

- **Les plastiques sont peu coûteux** : vu que la matière première de leur fabrication n'est pas trop chère.
- **Variation de ses propriétés physico-chimiques** : ils peuvent être élastiques ou rigides, durs ou malléables, résistants à la chaleur, aux chocs, aux produits agressifs et dangereux comme les acides selon leur composition.
- **La facilité de moulage et façonnage** : ils prennent les différentes formes même les plus complexes.
- **La légèreté des plastiques** : qui permet de les transporter facilement et pas cher.
- **Les plastiques un super isolant thermique.**
- **La durabilité** : les plastiques sont résistants comme ils sont peu sensibles à la corrosion ainsi leur durée de vie qui permet de l'utiliser dans plusieurs domaines (tuyauterie, peintureetc.)
- **La facilité du nettoyage de plastique**
- **Les plastiques utilisés comme une barrière de protection.** Les aliments se conservent plus longtemps dans des boîtes plastiques. Etant imperméable, le plastique contribue ainsi à limiter la contamination venant de l'extérieur. Les sacs poubelles en plastique sont très hygiéniques. Les jouets en plastique sont plus sûrs pour les enfants. Le casque de la moto, composé de différents plastiques, et les airbags d'automobile sont des éléments essentiels de survie en cas d'accident grave mémoire...).
- Les plastiques permettent un stockage massif de données sur un support de petite taille (CD, DVD, cartes permettent d'économiser l'énergie et de lutter contre le réchauffement climatique. Si on remplaçait les plastiques d'emballage par des matériaux traditionnels, la consommation mondiale d'énergie serait doublée.
- Les plastiques sont en partie recyclables. Pour ceux qui ne le sont pas, on peut les incinérer et ainsi récupérer de l'énergie sous forme de chaleur. (**TRAORE, 2018**).

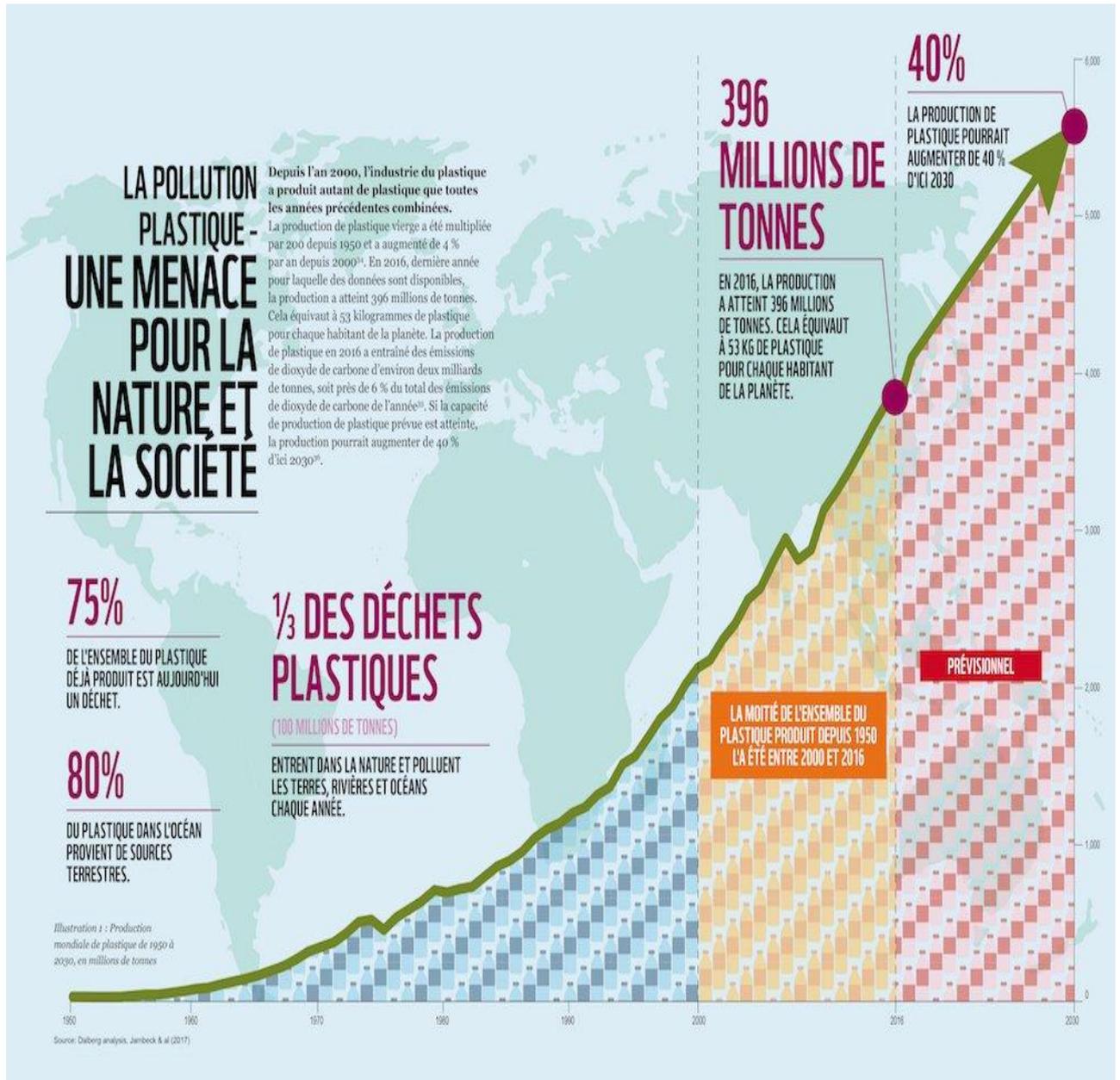


Figure I.1: la production du plastique

I.7.2 Domaine d'application :

Les différents domaines d'utilisation du plastique sont résumés dans le tableau suivant (Tableau I.6) :

Tableau I.4: domaine d'application des plastiques

Domaines	Exemples
Le secteur de la construction	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des plan chaires et des plafonds, revêtement du sol.
Industrie de l'emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boites aux lettres, problème thermique, gainage films vidéo.
Médecine et santé	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie.
Articles ménagers	Tupperware, poubelles, seaux, vaisselle.
Matériel électrique et électronique et les communications	Tension d'isolement, isolation, laveuses, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone.
Industrie automobile	Système vitre claire, Tapie, carrosserie, optiques, planches de bord, habillage intérieur, Façades de téléviseurs, gainage de câbles.
Industrie textile	Vêtement, fibres textiles naturelles et synthétiques, sacs, skaï, similicuir, non tissés.
Dans le domaine agricole	Colles, vernis, mousses.
Sports-loisirs	Certaines parties des bâtiments, des avions et des bateaux, DVD, bandes magnétiques, Files de pêche et les cordons utilisés, piscines, coques de bateaux.
Industrie chimique	Tuyauterie, cuves, revêtements.
Le domaine alimentaire	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boites à œufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...
Le matériel de maison	Meuble, vaisselle, accessoires... ; Utilisés en industrie pour maintenir le matériel d'une violente collision.

I.8 Identification des plastiques :

Le symbole d'identification des plastiques est composé de trois flèches disposées en triangle au centre duquel apparaît un chiffre. L'abréviation du plastique est inscrite en dessous. Le tableau suivant montre les différents plastiques avec leurs abréviations, ainsi que leurs numérotations.

Tableau I.5: matériaux, abréviations, numérotations.

Matériaux	Abréviations	Numérotation
polyéthylène téréphtalate	PET	1
Polyéthylène haute densité	HDPE ou PE-HD	2
Polychlorure de vinyle	PVC	3
Polyéthylène basse densité	LDPE ou PE-BD	4
Polypropylène	PP	5
Polystyrène	PS	6

I.9 Déchets plastiques :

Les déchets plastiques sont des résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon.

Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques :

I.9.1 Déchets plastiques industriels : sont ceux issus de la grande industrie de la fabrication, de la transformation et de l'emballage, sont généralement plus homogènes et sans contamination, ce qui les rend utiles pour donner les produits de qualité supérieure (Les déchets de production, Les déchets de transformation). (COULIBALY, 2008).

I.9.2 Déchets plastiques de post-consommation : Comme leur nom l'indique, il s'agit de l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers. On distingue : Les déchets agricoles, - Les déchets commerciaux ou de distribution, - Les déchets ménagers, Les déchets du bâtiment et des travaux publiques, Les déchets de véhicules de transport (COULIBALY, 2008).

I.10 recyclage du plastique :

I.10.1 Différentes méthodes de recyclage :

Recyclage primaire : mieux connu sous le nom de ré-extrusion, est la réintroduction des déchets de plastiques au cycle d'extrusion pour produire des produits similaires

Recyclage mécanique (secondaire) : Le recyclage mécanique est le retraitement des plastiques utilisés pour former de nouveaux produits similaires. Il s'agit d'un type de recyclage secondaire du plastique où les déchets de matières plastiques homogènes sont transformés en produits avec un niveau de performance égal ou inférieur au produit original. Bien que, à première vue, le recyclage mécanique des déchets plastiques semble être une opération «verte», l'opération de retraitement n'est pas rentable car elle nécessite une énergie élevée pour le nettoyage, le tri, le transport et le traitement.

Recyclage thermique / incinération : C'est la récupération d'énergie par incinération comme moyen efficace de réduire le volume de matières organiques. L'incinération est un processus destructeur dans lequel les hydrocarbures sont convertis en leurs produits de combustion. Cependant, dans la plupart des pays développés, la méfiance du public à l'égard de l'incinération limite actuellement le potentiel des technologies de déchet-énergie, car elles produisent des gaz à effet de serre et des polluants hautement toxiques

Recyclage chimique Le recyclage des matières premières, également connu sous le nom de recyclage tertiaire, vise à convertir les déchets de polymères en monomères d'origine ou en d'autres produits chimiques de valeur. Ces produits sont utiles comme matières premières pour divers procédés industriels en aval ou comme carburants de transport.

Il existe trois approches principales : l'oxydation partielle, le craquage (thermique, catalytique et hydrocraquage) et la dépolymérisation. (Valorisation des déchets plastiques en produits à valeur énergétique).

I.10.2 Quelles sont les plastiques recyclables ?

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents, il permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites (**Futura planète**).

I.10.3 Le cycle de recyclage du plastique :

Après le tri effectué par les consommateurs, les plastiques sont collectés puis triés en trois catégories : PEHD, PET clair et PET foncé. Les plastiques sont ensuite mis en balle puis expédiés aux centres de régénération(**Figure I.2**).

Ils sont alors à nouveau triés et prélevés pour éliminer les éléments indésirables et séparer les matériaux selon leur densité.

Le plastique est alors broyé en paillettes qui seront ensuite utilisées pour produire toute une gamme de produits : fibres, rembourrage de couettes et sacs de couchage, moquettes, polaires, etc. Pour ce qui concerne le PET. Les PEHD vont donner des produits différents des tuyaux, des sièges auto pour enfant, des arrosoirs ; etc.



Figure I.3: Schéma de recyclage du plastique

I.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un aperçu sur l'historique de l'utilisation du plastique ainsi que l'industrie de fabrication des matières plastiques. Il a été question également de présenter les différents types de plastiques et ses caractéristiques. On a abordé les différentes méthodes de recyclage du plastique et on a vu que cette matière se prête bien pour être recyclé dans plusieurs domaines.

Chapitre II



Généralités sur les Bitume

II.1. Définition :

Le **Bitume** est un matériau hydrocarboné de couleur brune et brillante qui a une forte viscosité qui change avec la température (Voir Figure II.1), il contient du carbone et de l'hydrogène avec de faibles proportions d'oxygène, d'azote et de soufre ainsi que des métaux à l'état de traces.

Le bitume, le goudron ou les deux sont connus comme une substance de liaison hydrocarbonée combinée à des agrégats et fournissent des matériaux encapsulés grâce à sa propriété principale de liaison qui permet aux matériaux de s'agglomérer (Guil G., 2020) .

Dans le langage courant, le bitume est souvent confondu avec le goudron de houille ou avec l'asphalte qui n'est qu'un composant.



Figure II.1: Bitume

II.2. Historique :

L'histoire du **bitume** remonte à la préhistoire et les plus anciens objets humains contenant du **bitume** connu à ce jour sont vraisemblablement vieux de 180 000 ans.

En parallèle d'applications médicales, le bitume naturel ainsi été utilisé généralement comme adhésif, en particulier pour le génie civil, dans des mortiers ou en tant qu'agent d'imperméabilisation(Did.L ;2002) .

La Bible(Did.L ;2002) cite aussi des exemples d'utilisations, pour l'arche de Noé ou le berceau de Moïse. Il faut cependant remonter à Nabopolassar, roi de Babylone pour

trouver les premières mentions de l'utilisation de bitume pour application routière , mais cet usage a disparu pour ne réapparaître qu'au cours du 19 ième siècle et finalement évoluer vers nos techniques routières actuelles.

Ainsi, les bitumes sont devenus des matériaux de haute technicité et il existe maintenant un certain nombre d'additifs commerciaux, minéraux ou organiques, chargés d'améliorer leurs propriétés.

II.3.Origine et fabrication des bitumes :

II.3.1.Origine de bitume :

Le **bitume** est obtenu par raffinage de pétrole brut. Il s'agit du résidu obtenu après distillation. Tous les bruts ne conviennent pas à la production de **bitume**. Sur les 1 300 bruts.approximativement référencés dans le monde, seuls 10% sont choisis par les compagnies pétrolières fabrication de **bitume**. Les bruts légers, sans asphaltènes, peuvent avoir un rendement en **bitume** insuffisant. A partir d'une qualité brute, différentes méthodes de fabrication sont possibles, cependant, ils impliquent toujours de passer par la distillation (**Had.S ;2007**).

Il ya trois types de liants hydrocarbonés :

Liants naturels, qui se trouvent dans la nature et qui ont été utilisés pour très vieux temps. C'est une roche asphaltique telle qu'elle se trouve dans le gisement et qui après broyage est appelé asphalte.

Bitumes de pétrole, obtenus par raffinage de pétrole brut et résidus de pétrole.

Le goudron, qui provient de la pyrogénéation en l'absence d'air, de lignite et tourbe et bois.

D'origine et de constitution chimique différentes, les bitumes et les goudrons sont des liants de base utilisés séparément ou mélangés dans la technique route.

Les bitumes purs, tels que produits, sont trop visqueux pour être manipulés et mélangé avec des agrégats.

II.3.2. Fabrication des bitumes :

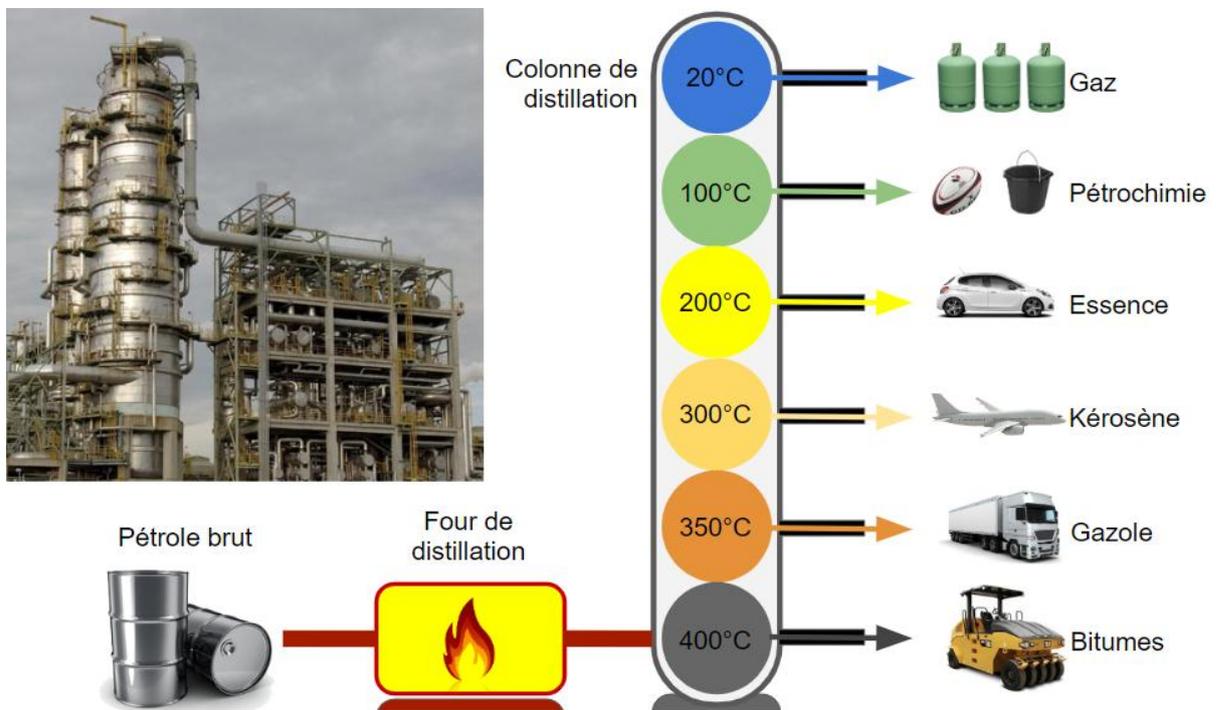


Figure II.2: Fabrication des bitumes

Pour fabriquer du bitume, on utilise un four et une colonne de distillation (**Figure II.2**). Le bitume en entrée dans le four est chauffé à 400°C. Sous l'effet de la haute température, il se vaporise en différents éléments gazeux. Ces éléments sont libérés dans une colonne dont la température baisse à mesure qu'ils s'élèvent (**charles.A ;2019**).

A chaque pallier de température, les éléments se condensent et retrouvent une forme liquide, ce qui permet de les séparer pour recueillir: bitumes, gazole, kérosène, etc... Dans cette distillation fractionnée, les bitumes composés des éléments les plus lourds sont récupéré- Les différents procédés de fabrication des bitumes sont :

- **Le Raffinage** : Dans une raffinerie, les diverses installations transforment, le pétrole brut en produits finis allant des bitumes et fiouls, au différents combustibles et carburants, gaz et bases pour la chimie. Le bitume est obtenu par traitement de la fraction de distillation la plus lourde de bruts sélectionnés dits bruts à bitume .ce traitement est réalisé dans des unités spécifiques de la raffinerie, pour amener le produit aux spécifications officielles ou requises par les utilisateurs (**Zoubida.S., 2018**)

- La distillation : C'est un procédé physique d'évaporation des constituants volatils ou la phase vapeur et illuminé est condensé il reste 1 enfants de colonne du bitume elle se pratique en deux étapes :

a. Distillation à la pression atmosphérique : ce procédé est utilisé que pour retirer les produits (essence, kérosène) le pétrole brut préalablement décompter et dessaler est chauffé à une température voisine de 340 degrés Celsius puis envoyer dans la première colonne de fractionnement maintenu à la pression atmosphérique le produit récupérer en fonte de Tours et le bruit réduit

b. Distillation sous vide : cette opération est nécessaire pour obtenir des produits lourd on commence par la distillation sous pression atmosphérique le fond de la colonne et alors envoyer à la distillation sous vide qui consiste à la séparation des différents constituants en jouant sur les paramètres débit pression et température.

Plus on distille plus le bitume obtenu est dur et plus sa pénétrabilité est faible (**Fethiza.A.B.2016**).

- **L'extraction (désasphaltage)** : Ce procédé est utilisé comme complètement de la distillation. Il consiste à fabriquer un bitume par solubilité du fond de la distillation sous vide dans un solvant (propane ou butane). Après extraction du résidu sous vide, on obtient un bitume et une base pour lubrifiant de haute qualité (**Fethiza.A.B.2016**).
- **Le soufflage** : Cette opération consiste à injecter de l'air dans le résidu de la distillation sous vide sous des températures comprise entre 250 et 300°C.

Le bitume obtenu est appelé bitume soufflé, il est peu employé en technique routière mais est plus utiliser comme produit d'étanchéité de bâtiment (**Fethiza.A.B.2016**) .

- **Le craquage** : Un traitement des fonds de colonne sous vide à des hautes températures comprise entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bars. Ces bitumes n'ont pas d'application routière.

II.4. Bitume en Algérie :

L'Algérie à l'instar d'autres pays émergents, connaît aujourd'hui une croissance et un développement de ses activités économiques qui font, que la demande en différents produits énergétiques est en forte progression (Nftal.BMP ;2020) .

Les classes de bitumes purs les plus employées en Algérie dans les techniques routières sont 35/50 et 70/100. Le pétrole algérien n'est pas assez dense pour en extraire du bitume, celui-ci est alors importé soit sous forme de matière première : brut réduit, raffiné à Arzew et Skikda, ou bien d'un produit fini : bitume pur.

Le bitume 35/50 est fabriqué à la raffinerie d'Arzew par soufflage, il est destiné aux enrobés à chaud.

Le 70/100 est fabriqué à Skikda par la distillation sous vide.

Pour ce qui est du bitume fluidifié, il est fabriqué aux unités de NAFTAL à partir du bitume pur (70/100) auquel il est ajouté un solvan.

la Direction de Bitumes : en charge de l'approvisionnement, de l'exploitation et la maintenance des équipements, de la promotion et la vente des produits, selon les normes et spécifications internationales requises.

II.4. Classification des bitumes :

Les Bitume sont des produits solides, semi-solides ou liquides comprenant le (IGG.K ; 2010) :

- **Bitume pur** : Obtenu par raffinage de butes pétroliers et ne comportant aucun ajout.
- **Bitume fluidifié (cut-back)**: Bitume mélangé avec un diluant plus ou moins volatil, provenant de la distillation du pétrole.
- **Bitume fluxé** : Bitume ramolli par l'addition d'une huile de fluxage de faible volatilité provenant de la distillation du goudron de houille.
- **Bitume fluxé mixte** : Bitume pur dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant de la distillation du pétrole pour au moins 50% des ajouts, et de la distillation du goudron de houille, d'autre part ,de la distillation du pétrole .les produits provenant de la distillation du pétrole entrent pour moins de 50% dans la composition des produits ajoutés au bitume pur. Les bitumes fluxés mixtes sont des types de produits en cours de développement pour lesquels il n'existe pas encore de classification ni de spécifications.
- **Bitume composé** : Comportant au moins 50% de bitume et se subdivisant en :

a. **Bitume-goudron** : mélange de bitume pur et de goudron de houille.

b. **Bitume -brais** : mélange de bitume pur et de brais de houille.

c. **Emulsions de bitume** : est une dispersion de bitume dans l'eau formée par emploi d'une énergie mécanique de cisaillement de liant et d'un agent tensio-actif mécanique. Les liant de base peuvent être des bitumes purs ou modifiés, éventuellement fluidifiés fluxés.

•**Les bitumes modifiés**: Bitume dont on a modifié les propriétés par l'ajout d'agents chimiques: caoutchouc naturel, élastomères de synthèse, soufre, composés organométalliques, pigments...

II.5. Structure physico-chimique :

Le bitume est un mélange d'hydrocarbure est composé en moyenne de 80 à 85 % de carbone , 10 à 15% d'hydrogène , d'oxydène , 2 à 3% d'oxygène et en faible quantité ,du soufre , de l'azote et divers métaux à l'état De traces(**Bekki.H ;2018**).

Malgré la complexité du matériau, Lagunillas a proposé une formule brute moyenne pour les monomères d'asphaltènes : $C_{74}H_{84}NS_2O$.

L'utilisation, comme solvant sélectif, d'un hydrocarbure léger en grand excès, permet de fractionner un bitume en deux parties (**Figure II.3**):

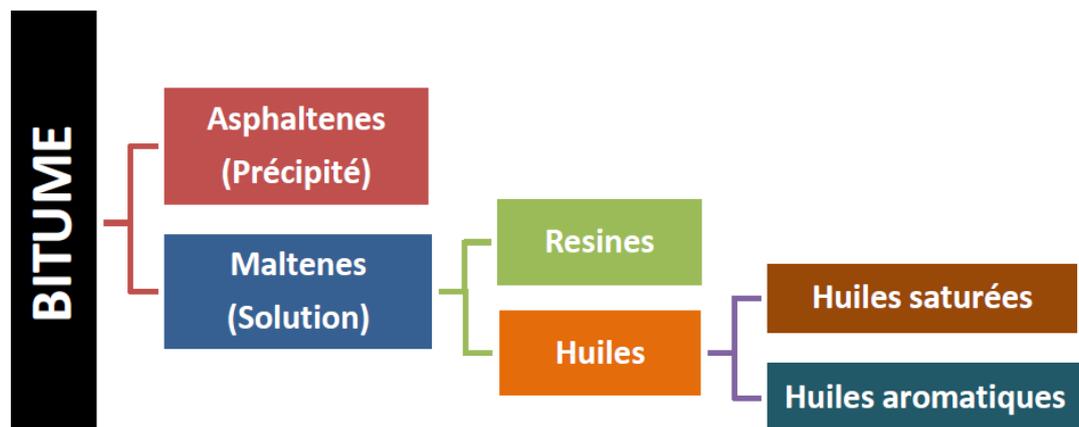


Figure II.3: Séparation par familles chimiques des constituants du bitume

❖ Les maltènes

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

• **Les saturés** : sont des huiles incolores ou légèrement jaunâtres composées principalement de molécules paraffinées et de cycles naphthéniques (**Figure II.4**). Elles représentent généralement moins de 10% d'un bitume. Leur masse moléculaire est de 300 à 2000 g/mole.

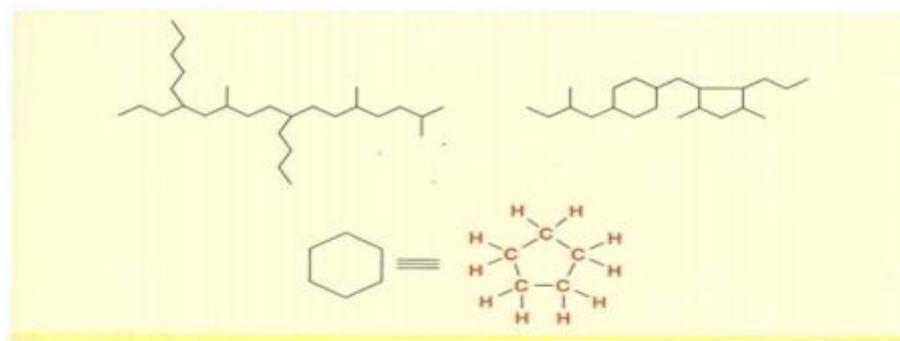


Figure II.4: Structure de saturé

• **Les aromatiques** : sont des huiles visqueuses de couleur rouge-brun sombre, avec 30% de leurs atomes de carbone inclus dans des cycles aromatiques. Elles représentent 50 à 70% de la composition d'un bitume. Leur masse moléculaire est du même ordre que celle des saturés (**Figure II.5**).

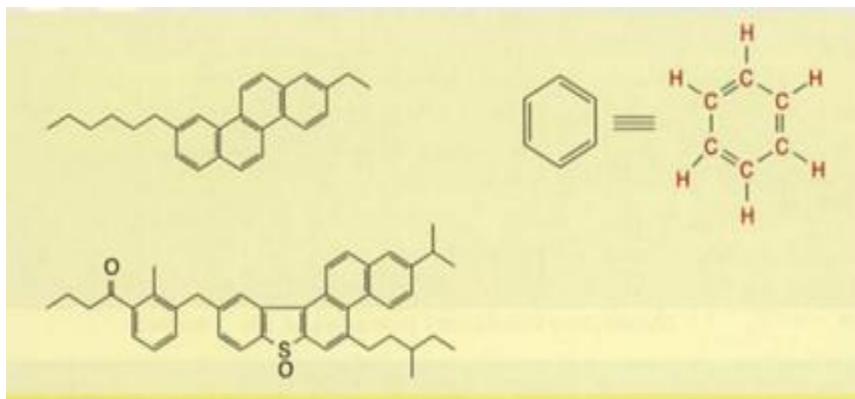


Figure II.5: structure des aromatiques

• **Les résines** : sont des solides noirs qui fondent par chauffage et représentent environ 10% du bitume routier. Elles sont caractérisées par de nombreuses ramifications, ce sont des systèmes condensés de cycles aromatiques, naphthéniques et hétérocycliques. Elles présentent une plus grande proportion de composés aromatiques que les huiles. Leurs molécules sont plus grosses et la proportion des hétéroatomes est plus élevée. La courbe de distribution de leur masse moléculaire s'étale de 500 à 50 000 g/mole. Leur taille est comprise entre 1 et 5nm.

❖ Les asphaltènes

Ils peuvent représenter jusqu'à 30 % du bitume. C'est la fraction précipitée, elle est constituée par des corps de poids moléculaire très élevé se présentant sous la forme d'un corps solide et noirâtre, cassant, à point de ramollissement élevé. Le pourcentage des asphaltènes sera d'autant plus élevé que le bitume sera plus dur (**Figure II.6**).

Il n'y a pas de discontinuité entre maltènes et asphaltènes, le fractionnement obtenu dépendant du solvant employé

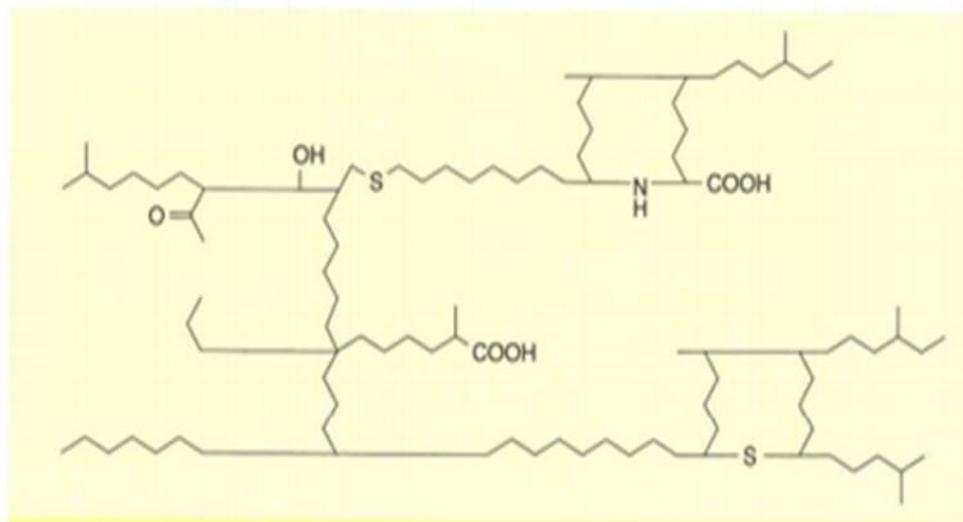


Figure II.6: structure des asphaltènes

II.6. Structure colloïdale du bitume :

L'ensemble des asphaltènes et des maltènes forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux.

En effet, les asphaltènes ont tendance à adsorber la fraction aromatique la plus lourde des maltènes (les résines), ce qui permet leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisati (**Fethiza.A.B.2016**).

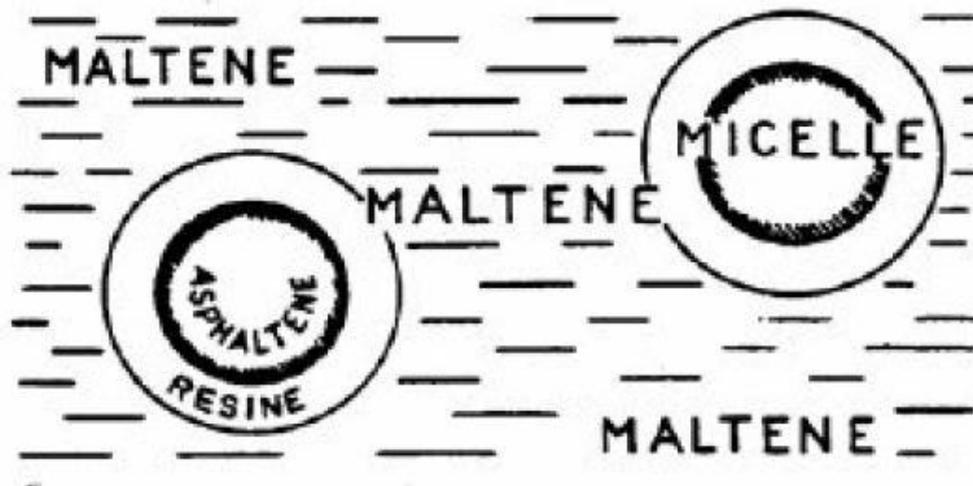


Figure II.7: Etat colloïdal des bitumes

Si les maltènes contiennent suffisamment d'aromatiques, les micelles sont complètement mobiles au milieu de la phase dispersante : elles sont peptisées. La solution colloïdale est alors à l'état de structure sol (visqueuse) (**Figure II.7**).

S'il n'y a pas suffisamment d'aromatiques, les micelles s'attirent mutuellement, deviennent moins mobiles et forment un réseau au milieu de la phase intermicellaire.

II.7 Différentes Structures constituant le bitume :

La structure du bitume est en générale dépendante de sa composante Chimiques, du faite que plusieurs recherches ont étaient établies et trois modèles de structure sont proposés (**Figure II.8**) :

II.7.1 Structure de type 01 « SOL » :

Concentré dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines, les asphaltènes dans ce cas ne sont pas en interaction, et sous température ambiante le comportement des liants est de type SOL.

II.7.2 structure de type 02 « GEL » :

Étant assuré par une squelette d'asphaltes , cette structure est caractérisée par un état de gel, cette squelette d'asphaltes qui dans une température ordinaire forme un réseau de coagulation baignant dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines.

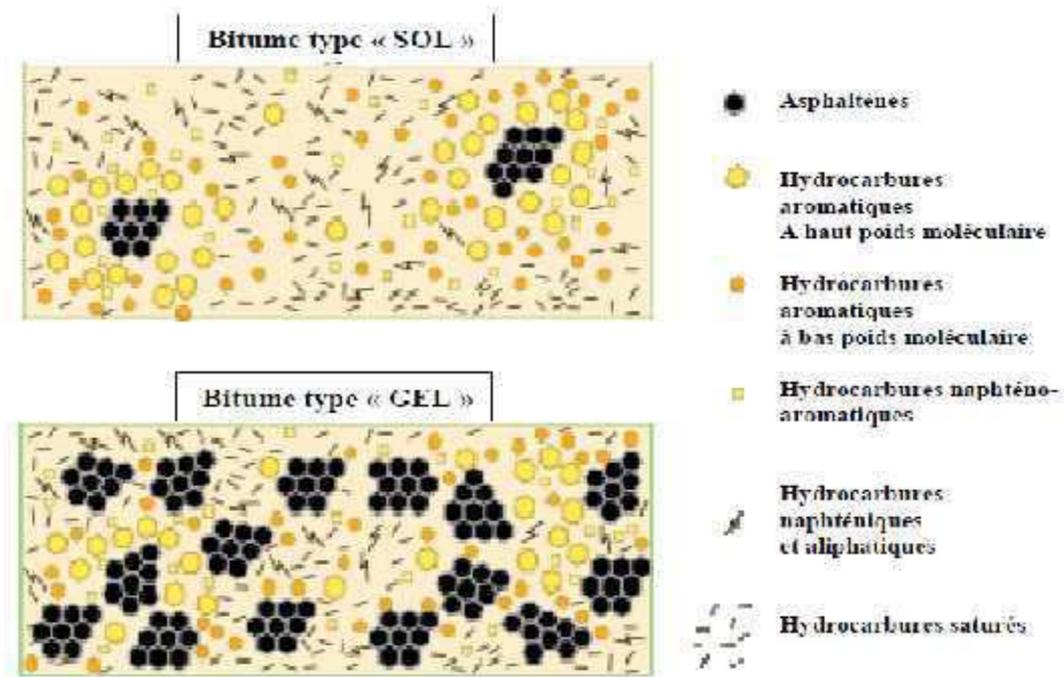


Figure II.8: Structure « SOL » « GEL »

II.7.3 Structure de Type 03 « SOL – GEL » :

Les asphaltènes baignent dans un milieu dispersant plus structuré par les résines que le type « GEL » et moins structuré que l'état « SOL » (Figure II.9). Il y a interaction entre les micelles d'asphaltènes qui forment des agglomérats, mais le squelette structural n'est pas tout à fait continu. Ce type correspond à la majorité des bitumes routiers. c'est le type « Sol-Gel » celui-ci se caractérise par un équilibre complexe entre les fractions huileuses de maltènes et les micelles d'asphaltènes (peptisées par les résines) en interaction plus ou moins forte.

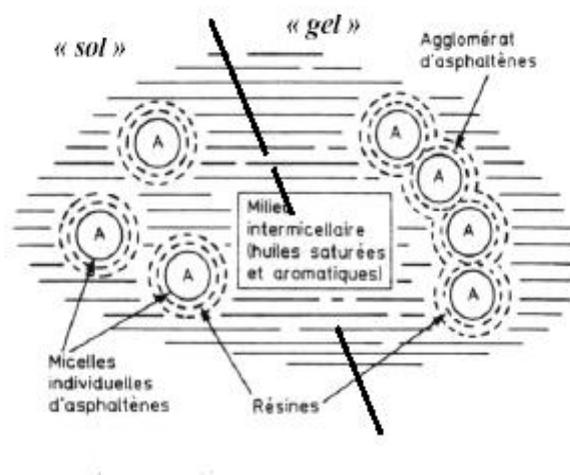


Figure II.9: Représentation de la structure colloïdale (Sol-Gel) du bitume

Cet équilibre colloïdal peut être écrit sous la forme (HADD.S., 2007) :



Les différents types de bitumes en fonction de la composition chimique sont présentés dans **Tableau suivant** :

Tableau II.1 : Différent types de bitumes en fonction de la composition chimique

Types de bitumes	(%) en masse Asphaltènes	(%) en masse Résines	(%) en masse Huiles
GEL	>25	<24	>50
SOL	<18	>36	<48
GEL SOL	21 à 33	30 à 34	45 à 49

II.8. Vieillessement des bitumes :

II.8. 1. Mécanisme :

Une caractéristique très importante du bitume est le vieillissement. Le bitume évolue dans le sens d'un durcissement depuis sa fabrication jusqu'à son stade ultime d'usage dans les chaussées.

Le vieillissement s'opère suivant des mécanismes complexes à la fois physiques (évaporation des fractions les plus volatiles, réarrangement du système colloïdal au cours du refroidissement) et chimiques. Lors de ce processus, on constate un appauvrissement en élément cycliques (aromatiques) et un enrichissement en résines, puis en asphaltènes dans l'ordre (Feth.a., 2016) .



• **Evolution chimique :**

En général, le vieillissement est du à des réactions d'oxydation .Des modifications progressives des hydrocarbures contenus dans le bitume peuvent donner lieu à des variations physico-chimiques qui se traduisent notamment, par une diminution de la pénétrabilité. L'oxydation des groupes d'hydrocarbures est un phénomène irréversible (IGG.K.,2010). Celui-ci peut conduire, soit à la formation de groupes polaires, soit à la Formation d'asphaltènes.

Le mécanisme d'oxydation dépend de la vitesse de diffusion de l'oxygène dans les bitumes, de la vitesse de réaction et de la température. Lors de l'enrobage, l'oxydation chimique des bitumes est forte, entraînant une rupture des chaînes de carbone qui les constituent pour créer, soit des groupements carbonyles C=O, soit des groupements sulfoxydes S=O.

- **Evolution physique :**

Celle-ci se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification des constituants.

Ce type de vieillissement est provoqué par un déséquilibre des proportions de micelles et d'agglomérats (par chauffage au moment d'enrobage). La remise en structure est lente et dépend de la viscosité des huiles contenues dans le bitume. Quelque soit l'origine du bitume, le vieillissement se traduit par une augmentation plus ou moins importante de leur consistance selon leur origine et leur mode de fabrication. La présence de fractions cristallisables (paraffines) peut conduire également à un durcissement physique du bitume.

En général, ce processus est plus rapide que le précédent (quelques heures à quelques jours). Ces deux phénomènes sont réversibles, notamment par réchauffage.

L'évaporation des fractions les plus volatiles du bitume peut constituer un type de vieillissement physique, irréversible. La vitesse d'évaporation dépend de la nature, de la quantité des produits volatils et des conditions de traitement (IGG.K.,2010).

II.8. 2. Evolution lors de l'enrobage, du compactage et de la mise en service :

La comparaison entre le bitume original et le même bitume extrait d'une route d'un certain âge montre que la dureté, la consistance à la température ordinaire (susceptibilité thermique), ainsi que la fragilité aux basses températures ont augmenté sur le liant vieilli.

Le vieillissement au cours du temps d'un enrobé a été rapporté par Witheoak (Figure II.10).

Le vieillissement est représenté par l'indice de vieillissement qui est défini par le rapport entre la viscosité du bitume vieilli et la viscosité du bitume frais.

L'indice de vieillissement met en évidence l'importance de l'enrobage, c'est - à- dire de la centrale d'enrobage dans la vie d'une chaussée. Selon Witheoak, plus de 5% du vieillissement d'un enrobé sur une période de 12 ans, se passe en centrale d'enrobage.

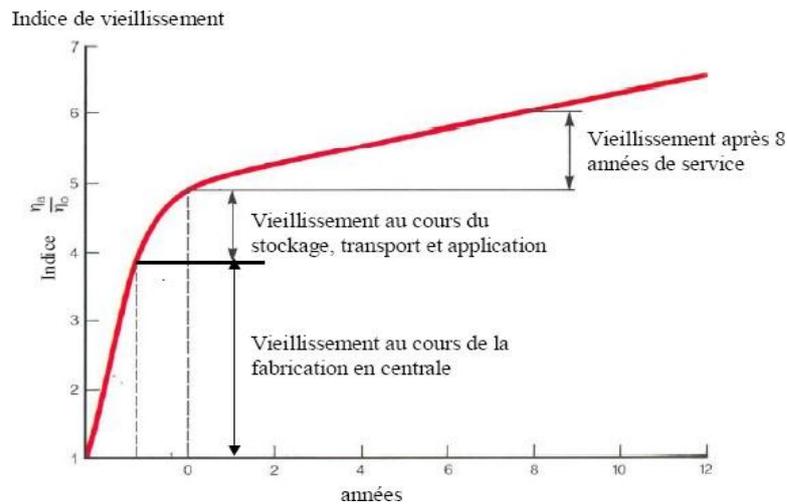


Figure II.10: Vieillessement de l'enrobé bitumineux au cours du temps.

II.8. 3. Essai de vieillissement RTFOT (Normes NF EN 12607-1) :

Le vieillissement du bitume lors de la construction d'une route (enrobage, épandage, compactage, refroidissement) est concrètement simulé en laboratoire par l'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) qui a été mis au point aux Etats-Unis, puis adopté en Europe après validation. Il est fréquent qu'à la suite de cet essai, on mesure l'évolution de certaines caractéristiques notamment celles de consistance (TBA, Pénétrabilité à 25°C). Cet essai est utilisé pour estimer le vieillissement du bitume qui se manifeste par (Feth.a.,2016):

- une diminution de la pénétrabilité à 25°C ;
- une augmentation de la température de ramollissement TBA ;
- et une diminution de la ductilité à 25°C.

II.8.4. Facteurs affectant le vieillissement des bitumes :

Toutes les matières bitumineuses sont modifiées par une exposition aux intempéries qui peuvent changer notablement les caractéristiques physiques et chimiques du produit. en général, les facteurs affectant le vieillissement du bitume sont :

- La chaleur
- Le froid
- L'exposition à l'air
- La lumière
- Les acides et les alcalins
- L'eau stagnante et les dissolvants

II.9. Relation entre la composition, la structure et le comportement viscoélastiques des bitumes :

L'état d'équilibre des bitumes qui dépend de la composition chimique de ses constituants, détermine non seulement son comportement rhéologique, mais aussi ses fluctuations vis-à-vis de la température. Il résulte donc d'un équilibre physicochimique entre les divers constituants. Celui-ci est caractérisé par un indice d'instabilité colloïdale IC, défini par la relation (HADD.S., 2007) :

$$IC = \frac{(\% \text{ asphaltènes}) + (\% \text{ Saturés})}{(\% \text{ Résines}) + (\% \text{ Aromatiques})}$$

II.10. Propriétés

Le bitume a été choisi comme matériau principal dans l'élaboration des routes pour sa souplesse d'emploi, ses propriétés d'adhésivité, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau et d'inertie à de nombreux agents chimiques (Tachon N., 2008).

▪ Réactivité

En général, le bitume est inerte chimiquement vis-à-vis de la plupart des composés hydrocarbonés, mais, les composés aromatiques peuvent réagir notamment avec l'oxygène.

Les bitumes soufflés ou oxydés sont d'ailleurs préparés grâce à ce type de réaction. Outre ces réactions d'oxydation, des réactions de condensation peuvent avoir lieu à des températures supérieures à 160°C en présence de H₂S₂3. Les acides présents dans les résines du bitume sont aussi sensibles à certaines attaques basiques.

▪ Adhésivité

Le bitume se comporte comme une colle de très bonne qualité qui assure une liaison entre les granulats. Il adhère sur la plupart des roches. Cette adhésivité se manifeste d'une manière active par le collage solide des granulats secs et propres entre eux et d'une manière passive en permettant une résistance aux phénomènes de désherbage dus à l'eau et aux attaques chimiques. Seuls les produits chimiques dérivés du pétrole, tel que le kérosène et le gazole, peuvent endommager l'enrobé.

▪ Cohésion

Même lors de contraintes particulières exercées sur la chaussée, l'enrobé ne se désagrège pas. La ductilité du bitume permet un écoulement lent au sein de l'enrobé et non une rupture, tandis que sa ténacité assure une résistance suffisante sous l'effet de contraintes de traction.

▪ Viscoélasticité

Le bitume n'est ni un fluide newtonien, ni un solide élastique, il a un comportement intermédiaire suivant la température, et la charge appliquée. La viscoélasticité confère des propriétés mécaniques de souplesse et de fermeté au bitume. Mais ce caractère est largement dépendant de la température et de l'origine du bitume.

En première approximation, le bitume peut être considéré comme un solide ou un liquide visqueux à haute température ($> 80^{\circ}\text{C}$), un liquide ou un solide viscoélastique de 0°C à 80°C , et un solide élastique fragile à basse température $< 0^{\circ}\text{C}$. Le comportement du bitume suivant la température a été résumé par Olard et coll (**Figure II.11**).

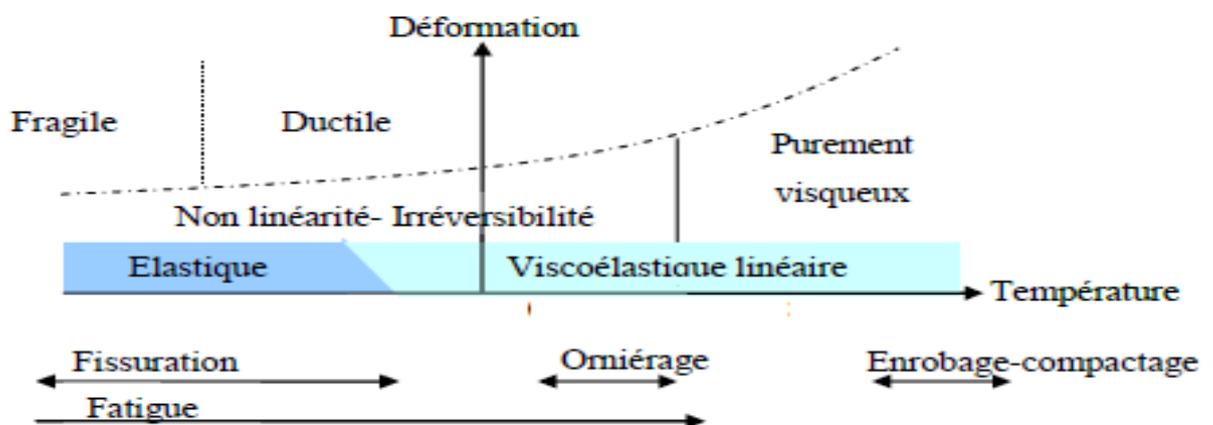


Figure II.11: Classe de comportement du bitume

II.11. Caractérisation

Caractérisation classique :

Trois mesures classiques caractérisent le bitume de manière empirique (GPL ; 2005) :

- La pénétrabilité,
- La température de ramollissement bille-anneau,
- Le point Fraass.

Tableau II.2: Spécifications françaises des bitumes purs (NF T 65-001)

Caractéristique	Unité	Méthode de	Désignation des classes appropriées				
			20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s	×0.1 mm	EN 1426	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement Bille et Anneau	°C	EN 1427	55/63	50/58	46-54	43-51	35-41
Résistance au durcissement RTFOT à 163 °C		EN 12607-1					
variation de masse maximum +/-	%		0.5	0.5	0.5	0.8	1
pénétrabilité restante, minimum	%	EN 1426	55	53	50	46	37
point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	EN 1427	57	52	48	45	37
augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	EN 1427	8	8	8	9	11
Point d'éclair	°C	EN ISO 2592	240	240	230	230	210
Solubilité, minimum	% (m/m)	EN 2592	99	99	99	99	99
Teneur en paraffine, maximum	% (m/m)	EN 12606-2	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

La pénétrabilité et la température bille-anneau définissent la consistance du bitume et permettent de le classer et de déterminer un indice de pénétration noté IP. cet indice de pénétrabilité caractérise la susceptibilité thermique du bitume et l'évolution de sa consistance en fonction de la température. Le **Tableau II.2:** montre les Spécifications françaises des bitumes purs (NF T 65-001) (**GPL ;2005**).

Plus cet indice est élevé, moins le bitume est sensible à des variations de température malgré leur fiabilité et leur reproductibilité sur la plupart des bitumes purs, les problèmes d'adaptabilité de ces méthodes aux bitumes modifiés aux polymères et aux bitumes soufflés, notamment lors de l'essai Fraass, ont nécessité la mise en oeuvre de nouvelles méthodes de caractérisation : les essais SHRP.

II.11.1. Essais américains SHRP (Strategic Highway Research Program) :

programme de recherche concernant l'étude des routes cette technique prend en compte de nouveaux paramètres tels que la météorologie du lieu (température maximale et minimale à la surface de la chaussée), sa situation géographique (latitude) et la rhéologie. Elle permet d'accéder aux caractéristiques intrinsèques du bitume telles que la mesure du module de rigidité (Tachon N., 2008).

Ce module peut être déterminé à toutes les températures auxquelles la chaussée peut être soumise. Avec les essais SHRP, le liant est entièrement décrit d'un point de vue rhéologique.

II.12. Essais classiques sur le bitume :

Parmi les essais effectués sur le bitume nous pouvons citer (GPL ;2005) :

- Pénétrabilité à l'aiguille : [NF T66-004]
- Point de ramollissement : [NF T 66-008]
- Densité relative : [NF T66-007]
- Perte de masse au chauffage : [NF T66-011]
- Solubilité : [NF T66-012]
- Ductilité : [NF T66-006]
- Point de flamme et point de feu : [NF T66-118]
- Viscosité cinématique : [EN 12595]
- Teneur en paraffine : [NF T66-015]

II.13. Les bitumes modifiés :

Les bitumes modifiés sont des bitumes dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées pendant la fabrication par l'emploi d'un ou de plusieurs agents chimiques (HADD.S., 2007).

II.13.1. Avantages des bitumes modifiés :

Par le bitume modifié on obtient un matériau de construction qui a les propriétés suivantes:

- Se lie bien avec les matières minérales ; souple et élastique à basse température et résiste à la déformation à haute température;

- Absorbe rapidement les chocs thermiques et turbulents dans les couches d'asphalte de la chaussée;
- Résiste aux charges de fatigue pendant les variations de température;
- Large gamme de plasticité et plus large intervalle de température de service;
- Meilleures propriétés mécaniques et la dureté.

II.13.2. Bitumes modifiés aux polymères :

Dans toute cette étude, le terme bitume est employé pour qualifier un bitume pur, et le terme liant regroupe le mélange contenant un bitume et un ou plusieurs additifs : polymères, fluxants, cires (GPL ;2005).

II.13.3. Différents agents de modification :

Les agents de modification comprennent le caoutchouc naturel, les polymères synthétiques, le soufre et certains composés organométalliques. Ils ne comprennent pas l'oxygène, les catalyseurs d'oxydation, les fibres, les poudres minérales, les agents d'adhésivité.

II.13.4. Evolution des caractéristiques mécaniques des bitumes modifié :

Par définition, un bitume modifié aux polymères (PET) est un liant qui, par addition de polymères organiques à des bitumes, conduit à des produits fabriqués en usine et livrés prêts à l'emploi comme un bitume classique.

Le but de cette modification est d'approcher le comportement rhéologique d'un liant idéal en vue de diminuer la susceptibilité thermique du liant .

Le liant idéal garde une viscosité très élevée jusqu'à des températures supérieures à celles que peut atteindre la chaussée. Le phénomène d'orniérage est alors limité.

Au-delà de cette température, la viscosité du liant doit chuter rapidement pour qu'il acquière une maniabilité importante et ceci à des températures peu élevées. L'enrobage est ainsi possible à des températures plus basses qu'avec un bitume classique.

Il s'agit, finalement, en modifiant le liant d'augmenter le domaine de température sur lequel un enrobé peut résister à l'orniérage, à la fissuration thermique et à la fatigue .

Tous les bitumes ne sont pas modifiables par des polymères. La compatibilité du bitume avec le polymère se traduit par un mélange bitume/polymère visuellement homogène auquel l'ajout de polymères confère des propriétés mécaniques intéressantes.

Pour cela, le polymère ne peut être compatible avec le bitume que s'il est au moins gonflable ou mieux soluble dans la fraction huileuse des maltènes. Seuls les polymères thermoplastiques, les plastomères (en général les copolymères d'éthylène) et les élastomères (les copolymères séquentiels styrène-butadiène pour les plus connus), sont compatibles avec ce type d'utilisation.

II.14. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la présentation des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des bitumes routiers, en abordant les deux types de bitumes ; classiques (purs) et modifiés (avec ajout de polymères). Ces derniers constituent le composant indispensable pour la fabrication des enrobés à module élevé.

Chapitre III



**Les applications des
produits bitumineux**

III.1. INTRODUCTOIN:

Le bitume ou l'asphalte est un matériau solide, qui devient un liquide d'une épaisseur lorsqu'il est exposé à la chaleur. C'est une substance glucidique qui se dissout dans une solution de disulfure de carbone (**GPL., 2005**). L'asphalte est l'une des industries nécessaires et très demandées en raison de sa grande importance et de ses nombreuses utilisations. Parmi les utilisations du bitume est :

A) Applications hydrauliques :

Les performances du bitume en matière d'étanchéité sont connues depuis la plus haute Antiquité.

On peut voir encore aujourd'hui des ouvrages hydrauliques à base de bitume vieux de 3 000 ans telles les digues du Tigre, à Assur, en Mésopotamie, encore en bon état. Imperméables, insensibles à l'eau, résistant à la plupart des agents chimiques courants et aux micro-organismes, durables, les bitumes possèdent une grande aptitude à résoudre de nombreux problèmes d'hydraulique. La souplesse des étanchéités bitumineuses leur permet de s'adapter aux tassements de leur support sans se fissurer ni perdre leurs propriétés. Pour les applications hydrauliques, les bitumes peuvent être utilisés purs ou sous forme de membranes bitumineuses préfabriquées, d'asphalte coulée ou d'enrobés.

- Enrobés étanches pour masques amont de barrage.
- Enrobés étanches pour écran interne de barrage.
- Enrobés étanches pour revêtements de canaux.
- Géo membranes bitumineuses.

B) Applications industrielles :

Les utilisations industrielles du bitume, c'est-à-dire autres que routières et hydrauliques, sont multiples et variées. Elles font souvent appel à des produits spécifiques :

- Bâtiments, ouvrages d'art, trottoirs
- Etanchéité par membranes bitumineuses
- Réalisations à base d'asphalte
- Isolation thermique et phonique des bâtiments
- Peintures, encres et vernis

C) Applications routières:

Les matériaux bitumineux, employés depuis le début du XX^e siècle pour le revêtement des chaussées très circulées (couche de roulement), ont vu leur utilisation étendue à partir des années 1960-70 à la constitution des couches d'assises (couche de liaison, couche de base).

Aujourd'hui, en construction neuve, les matériaux traités avec un liant bitumineux représentent pratiquement la totalité des couches de roulement des chaussées revêtues et ils offrent une solution de plus en plus prisée pour les couches d'assise des chaussées à moyen et fort trafic. De même, la totalité des opérations d'entretien et de rénovation des chaussées revêtues fait appel aux liants bitumineux.

L'évolution du trafic routier, en particulier l'accroissement des contraintes engendrées par les poids lourds, et les exigences accrues dans le domaine de la sécurité et du confort, auxquelles s'ajoutent aujourd'hui des considérations liées à la préservation des ressources et à la protection de l'environnement, expliquent cette montée en puissance d'un matériau dont les qualités d'économie à la production, de facilité de mise en œuvre et de durabilité à l'usage ne sont plus à démontrer

Autres applications :

Le bitume peut entrer dans de nombreuses autres applications, parmi lesquelles on peut citer :

- Insonorisation de pièces d'automobiles (amortissement des vibrations).
- Industrie du caoutchouc (facilite le démoulage).
- Enduction de papier d'emballage (étanchéité).
- Isolation électrique et piles électriques (résistivité électrique).
- Condensateurs (constante diélectrique).
- Face inférieure de moquettes (amortissement et collage)
- Agriculture (germination accélérée grâce à un tapis d'émulsion biodégradable, le "Much")
- Pigeons d'argile (propriétés mécaniques)
- Graisses spéciales utilisées dans des conditions de température et de pression très élevées (Laminoirs).

III.1.1. Rôle du bitume dans la chaussée :

Le pouvoir collant du bitume en fait un matériau de construction essentiel, bien qu'il n'entre qu'en faible proportion (4 à 7 % en masse) dans la plupart des mélanges bitumineux routiers.

Il contribue par ses propriétés viscoélastiques au comportement mécanique de la structure de la chaussée. Il en assure également l'étanchéité du fait de son insensibilité à la plupart des agents chimiques usuels, en particulier l'eau.

Une chaussée, rappelons-le, est une structure constituée d'une superposition de couches:

Couche de roulement, couche de liaison, couche de base, couche de fondation. La couche de roulement et la couche de liaison sont aujourd'hui habituellement réalisées en matériaux bitumineux.

La couche de base, traditionnellement réalisée au liant hydraulique, fait de plus en plus largement appel aux liants bitumineux.

Il faut noter que, conséquence de l'évolution du trafic routier (plus lourd et canalisé), on utilise des bitumes de plus en plus durs, de classe 35/50 plutôt que le traditionnel 50/70.

Pour certaines applications, en particulier les graves-bitume structurantes des couches inférieures... pour chaussées à trafic lourd, l'emploi de bitumes 15/25 et même 10/20, n'est plus une exception.

III.2 Les chaussées :

III.2.1. Définition :

Est la partie d'une voie de communication affectée à la circulation des véhicules. Au Moyen Age, les routes importantes étaient recouvertes de cailloux et de pierres liés à la chaux, terme qui a donné le mot chaussée (**Didier. L., 2002**).

Les chaussées (routières, ferroviaires, aéroportuaires, de tramway, industrielles, etc.) sont des structures composites, multicouches (**Figure III.1**), souvent complexes, conçues pour résister sur une durée de vie relativement longue aux multiples sollicitations mécaniques (liées principalement au passage de charges lourdes) et climatiques (cycles de température, pluie, gel, UV, etc.), qui l'une après l'autre dégradent imperceptiblement les performances initiales des matériaux et de leurs interfaces.

La construction d'une route passe par les étapes de choix de tracé, terrassement (préparation du terrain, comblement des trous, rognage des bosses, planéité de l'arase de terrassement), mise en œuvre d'une couche de forme (elle participe au fonctionnement mécanique de la chaussée), puis d'une couche d'assise (elle apporte la résistance mécanique aux charges), puis d'une couche d'accrochage (liaison entre couche d'assise et couche de roulement, elle est réalisée avec une émulsion de bitume), et enfin d'une couche de roulement.



Figure III.1 : schéma d'une structure de chaussée

Sur une coupe de chaussée neuve, on distingue trois niveaux de couches principales :

- la plateforme support de chaussée.
- les couches d'assise.
- les couches de surface.

III.2.2. Les différentes structures de chaussées :

Selon le fonctionnement mécanique de la chaussée, on distingue généralement les trois différents types de structures suivants (**Jean.L., 2019**):

- Chaussées souples.
- Chaussées semi-rigides.
- Chaussées rigides.

III.2.2.a. Chaussées souples :

C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent sont traitées aux liants hydrocarbonés (**Figure .III.2**).

La couche de fondation et/ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée (Jean.M ., 2017).

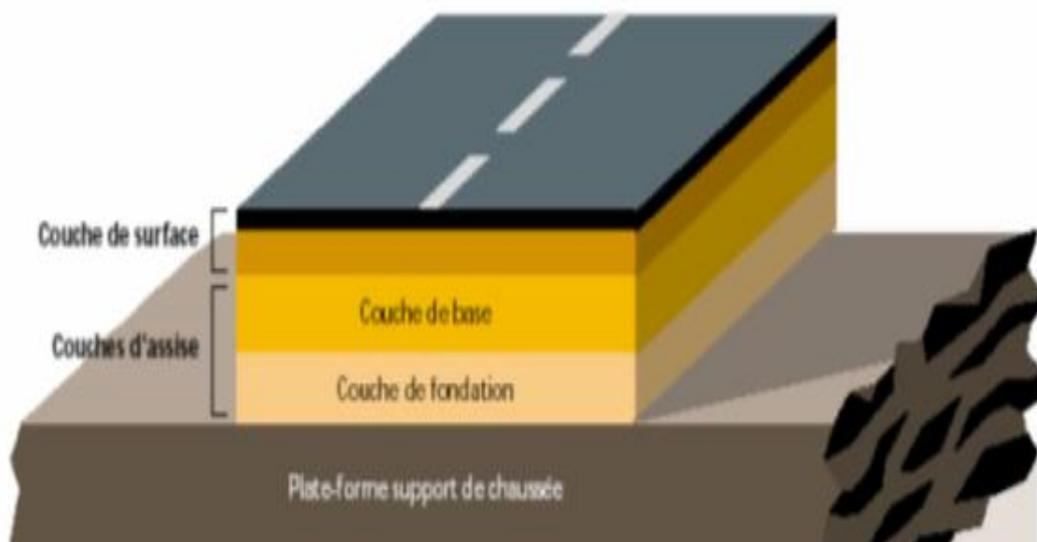


Figure III.2: Schéma d'une structure de chaussée souple.

III.2.2.b. Chaussées semi-rigides :

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation) (Figure. III.3).

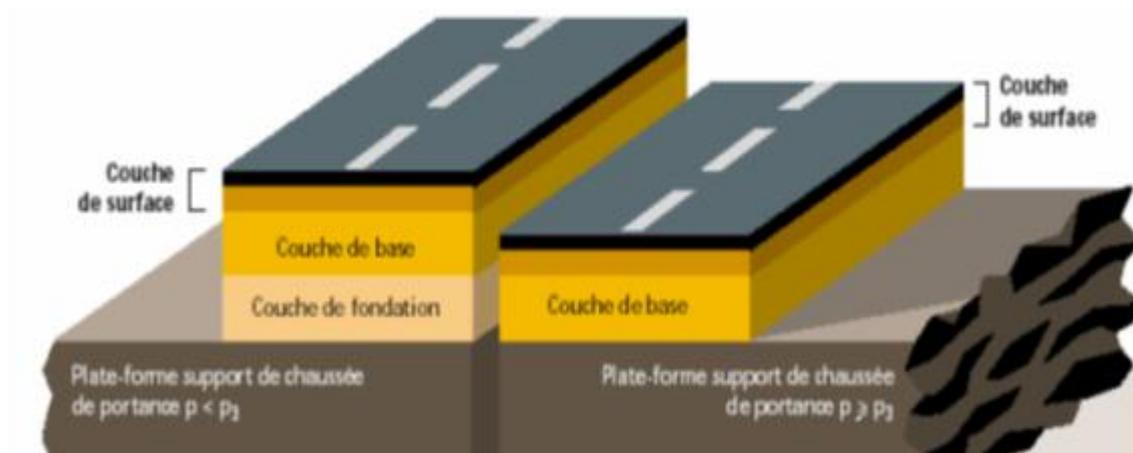


Figure III.3: Schéma d'une structure de chaussée semi-rigide

III.2.2.c. Chaussées rigides :

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide (**Figure III.4**) en règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes (**Jean.M ., 2017**) :

Une couche de forme.

Une couche de fondation.

Une couche de roulement en béton de ciment.

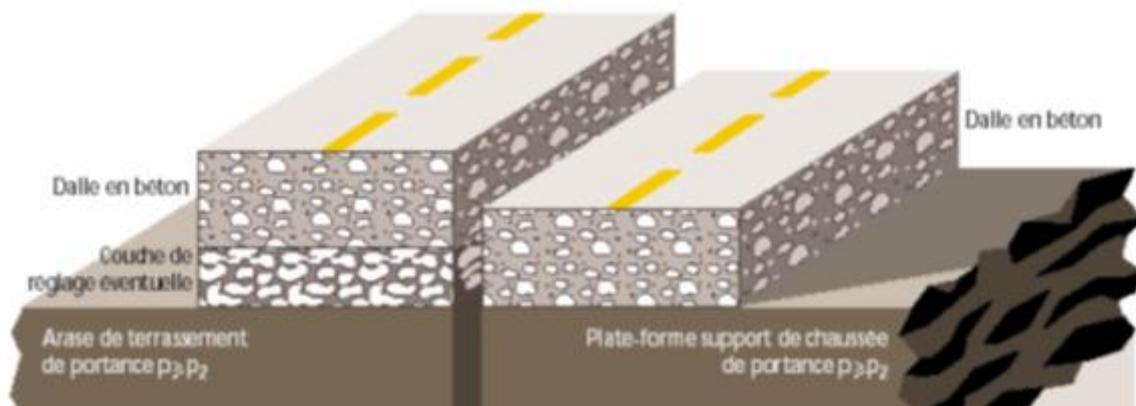


Figure III.4: Schéma d'une structure de chaussée rigide.

III.2.3. Les chaussée avec bitume modifié :

Dans le domaine des routes, le monde a souffert de la détérioration rapide de la chaussée. C'est ce qui a poussé les spécialistes à chercher une solution différente. Parmi ces solutions populaires récemment, il y a le changement de bitume avec des polymères pour améliorer les propriétés de la route et leur donner une longue durée de vie (**Figure III.5**).

Bitume polymère modifié utilise des polymères qui représentent la famille la plus importante de bitume modificateurs. En fonction du type de polymère, les caractéristiques du bitume sous différentes températures changent. Par exemple, les polymères font bitume résistant aux fissures de chauffage (**GPL ;2005**).

Modifier les spécifications bitume améliore la qualité du produit et augmente sa longévité. par conséquent, les frais de conservation diminueront fortement.

le développement croissant quotidien de polymères et de leur diversité ont fait des recherches approfondies sur ces matériaux à travers le monde.

Bien que le bitume modifié par des polymères des coûts plus élevés que le bitume pur, ils sont considérés comme plus économiques en raison des avantages économiques de la baisse des coûts de réparation des routes.



Figure III.5: Photo pour une chaussée routière

III.2.4. les Enrobés :

Le terme enrobé bitumineux est une appellation générique alors que le terme béton bitumineux est réservé aux couches de surface, de liaison ou de roulement.

C'est un mélange uniforme de granulats enrobés de bitume (**Figure III.6**) (ou enrobé bitumineux ou béton bitumineux ou grave bitume) : pour constituer la chaussée des routes [Guil G., 2020].

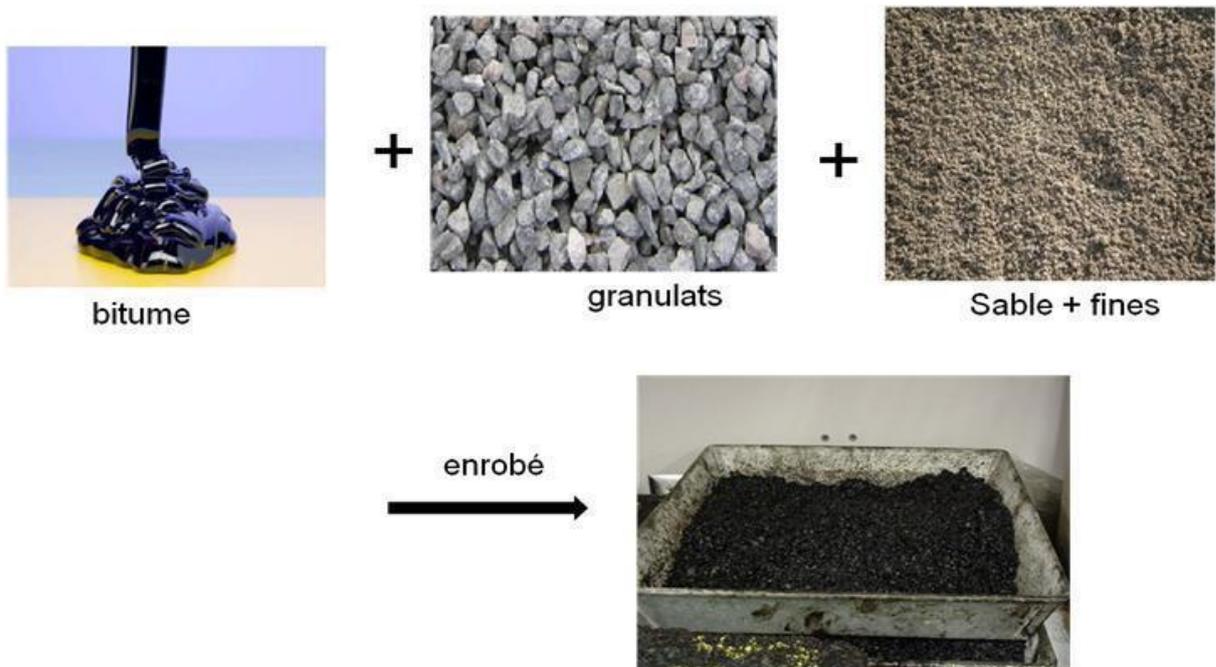


Figure III.6: La composition d'enrobé

Chaque type d'enrobé est défini par la nature et le dosage de ses composants par ses performances particulières et par la couche de la chaussée (**Figure III.7**) à laquelle il est destiné.

Les enrobés bitumineux sont à ce jour un composant essentiel à la création ou réfection d'une structure routière

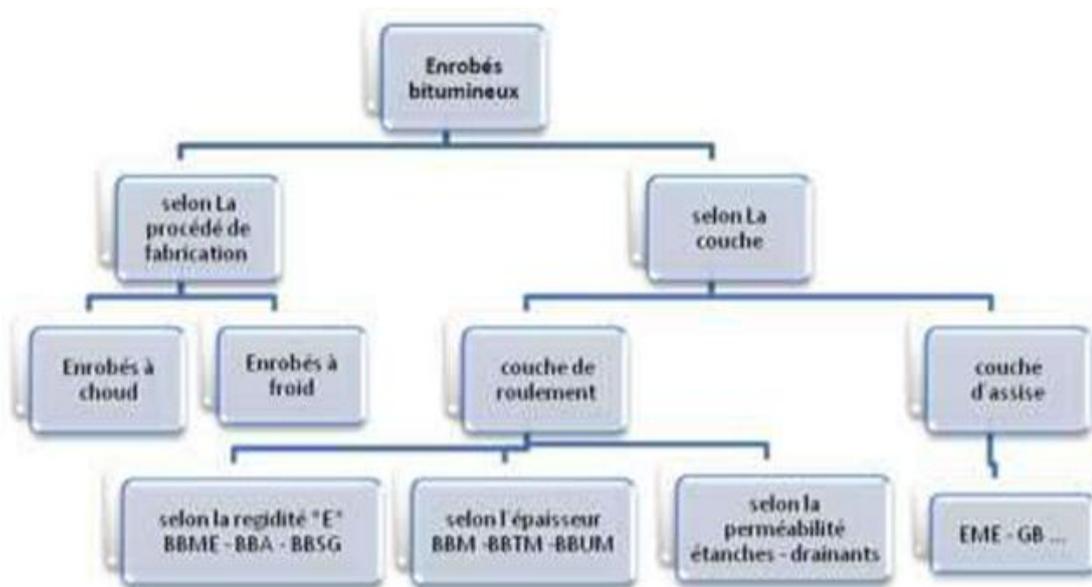


Figure III.7: Classification des enrobés

III.2.4.1.Fabrication d'enrobé :

L'enrobé est fabriqué dans des usines appelées « centrales d'enrobés », (**Figure III.8**) fixes ou mobiles, utilisant un procédé de fabrication continu ou par gâchées (**Guil G., 2020**).



Figure III.8: Centrales d'enrobés fixes

III.2.4.2. Enrobé à module élevé (EME) :

Ce mélange est destiné aux couches de liaison soumises à un trafic lourd (principalement pour diminuer l'orniérage) ; Ce sont des Enrobés préparés à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage.

Ils sont destinés à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcement de chaussées.

Ils se caractérisent par un module de rigidité élevé atteignant 17000MPa et une plus grande résistance à la fatigue que les enrobés classiques (BOU. M. MEL A., 2019).

On distingue deux classes de performance classe 1 et classe 2. Les granularités utilisées sont 0/10, 0/14 et 0/20

Chaque type d'EME comprend deux classes granulaires qui diffèrent entre elles notamment par leur teneur en liant et la dureté. On distingue (Djabri. A et HAMMANA. A ; 2016):

- ✚ EME Classe 1 : correspond à des graves bitumes à module élevé obtenues par l'emploi d'un bitume dur, aux dosages voisins de ceux des graves bitumes (GB).

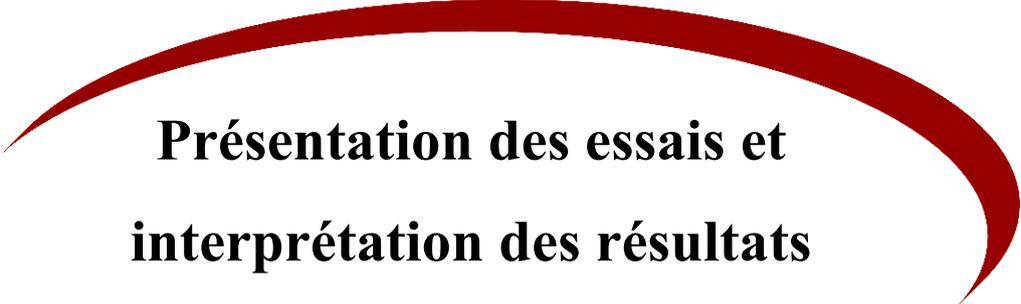
- ✚ EME Classe 2 : correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur, généralement parlant de l'EME.

Les types des enrobés mentionnés ci-dessus sont les plus connus et les plus utilisés en Algérie. Il reste d'autres types d'enrobés qui ne sont pas cités dans ce mémoire, tels que : les enrobés drainants, les enrobés très minces, etc.

III.3.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes applications des bitumes, en particulier, les utilisations dans le domaine de la construction routière. Les performances de l'enrobé qui entre dans la construction des différentes couches de chaussée dépendent en majeure partie des caractéristiques du bitume utilisé, d'où l'intérêt d'améliorer ses performances techniques.

Chapitre VI



**Présentation des essais et
interprétation des résultats**

VI.1.Introduction :

Dans notre étude, la modification du bitume a été réalisée au niveau du laboratoire du Groupe Belhoucine Service (GBS).

Dans ce chapitre, nous allons présenter le protocole de modification des bitumes purs par ajout de déchets plastiques de type PET et PRplast ainsi que les principaux essais expérimentaux employés dans l'étude de caractérisation des bitumes. A la fin, nous concluons par l'interprétation des résultats obtenus.

VI.2. Les additifs utilisés :

Dans notre travail, on a utilisé un polymère de type PET (Polytéréphtalate éthylène), obtenu à partir de déchets de bouteilles plastiques broyés, de dimensions 0/1,25mm.

L'aditif nous a été fourni par une entreprise Allemande (Gala plastics and rubber machinery GmbH), mais les bouteilles plastiques ont été collectées en Turquie.

Le PRPLAST est un produit industriel à base de plastique recyclé (câble téléphonique, bouchons de bouteilles plastiques,...), contenant du carbone et de l'hydrogène, de dimension 4 mm. (**Figure IV.1**).



Figure IV.1: Additifs utilisés

IV.3. Protocole de modification du bitume :

La **Figure IV.2:** montre un schéma explicatif du protocole de modification du bitume.

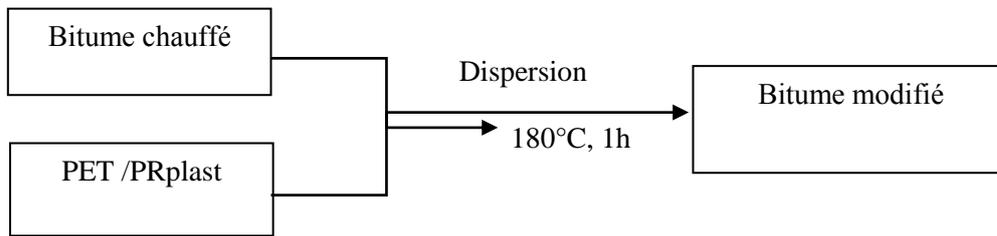


Figure IV.2: Schéma explicatif du protocole de modification du bitume

Pour la modification du bitume, on procède tout d'abord au chauffage du bitume pur dans une étuve jusqu'à ce qu'il atteigne la température de 160°C, puis on le met dans le bac chauffant (**Figure IV.3a**) pour incorporer les différentes proportions d'additifs lentement (1.5% PET, 3%PET ,4.5% PET, 1.5% PRPlast, 1.5% PET+1.5 PRPlast). On effectue après la dispersion à l'aide d'un dispersant (**Figure IV.3b**) qui devra se faire à une température de 180°C. En atteignant cette température, la vitesse du dispersant est réglée à 3500 tr / min et le processus sera poursuivi pendant 45 minutes environ. On doit vérifier la température régulièrement durant tout le processus à l'aide d'un capteur de température (**Figure IV.3c**), qui doit être comprise entre 175°C et 185°C.

Les échantillons préparés seront transférés après vers des petits récipients, puis stockés pour être utilisés dans la suite de l'étude expérimentale.



Figure IV.3: Photo montrant : (a) le bac chauffant ; (b) le dispersant ; (c) le capteur de température

VI.4. L'essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426):

Dans les spécifications européennes le bitume routier est référencé selon le résultat de l'essai de pénétrabilité.

La pénétrabilité est un essai normalisée, la méthode porte la référence EN 1426, dans cet essai une aiguille normalisé portant une charge définie 100g pénètre dans un échantillon de bitume placé dans gobelet pendant 5 secondes à la température ambiante, généralement 25°C.

La profondeur de pénétration est exprimée en dixième de millimétré, moins l'aiguille pénètre dans le bitume, plus il est dur.

a)Matériel utilisé :

-Pénétrömètre à bitume, Étuve, gobelet, spatule. (Figure IV.4)

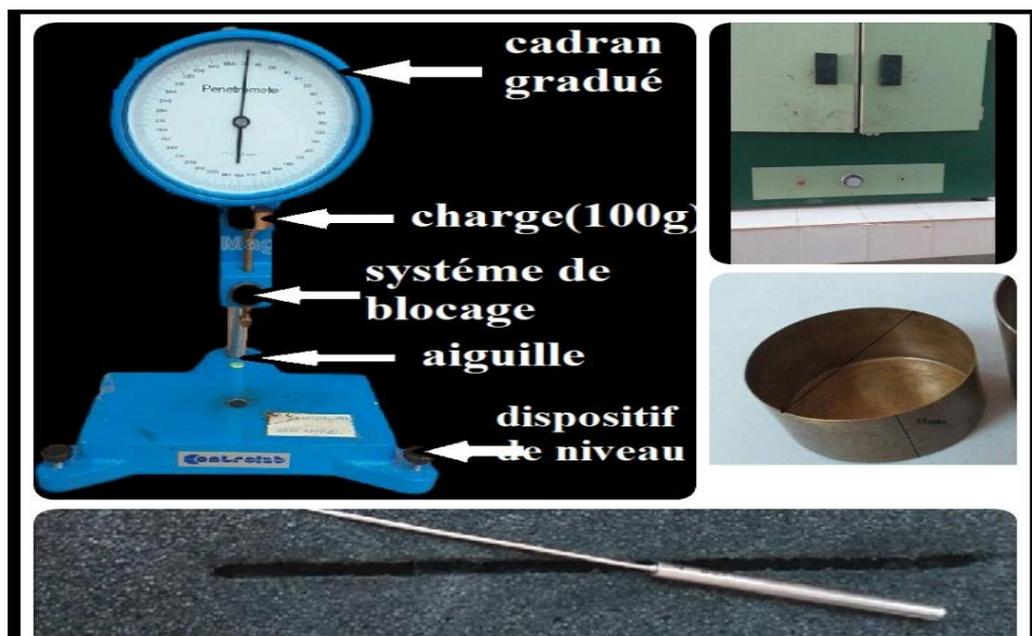


Figure IV.4: photo montrant l'appareillage utilisé pour l'essai de pénétrabilité

b) Mode opératoire :

D'abord, on prépare la prise d'essai avant toute chose. Pour ce faire, on effectue les opérations suivantes :

- Chauffer l'échantillon à la température $T = 100^{\circ}\text{C}$ jusqu'à ce qu'il devienne fluide pour pouvoir être versé dans les gobelets ;
- Agiter l'échantillon pour l'homogénéiser puis verser dans le gobelet normalisé à une profondeur de 35 mm et un diamètre de 55mm.

Chapitre VI Présentation des essais et interprétation des résultats

- Laisser refroidir à la température ambiante pendant 40 min, puis le mettre dans un bain marée où la température est de 25° pendant une heure et demi ;
- Après une heure et demi, on récupère le goblet pour effectuer les mesures de pénétrabilité.

Au moment de la mesure de la pénétrabilité, les étapes ci-après doivent être strictement maîtrisées pour pouvoir déterminer la vraie classe du bitume :

- Placer le récipient sur le plateau du pénétromètre ;
- Vérifier que l'aiguille du pénétromètre soit chargée de 100g ;
- Ramener à zéro l'aiguille du cadran ;
- Libérer l'aiguille du pénétromètre pendant 5secondes voir **Figure IV.5** ;
- La bloquer et mesurer la profondeur d'enfoncement ; Répéter les opérations au moins trois fois en différents points de la surface de la prise d'essai distant de 10mm les uns des autres et après on prend la moyenne.



Figure IV.5: Photo montrant le mode opératoire de la pénétrabilité à l'aiguille.

Remarque :

Pour les bitumes plus mous, de pénétration supérieure à 350, on doit utiliser le gobelet B (voir tableau 10) et déterminer la pénétration en appliquant une charge totale de 50g. Une valeur approchée de la pénétration dans les conditions standards (25°C, 100g, 5s) est alors donnée par la formule:

$$P_{100} = P_{50} * 1.414$$

Tableau IV.1: dimensions normalisées des gobelets

Gobelets	A	B
Diamètre (mm)	55	55
Profondeur (mm)	35	57
Charge appliqué (g)	100	50

Le tableau suivant définit les différents résultats obtenus pour cet essai (**Tableau IV.2**) :

Tableau IV.2: Résultats d'essai de pénétrabilité à l'aiguille

Pénétrabilité à l'aiguille Echantillons	Mesures					Valeurs Moy
Bitume Pur	90	100	90	100	100	96
Bitume + 1,5 % PET	95	92	88	90	86	90,2
Bitume + 3 % PET	85	85	85	85	80	84
Bitume + 4,5 % PET	86	90	86	80	83	85
Bitume+ 1,5 % PRPlast	80	77	78	68	70	74,6
Bitume + 1,5 % PET + 1,5 PRPlast	78	78	76	75	75	76,4

IV. 5. L'essai de point de ramollissement (NF EN 1427):

La détermination de point de ramollissement, également connu sous le nom de bille-Anneau, consiste à mesurer la température à laquelle un échantillon de bitume atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

a) Matériel utilisé :

Appareil bille-anneau, b cher en verre, étuve, thermomètre, spatule **Figure IV.6.**

b) Mode opératoire :

- Comme dans la mesure de pénétrabilité, il faut préparer la prise d'essai.
- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide pour être vers ;
- Poser les deux anneaux sur une plaque puis y verser l'échantillon;
- Laisser refroidir pendant 30 minutes;
- Après refroidissement, araser à l'aide d'une spatule légèrement chauffé l'excès de produit

Les étapes pour mesurer le point de ramollissement du liant bitumineux sont comme suit :

- Assembler l'appareillage avec les anneaux, le thermomètre et les guides en position correcte;
- Remplir le b cher avec de l'eau distillée à 5 C sur une hauteur entre 102 et 108 mm;
- Maintenir la température à 5 C pendant 15mn ;
- Placer une bille à l'aide d'une pince au centre de chaque guide ;
- Chauffer l'ensemble de façon, à élever la température de 5 C par minute qui doit être uniforme ;
- Noter dans chaque ensemble Bille-Anneau la température indiquée par le thermomètre, à laquelle la bille touche la plaque inférieure du support.



Figure IV.6: Photo montrant l'appareillage et mode opératoire de TBA

Le tableau suivant résume les différents résultats obtenus pour cet essai (**Tableau IV.3**):

Tableau IV.3: résultat de l'essai bille-anneau

Bille & Anneau	Mesures		Valeurs Moy (°C)
Echantillons			
Bit. Pur	49	48	48,5
Bit. + 1,5 % PET	49	49	49
Bit. + 3 % PET	49	49	49
Bit. + 4,5 % PET	50	50,5	50,25
Bit. + 1,5 % PRPlast	51	53	52
Bit. + 1,5 % PET + 1,5 PRPlast	49	50	49,5

IV.5 L'essai de ductilité (NF EN 13589) (indice de classement : T66-038):

Le but de cet essai est de déterminer la ductilité des liants bitumineux par élongation.

a) Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer l'allongement à la rupture d'une éprouvette de forme déterminée et à une vitesse et une température normalisée

b) Matériel utilisé :

Ductilimètre, moule (**Figure IV.7**) et plaque de moulage, étuve, thermomètre, spatule.

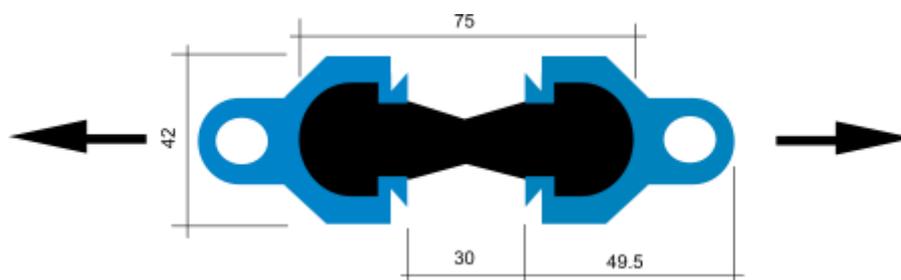


Figure IV.7 : Dimensions du moule de l'essai de ductilité

c) Mode opératoire (Figure IV.8):

-Préparation de l'échantillon :

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il devienne fluide.

Chapitre VI Présentation des essais et interprétation des résultats

- Appliquer un enduit sur la plaque et les surfaces du moule en utilisant un mélange de 50 % de glycérine et 50 % de dextrine pour éviter l'adhérence du produit.
 - Placer le moule sur une surface plane puis le moule sur la plaque.
 - Remplir le moule à ras bord de l'échantillon.
 - Laisser refroidir pendant 30 à 40 min à la température ambiante.
- **Déroulement de l'essai :**
- Mettre en marche le bain thermostatique, la température doit être réglée à 25°C.
 - Placer l'éprouvette dans le bain pendant 1^H30min.
 - Mettre en translation le chariot, les deux pattes du moule s'éloignent à vitesse constante, jusqu'à rupture de l'éprouvette. Elle doit constamment baigner dans l'eau durant l'essai.
 - Au moment de la rupture, arrêter la translation du chariot, puis mesurer en cm la distance d'allongement.



Figure IV.8: photo montrant l'appareillage et mode opératoire de ductilité

Le tableau **IV.4** résume les différents résultats obtenus pour cet essai :

Tableau IV.4: les résultats obtenus par l'essai de ductilité

Echantillons	Mesures (cm)	Observations
Bit. Pur	150	Rupture Non Observée
Bit. + 1,5 % PET	110	
Bit. + 3 % PET	80	
Bit. + 4,5 % PET	85	
Bit. + 1,5 % PRPlast	150	Rupture Non Observée
Bit. + 1,5 % PET + 1,5 PRPlast	80	

IV.6. Analyse des Résultats:

On présente ci-après une analyse des résultats en se basant sur les tests réalisés, à savoir : l'essai de pénétrabilité, l'essai bille et anneau ainsi que l'essai de ductilité.

IV.6.1 Essai de pénétrabilité à l'aiguille :

Sur la **figure IV.9** on présente les résultats d'essais de pénétrabilité sur les différents échantillons de bitume, pur et modifié.

On peut remarquer que l'ajout de déchet plastique diminue la profondeur d'enfoncement de l'aiguille, ce qui traduit que l'additif a donné une certaine dureté au bitume.

Les meilleures améliorations sont obtenues pour un dosage de 1,5% de PRPlast, néanmoins un mélange de PET à 1,5% et 1,5% de PRPlast donne des résultats proches.

Il est à noter que la modification du bitume par ajout de déchet plastique de type PET est intéressante pour un dosage de 3%. En effet, la pénétrabilité diminue de 12/10 mm.

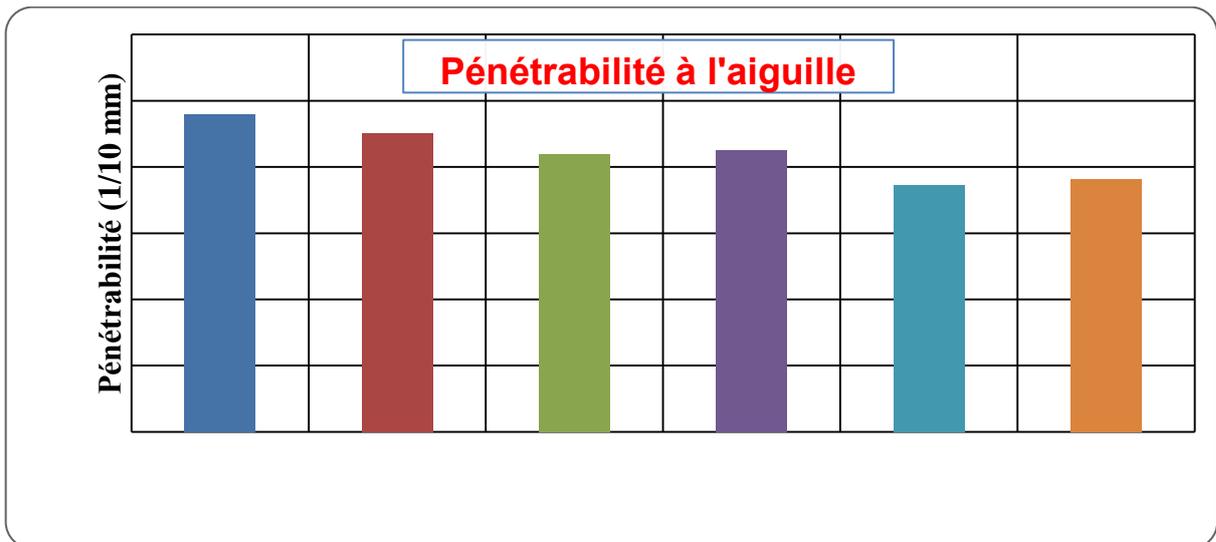


Figure IV.9 : Comparaison des résultats d'essais de pénétrabilité sur les différents échantillons de bitume

IV.6.2 Essai Bille et anneau :

Le meilleur résultat est obtenu, également, pour le bitume modifié par ajout de PRPlast (Figure IV.10). Un tel résultat est en adéquation avec l'essai de pénétrabilité. Le mélange se rapprochant de la meilleure valeur est celui contenant 4,5% de PET. Cependant, la modification du bitume par ajout de PET a amélioré la température de ramollissement pour tous les mélanges. En se référant à l'essai de pénétrabilité, on devrait avoir des résultats meilleurs pour le mélange mixte (PET+PRPlast).

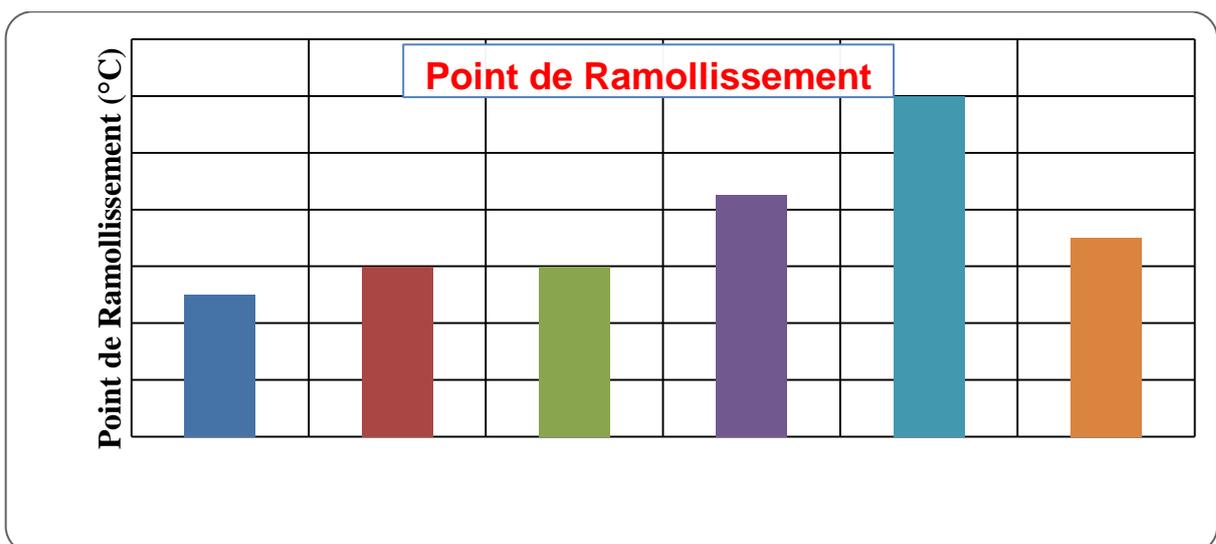


Figure IV.10: Comparaison des points de ramollissement des différents échantillons de bitume

IV.6.3 Essai de ductilité :

La figure IV.11 montre les résultats d'essais de ductilité, sous forme d'histogrammes, effectués sur les différents échantillons.

On observe que le bitume modifié avec du PRPlast donne des meilleurs résultats. Néanmoins, les autres mélanges offrent une ductilité acceptable (≥ 80 cm), ce qui rend les premiers essais plus significatifs et déterminants.

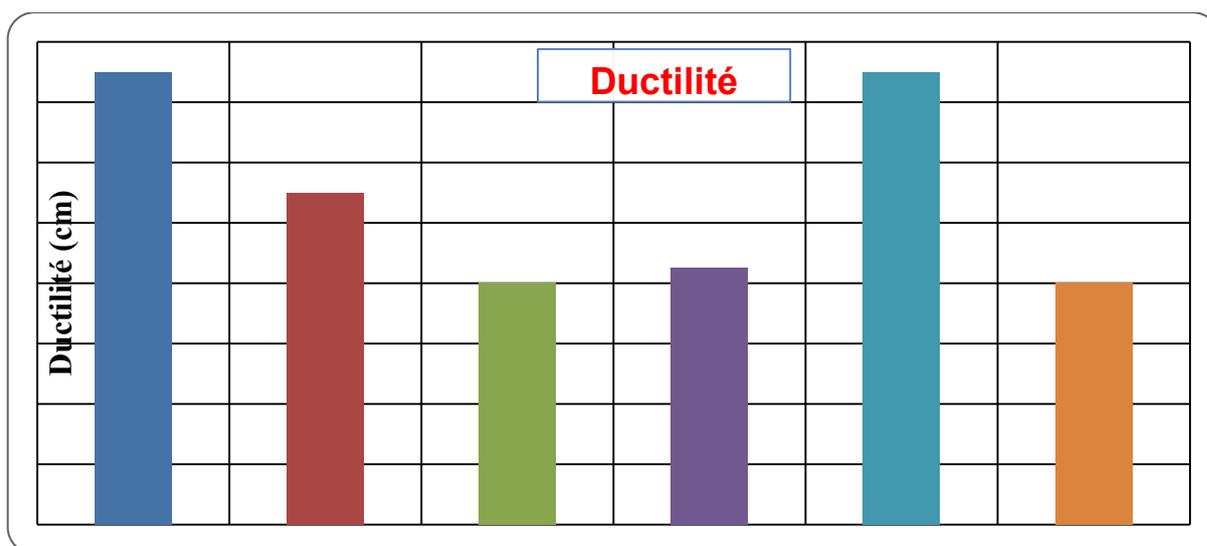


Figure IV.11: Comparaison des résultats d'essais de ductilité sur les différents échantillons de bitume

IV.7. Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre les essais réalisés dans le cadre de notre étude ainsi que l'analyse des résultats trouvés.

Il a été trouvé que l'ajout d'additifs au bitume pur améliore ses caractéristiques physiques (point de ramollissement, Bille et anneau). L'ajout de PET à raison de 3 à 4,5% donne des résultats proches à ceux du PRPlast, ce qui nous permet de dire que la modification du bitume par ajout de PET est intéressante, mais il faudra confirmer cette conclusion en réalisant des essais plus approfondis sur le bitume modifié, d'une part et sur les enrobés formulés à partir de ce bitume modifié, d'autre part.

Conclusions générales

Conclusions générales et perspectives

Notre travail consistait à incorporer les déchets plastiques de type PET aux bitumes routiers en vue d'améliorer ses performances techniques. Cette solution technique peut contribuer à réduire le problème environnemental lié aux gaz à effet de serre.

Pour y parvenir, nous avons mené l'étude expérimentale dans le laboratoire de 'GBS Groupe' pour la préparation des mélanges bitumineux contenant les additifs, et dans le laboratoire du département pour les essais de caractérisation des bitumes modifiés.

Les fibres PET nous ont été livrées par un industriel algérien (dans le recyclage du plastique) qui les a commandées chez une entreprise Allemande (Gala plastic & Rubber GmbH)

Nous avons établi un protocole expérimental pour modifier le bitume pur en ajoutant des particules de PET de taille 0/1,25 mm et de PRPlast à différentes proportions (1,5% PET, 3% PET, 4,5% PET, 1,5% PRPlast, 1,5% PET + 1,5% PRPlast).

Il a été trouvé que l'utilisation du PET à raison de 3 à 4,5% donne des résultats proches à ceux du PRPlast, ce qui nous permet de dire que la modification du bitume par ajout de PET améliore les performances techniques du bitume classique, ce qui rend ce procédé intéressant sur le plan environnemental et sur le plan technique.

Mais pour statuer sur un tel procédé, il est nécessaire de confirmer ces conclusions par des essais plus poussés sur le bitume modifié, d'une part, et sur des enrobés préparés avec le bitume modifié, d'autre part

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

Bekki.H. ,2017.,les essais de laboratoire de routes.5751 ,I.S.B.N , Algérie,43.44.45p

BENAYAD.M., Elaboration et caractérisation de réseaux de polymères interpénétrés à base de monomères acryliques: HEMA et acide acrylique. Mémoire de master en chimie : chimie des matériaux. UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM.6-7p.2018. Disponible sur < <https://docplayer.fr/159579468-Universite-abou-bekr-belkaid-tlemcen-memoire-presentee-a-faculte-des-sciences-departement-de-chimie-pour-l-obtention-du-diplome-de.html>> consulté le 24/07/2020

BENKACIMI.D., ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE DU PPH APRES DU VIEILLISSEMENT. Mémoire de Master académique en génie Mécanique : science des matériaux. Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou. 2016..8p. disponible sur <https://dl.ummtto.dz/bitstream/handle/ummtto/3194/Benkacimi,%20Dalila.pdf?sequence=1> consultée le 28/07/2020

BOUAZZA. M. MELLAKH A., 2019.Enrobe a module élevée : formulation et utilisation cas de formulation a 4 niveaux. Mémoire De Master FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES Kasdi Merbah Ouargla

Charles A ., 2019. Origine du bitume. Disponible sur : <https://www.wikip.fr/classement-des-bitumes> , page consultée le7/04/2020.

COULIBALY.B., 2008. Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastovisco plastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés. Thèse de doctorat : MECANIQUE DES MATERIAUX. Université Paul Verlaine de Metz.11p

Dahou.M . Kaddour.O. Mimoun.H., 2018. Valorisation des déchets plastiques en produits à valeur énergétique. Valorization of waste polyethylene into oils : p.2 consulté le 28/08/2020

De doctorat, université de Paul Cezanne, 2008.

Didier. L., 2002 « La Rhéologie des Bitumes : Principes et Modification, 1p .disponible sur :< <https://www.researchgate.net/publication/228582763>>. Consulté le 10/5/2020

DJOUILL., ETUDE DE LA STABILISATION DU POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC) ET LES PHENOMENES DE DEGRADATION. Mémoire de Magister en Chimie : Sciences des Matériaux. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER – BISKRA.2007.4p disponible sur

GPL(le Groupement Professionnel des Bitumes et destinée à faire connaître les

Références bibliographiques

Réalisations routières, industrielles).6/2005 by 1C bitume. info, disponible sur : <http://www.bitume.info/mission.jsp/> ,page consultée le 10/05/2020 .21 p

Guillaume G., 2020 Introduction aux Enrobés Bitumineux (E.B).25. École de Technologie Supérieure de Montréal.

HADDADI S., 2007. Des enrobés Influence de la Poudrette de Caoutchouc sur le Comportement au Fluage Bitumineux. memoire de Doctorat : genie civil. Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE, 6p.

IGGUI K.,2010. Modification de Bitumes par des Matériaux Polymères Dégradés à Base de Polyéthylène Basse Densité (PEBD) et de Copolymères d’Ethylène et d’Acétate de Vinyle (EVA).

Jean-Luc.A .,novembre 2019.La structure de la chaussée ., disponible sur : <https://www.wikiterritorial.cnfpt.fr/> **page consultée le7/04/2020**

Jean.M ., 2017. La structure de la chaussée ., disponible sur : <https://www.wikiterritorial.cnfpt.fr/> **page consultée le3/8/2020**

KEMASSI. N 2019 « Bitume Hautement Modifiés par Polymère (HiMA): Influence des polymères sur la viscosité des liants – Etude de cas : D0234 2019 » [PDF] mémoire de master consulté le 10/19/2020

Laetitia El Bese, recyclages à chaud des agrégats d’enrobés bitumineux, thèse

Le PVC, un matériau à l'histoire fascinante – Deceuninck. [En ligne]. <<https://www.deceuninck.fr/fr-fr/blog/fenêtres-en-pvc/le-pvc-un-matériau-a-lhistoire-fascinante>>.[Consulté le 04/08/2020]

Patricia Nicaud : Projet Troisième ROB’OK, Les Matières Plastiques [PDF]. 2009disponible sur<http://www.technologie.ac-aix-marseille.fr/spip/sites/www.technologie/spip/IMG/pdf/Les_matières_plastiques.pdf> consulté le 02/08/2020

Tachon N., 2008 . Nouveaux Types de Liants Routiers à Hautes Performances, a Teneur en Bitume Réduite par Addition de Produits Organiques Issus des Agro ressource. Mémoire de Doctorat : . DE L’INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE.17,18p.

TRAORE.B.,2018. Elaboration et Caracterisation d’une structure composite (sable et dechets plastiques recycles) : amelioration de laresistance par des charges en argiles. these de doctorat : matériaux. universite de bourgogne franche-comte.14-15p consulté le 04/04/2020

Références bibliographiques

Weiss, 2009 La chimie des polymères. Support de Cours, Université Médicale Virtuelle Francophone. 17 p.

Yvette, Ngonon-Ravache. La polymérisation. [En ligne].01/05/2007. Disponible sur <<https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-vulgarisation-polymeres-synthetiques-709/page/5/>>. [Consulté le 02/09/2020]

PATRICK.GUIRAUD.,2002,1p .disponible sur :

< <https://www.researchgate.net/publication/228582763>>. Consulté le 10/5/2020

- **Site Internet Consulté :**

alloprof.les matières plastiques [site web] disponible sur <<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-matieres-plastiques-s1550>> **consulté le 30/08/2020.**

BMP NAFTAL Les Bitume Modifiés aux Polymères <https://www.naftal.dz/fr/index.php/produits/professionnels/bitumes> page consultée le 07/07/2020

Futura planète. Recyclage.[PDF](01/01/2020).disponible sur < <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-recyclage-5774/>> consulté le 02/09/2020.

futura-sciences<https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-plastique-13438/>Consulté le 2/10/2020

Le PVC, un matériau à l'histoire fascinante – Deceuninck. [En ligne]. <<https://www.deceuninck.fr/fr-fr/blog/fenêtres-en-pvc/le-pvc-un-matériau-a-l'histoire-fascinante>>.[Consulté le 04/08/2020]

Le recyclage du plastique. INFORMATION ET ARTICLES. [Site web], disponible sur <<https://www.clikeco.com/P-50-88-F1-le-recyclage-du-plastique.html#>> Consulté le 02/09/2020.

Paprec group. La fabrication des polymères et matière plastique[site web] disponible sur <<https://www.paprec.com/fr/comprendre-recyclage/recyclage-plastique/fabrication-polymeres-matieres-plastiques>>. [Consultée le 05/08/2020].

alloprof.les matières plastiques [site web] disponible sur <<https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/les-matieres-plastiques-s1550>> consulté le 30/08/2020.