



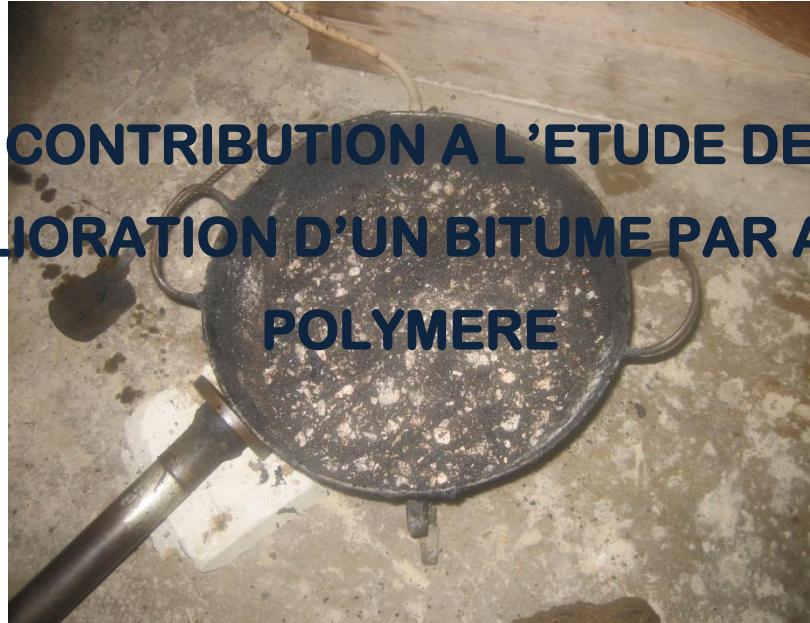
UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



DEPARTEMENT :
INGENIERIE PETROLIERE

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur Pétrolier
N° d'ordre :...../14*

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE
L'AMELIORATION D'UN BITUME PAR ADDITIF
POLYMERIQUE**



Présenté par : Mr Zo Idealy ANDRIANJAFIMANANA

Rapporteur : Dr Michel RANARIVELO

Année Universitaire 2012-2013



**UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO**



**DEPARTEMENT :
INGENIERIE PETROLIERE**

*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur Pétrolier
N° d'ordre :...../14*

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE
L'AMELIORATION D'UN BITUME PAR ADDITIF
POLYMERIQUE**

(Etude réalisée au sein du Laboratoire National des Travaux Publics et
Bâtiments)

Présenté par : Mr Zo Idealy ANDRIANJAFIMANANA

Président : Pr ANDRIANARY Philippe Antoine

Examinateurs : Mr RAJEMIARIMIRAHO Manitra

Mr RAKOTOSON Rija Lalaina

Rapporteur : Dr Michel RANARIVELO, Maître de conférences à l'ESPA

Date de soutenance : 14 Août 2014

Année Universitaire 2012-2013

REMERCIEMENTS

Ce mémoire a été réalisé au sein de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) dans le Département Ingénierie Pétrolière, en collaboration avec le Laboratoire National des Travaux Publics et Bâtiments (LNTPB).

Nous tenons à présenter nos remerciements tout d'abord à l'Eternel Dieu tout puissant, pour les bienfaits, la miséricorde, la bonté, le soutien, la protection et toutes les forces qui m'ont permis de terminer ces années d'études et de mener à terme ce mémoire.

Nous exprimons notre sincère reconnaissance à Monsieur **ANDRIANARY Philippe Antoine**, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui a bien voulu présider la soutenance de ce mémoire, ainsi que tous les enseignants de l'ESPA.

Nous tenons aussi à adresser mes vifs remerciement à Monsieur **RANARIVELO Michel** qui m'a beaucoup encouragé et aidé dans le choix du sujet de ce mémoire, aussi pour son encadrement et son assistance durant l'élaboration de ce travail.

Je suis très reconnaissant aux :

- ✓ Monsieur **RAJEMIARIMIRAHO Manitriniaina**, Chef de département Ingénierie Pétrolière, qui malgré ses diverses obligations. Qu'il soit infiniment remercié.
- ✓ Monsieur **RAKOTOSON Rija Lalaina**, Maître de conférences à l'ESPA, qui ont accepté d'être les examinateurs de ce mémoire.

Que Monsieur **RANDRIANARISATA Louis de Gonzague**, Directeur Général de LNTPB, trouve ici l'expression de toute notre reconnaissance pour l'aide constante que LNTPB nous a fournie durant ces travaux.

Nous adressons nos chaleureux remerciements à Monsieur **RABEMANANJARA Victor**, chef Labo Matériaux de LNTPB, pour nous avoir acceptés dans le laboratoire de LNTPB et pour l'accueil cordial qu'il nous a réservé.

Nous sommes reconnaissants à tous les Techniciens du Laboratoire de nous avoir encadré et dirigé dans les expérimentations et différentes analyses que nous avons effectuées au sein du LNTPB.

Enfin, ma pensée ira à ma Tante **ANDRIANJAFIMANANA Voahangy Hortense**, mes parents, toute ma famille et mes collègues pour leur honorable soutien moral et financier.



SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I: LES BITUMES

CHAPITRE II: LES BITUMES ROUTIERS

CHAPITRE III: LES MATIERES PLASTIQUES

PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES

PARTIE 3 : ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX

CHAPITRE VI : ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTALE

CHAPITRE VII : EVALUATION DES IMPACTS

CHAPITRE VIII : EVALUATION DU DEVELOPPEMENT DURABLE

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

WEBOGRAPHIE

**LISTE DES FIGURES**

FIG 1 : PROCEDE DE FABRICATION DU BITUME.....	5
FIG 2 : DIAGRAMME TERNaire DE REPRESENTATION DES BITUMES	6
FIG 3 : SCHEMAS DE SEPARATION CHIMIQUE DES CONSTITUANTS DES BITUMES	13
FIG 4 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN BITUME	13
FIG 5 : PROPRIETE CHIMIQUE DU BITUME	14
FIG 6 : CLASSIFICATION DES MATIERES PLASTIQUES.....	16
FIG 7 : POINTE DU PENETROMETRE.....	26
FIG 8 : ANNEAU A EPAULEMENT	30
FIG 9 : SUPPORT D'ANNEAU	31
FIG 10 : STRUCTURES DES CHAUSSSEES.....	46
FIGURE 11 : COMPOSANTS D'UN ENROBE BITUMINEUX	50
FIG 12 : SCHEMAS DES VIDES.....	50
FIG 13 : COURBE GRANULOMETRIQUE DU MELANGE GRANULAIRE	56
FIG 14 : STABILITE EN FONCTION DU PEBD	58
FIG 15 : FLUAGE EN FONCTION DU PEBD	58
FIG 16 : COMPACITE EN FONCTION DE PEBD	62
FIG 17 : DIAGRAMME RECAPITULATIF DES ESSAIS EXPERIMENTAUX.....	64
FIG 18 : CYCLE DE VIE DU PETROLE	82
FIG 19 : CYCLE DE VIE DU LIANT HYDROCARBONE	83
FIG 20 : CYCLE DE VIE DU MELANGE LIANT-POLYMER.....	83
FIG 21 : PRINCIPES DU DEVELOPPEMENT DURABLE.....	84
FIG 22 : MOTEURS DE CROISSANCE : LES SECTEURS INTENSIFS DE MAIN D'ŒUVRE	86



LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : TYPE DE BITUME FLUIDIFIE.....	9
TABLEAU 2 : CLASSE DU BITUME	12
TABLEAU 3 : TYPE DE DECHETS	22
TABLEAU 4 : LES RISQUES DES DECHETS	23
TABLEAU 5 : MESURE DE LA DENSITE DU BITUME	25
TABLEAU 6 : EXPRESSION DES RESULTATS DE LA PENETRATION.....	29
TABLEAU 7 : PERTE A LA CHALEUR DU BITUME	34
TABLEAU 8 : GRANULOMETRIE DU SABLE SEC.....	36
TABLEAU 9 : GRANULOMETRIE DU GRAVILLON 6/10.....	36
TABLEAU 10 : GRANULOMETRIE DU GRAVILLON 10/14.....	37
TABLEAU 11 : NOMENCLATURE POUR LA	38
TABLEAU 12 : COEFFICIENT LA.....	38
TABLEAU 13 : COEFFICIENT MDE	39
TABLEAU 14 : COEFFICIENT D'APLATISSEMENT DU GRAVILLON 6/10	39
TABLEAU 15 : COEFFICIENT D'APLATISSEMENT DU GRAVILLON 10/14	40
TABLEAU 16 : DENSITE APPARENTE 0/6	41
TABLEAU 17 : DENSITE APPARENTE 6/10.....	41
TABLEAU 18 : DENSITE APPARENTE 10/14.....	41
TABLEAU 19 : POIDS SPECIFIQUE DU SABLE 0/6	42
TABLEAU 20 : POIDS SPECIFIQUE DU SABLE 6/10	42
TABLEAU 21 : POIDS SPECIFIQUE DU SABLE 10/14	43
TABLEAU 22 : POURCENTAGE DES GRANULATS POUR LA FORMULE A	51
TABLEAU 23 : SEPARATION DES ELEMENTS POUR LA FORMULE A.....	51
TABLEAU 24 : POURCENTAGE DES GRANULATS POUR LA FORMULE B	52
TABLEAU 25 : SEPARATION DES ELEMENTS POUR LA FORMULE B.....	52
TABLEAU 26 : POURCENTAGE DES GRANULATS POUR LA FORMULE C.....	53
TABLEAU 27 : SEPARATION DES ELEMENTS POUR LA FORMULE C	53
TABLEAU 28 : RECAPITULATION DES RESULTATS DES SURFACES SPECIFIQUES	54
TABLEAU 29: TENEUR EN BITUME RETENU.....	55
TABLEAU 30 : POURCENTAGE DU MELANGE	55
TABLEAU 31 : PRISE D'ESSAI DU MELANGE.....	55
TABLEAU 32 : CALCUL DU POIDS SPECIFIQUE	59
TABLEAU 33 : LES CARACTERISTIQUES MARSHALL	59
TABLEAU 34 : CALCUL DE LA DENSITE APPARENTE	61
TABLEAU 35 : CARACTERISTIQUES DURIEZ	62



TABLEAU 36 : COMPRESSION APRES 7 JOURS A SEC.....	63
TABLEAU 37 : COMPRESSION APRES 7 JOURS IMMERGE.....	63
TABLEAU 38 : RAPPORT DE STABILITE DES EB.....	65
TABLEAU 39 : APPLICATIONS SUR LES DIFFERENTS ENROBES	65
TABLEAU 40 : CODE COULEUR	67
TABLEAU 41 : NORMES OMS	76
TABLEAU 42 : CONCENTRATION DES VEHICULES A ANTANANARIVO-VILLE	77
TABLEAU 43 : REPARTITION DE LA POPULATION SELON LE TYPE DE LOGEMENT OCCUPE	78
TABLEAU 44 : SOURCE D'IMPACT SOCIO-ECONOMIQUE.....	81



LISTE DES PHOTOS

PHOTO 1 : MESURE DE LA DENSITE, PERTE A LA CHALEUR ET A LA PENETRATION.....	24
PHOTO 2 : PESAGE DU GODET.....	25
PHOTO 3 : BAIN THERMOSTATIQUE POUVANT TENIR LA TEMPERATURE A 25°C.....	27
PHOTO 4 : PENETROMETRE	27
PHOTO 5 : RECIPIENT A GOBELET	28
PHOTO 6 : EXECUTION DE L'ESSAI DE PENETRABILITE	29
PHOTO 7 : ESSAI TBA.....	31
PHOTO 8 : ETUVE CENCO POUVANT MAINTENIR 163°C.....	33
PHOTO 9 : TAMIS	35
PHOTO 10 : GRANULATS DE POLYETHYLENE A BASSE DENSITE.....	44
PHOTO 11 : MELANGE EB 0/14 AVEC BITUME PUR.....	48
PHOTO 12 : MELANGE EB 0/14 MELANGE AVEC DU PEBD	49
PHOTO 13 : PICNOMETRE POUR LES SURFACES SPECIFIQUES DES GRANULATS.....	54
PHOTO 14 : ESSAI MARSHALL ET MESURE DE FLUAGE.....	57
PHOTO 15 : EPROUVETTE POUR L'ESSAI MARSHALL.....	57
PHOTO 16 : CONFECTON DE L'EPROUVETTE POUR ESSAI DURIEZ	60
PHOTO 17 : ESSAI DURIEZ.....	60
PHOTO 18 : CONSERVATION A L'AIR DE L'EPROUVETTE DANS LA CHAMBRE FROIDE	63
PHOTO 20 : CONSERVATION A L'IMMERSION DE L'EPROUVETTE DANS LA CHAMBRE FROIDE	63



LISTE DES ABRÉVIATIONS

LNTPB : Laboratoire National des Travaux Publiques et Bâtiments

SMATP : Sino – Malagasy des Travaux Publique.

SMTP : Société Malgache de Transformation de Plastique

I_c : Indice d'instabilité

RC : Rapide Curing.

MC : Medium Curing

SC : Slow Curing

PEHD : Polyéthylène à Haute Densité

PEBD : Polyéthylène à Basse Densité

TBA : Température Bille-Anneau en °C

I_p : Indice de pénétrabilité

PC : Perte à la chaleur en %

LA : Los Angeles

MDE : Micro- Deval

d : Densité

Σ : Surface Spécifique m²/kg

L : Teneur en liant

γ_s : Poids spécifiques

γ_d : Densité apparente

M_{mb} : Masse totale du mélange

M_g : Masse des granulats dans le mélange

M_b : Masse totale de bitume dans le mélange

M_{be} : Masse de bitume effectif

M_{ba} : Masse de bitume absorbé

V_{mb} : Volume brute du mélange compacté

V_{gb} : Volume apparent des granulats

VAM : Volume occupé par l'espace entre les granulats dans un enrobé compacté, en incluant les vides interstitiels dans l'enrobé (V_i) et le volume de bitume effectif (V_{be}), exprimé en pourcentage par rapport au volume brut de l'enrobé compacté (V_{mb})



V_{ge} : Volume effectif des granulats (volume solide)

V_{ba} : Volume de bitume absorbé

V_{be} : Volume de bitume effectif

Vi : Volume total occupé par l'air emprisonné entre les granulats enrobés dans un enrobé compacté exprimé en pourcentage du volume brut de l'enrobé compacté (V_{mb})

INTRODUCTION

Le pétrole et ses dérivés sont connus depuis très longtemps et leurs emplois dans divers domaines n'ont pas cessé de s'accroître au fil des décennies, malgré ses enjeux géopolitiques et ses impacts sur l'environnement. Cette étude ne prend pas position relativement à ces enjeux, mais prend naissance à la constatation de la Banque Mondiale sur les sérieux problèmes de dégradation sans précédent des infrastructures des réseaux routiers à Madagascar.

Le but est de trouver des solutions à ces détériorations continues tout en favorisant l'amélioration de l'Ingénierie et les technologies propre aux liants bitumineux. Dans certains cas, des techniques modifiées doivent être employés afin d'améliorer les propriétés de ces derniers : recours accru à l'air soufflé et au dosage granulométrique, modification des propriétés chimiques et incorporation d'adjuvant, essentiellement des polymères.

Et si l'utilisation des polymères traditionnels compatibles avec le bitume se pratique depuis plusieurs années, il est intéressant de souligner que les polymères jugés incompatibles peuvent aussi aujourd'hui être liés aux bitumes pour produire de nouveaux liants moins volatiles et offrant une plus grande stabilité.

Les polymères tels que les élastomères caoutchoucs et les plastomères, l'acétate éthylène de vinyle, le polyéthylène et le polypropylène sont les plus employés. Dans ce travail, nous avons utilisé comme « additif » des granulats de déchets plastiques d'une granulométrie de 2 à 3mm en provenance de la société SMPT d'Antananarivo et dénommées PR PLAST qui est classé comme Polyéthylène à Basse Densité, et qui seront mélangés aux enrobés 0/14 en provenance de la société SMATP, Entreprises chinoise de construction de route, destinés à enrober le boulevard d'Ankorondrano Antananarivo.

Notre étude est construite autour de trois parties qui sont en elles même subdivisées en chapitres.

La première partie est consacrée sur la généralité des matières plastiques et le bitume en tant que liants hydrocarbonés et présentant l'état de connaissances concernant : les liants hydrocarbonés, le bitume routier et les matières plastiques.

La deuxième partie décrit en détail les étapes liés au choix des matériaux, l'approche et les techniques expérimentales, l'analyse des résultats, l'interprétation de ces résultats

tant au point de vue caractéristique de ces granulats, caractéristiques des additifs, caractéristiques des bitumes qu'au point de vue interface mélange bitume – additif.

La troisième partie concerne l'aspect environnemental et comprend trois chapitres : étude d'impact environnemental, évaluation des impacts et méthode de développement durable.

Puis sous forme de conclusion générale, nous essayerons de poser quelques réflexions pour l'avenir.

PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES



CHAPITRE I: LES BITUMES

I-1 Définition

Le bitume est une substance composée d'un mélange d'hydrocarbures, très visqueuse à la température ambiante et de couleur noire. Connu depuis la plus haute Antiquité sous forme naturelle, il provient, de nos jours, presque exclusivement de la distillation des pétroles bruts.

Dans le langage courant, on le confond souvent avec le goudron d'origine houillère, ou avec l'asphalte dont il n'est qu'un composant.

Plus généralement, le bitume désigne tout mélange d'hydrocarbures extraits du pétrole par fractionnement qui, sous forme pâteuse ou solide, est liquéfiable à chaud et adhère sur les supports sur lesquels on l'applique.

I-2 Historique

De l'Antiquité à la révolution industrielle, il a été utilisé pour usage d'étanchéité. Connu sous le nom de « bitume de Judée » par les Égyptiens, les Hébreux et les Sumériens, le bitume existait déjà à l'état naturel sur les bords de la mer Morte et de la mer Caspienne. A cette époque, il avait déjà eu de multiples emplois :

- liant ;
- produits pharmaceutiques - servant notamment à la cosmétologie et à la conservation des momies égyptiennes ;
- dans tout le bassin méditerranéen, il servait au calfatage des navires ;
- et, grâce au bitume de Judée, Nicéphore Niépce inventera la photographie à Saint-Loup-de-Varennes en 1824.

En 1627, une lettre patente autorisa son exploitation commerciale à Pechelbronn, en Alsace, à partir d'une source qui produisait une « huile de pierre » réputée pour ses propriétés thérapeutiques. En 1741, la première société pétrolière de l'histoire vue le jour, pour exploiter à côté de la source une veine de sable bitumineux, dont on tirait une graisse apte à remplacer le « vieux oing » et le suif. Le roi Louis XV, conscient de l'intérêt de cette



exploitation, la confia, le 5 août 1772 à un certain Le Bel, et, c'est à partir de son idée que le Géant ANTAR fût, plus tard, créer en 1927.

I-3 Gisements de bitumes

Ils se trouvent à l'état naturel, résultats d'un gisement pétrolier qui s'est échappé et piégé, ou dans des minerais (grès, sable, schiste)

D'énormes gisements se trouvent un peu partout dans le monde :

- au VENEZUELA
- aux USA (Schistes d'Utah)
- au Canada (sable d'Athabasca)
- à Madagascar (Bemolanga et Tsimiroro)

Le bitume est un produit thermoplastique de couleur noire, dont, la viscosité varie avec la température, et se solidifie à température ambiante. Porté à une température supérieure à 120°C, il peut être pompé et utilisé.

Les bitumes sont des produits solides ou semi-solides

Ils peuvent également être obtenus à partir des résidus du raffinage de pétrole brut.

I-4 Procédée de fabrication

Issus du traitement en raffinerie de pétroles bruts sélectionnés, les bitumes sont obtenus par mélange des fractions les plus lourdes (bases bitumes) résultant de l'opération de distillation.

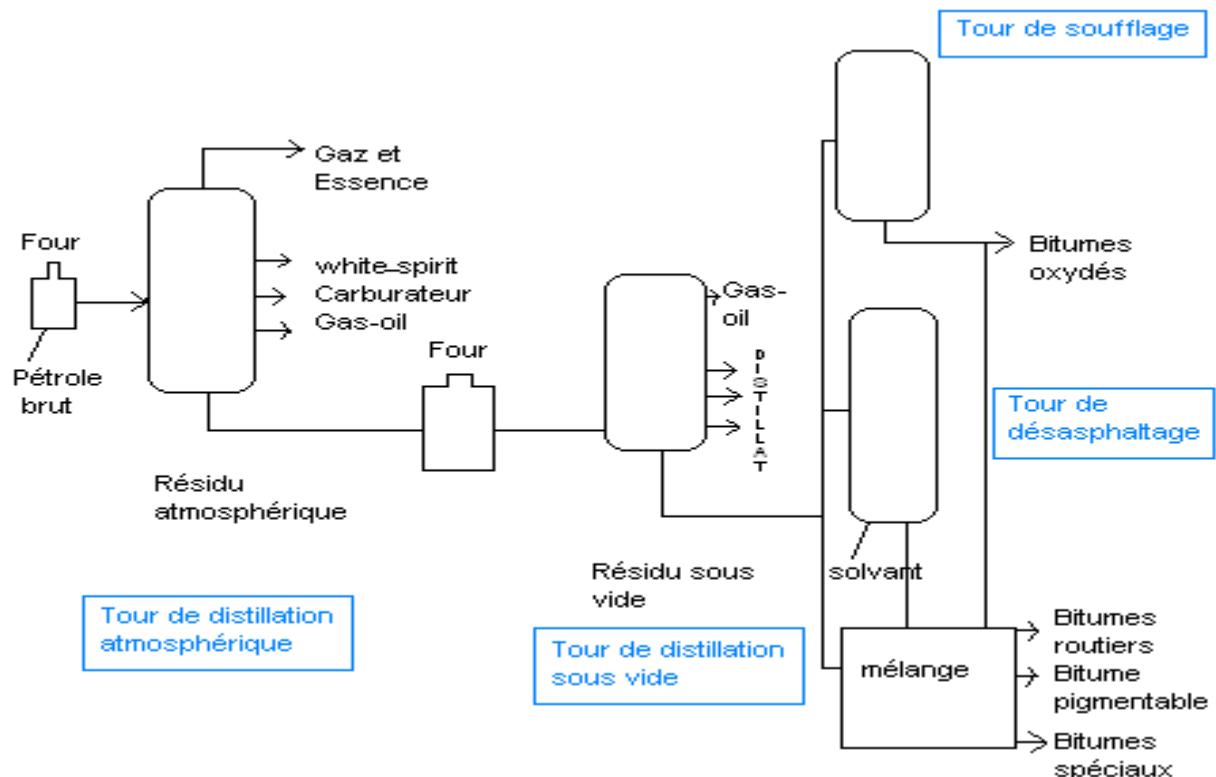


Fig 1 : Procédé de fabrication du bitume

I-5 Structure colloïdale des bitumes

Selon NELLENSTEIN, le bitume est un système colloïdal dans lequel les micelles sont des particules de carbone entourées d'une couche d'asphaltènes adsorbés. La dispersion est assurée par les résines qui joueraient le rôle de péptisant.

Depuis que cette conception a évolué, de nouvelles études ont cherché à préciser la nature de la phase solide dispersée (Etudes rhéologiques associées à des études par microscopie électronique).

- Colloïdale : C'est la dispersion d'une matière au sein d'un liquide, caractérisée par des granules de dimensions moyennes comprise entre 0.2 et 0.002 microns.
 - Péptisant : C'est de la matière résineuse

I-6 Diagramme ternaire de représentation des Bitumes

Avec ses trois composants : constituants huileux, asphaltènes et résines, on peut représenter les bitumes dans un diagramme.

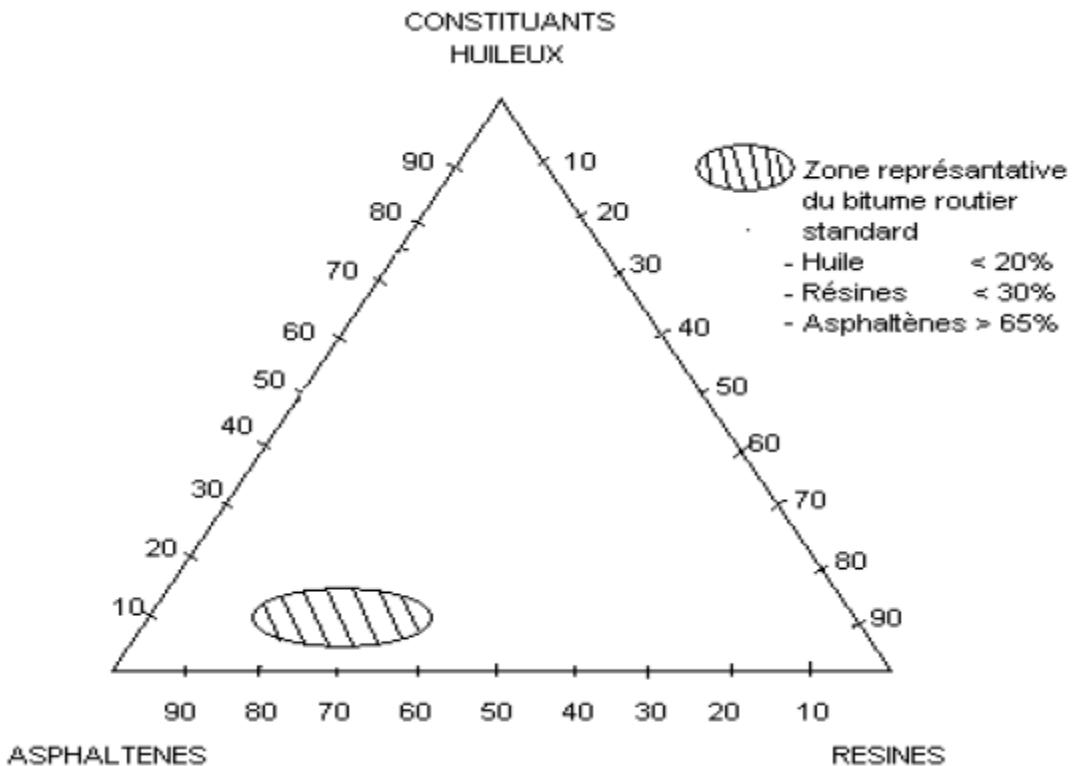


Fig 2 : Diagramme ternaire de représentation des bitumes

L'indice d'instabilité colloïdale est obtenu par la formule :

$$I_c = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{Floculant}}{\text{Péptisant}}$$

I-7 Propriétés mécaniques du bitume

GAESTEL a étudié comment variaient les propriétés mécaniques importantes des bitumes en fonction de ce rapport I_c . Il montre que pour un bitume inconnu, la détermination de I_c , donnera un ordre de grandeur de ses propriétés principales.

KOLBANOVSKAIA utilise la structure colloïdale des bitumes pour établir une classification :

Bitume de Type I : Les asphaltènes forment un réseau coagulé, ce sont en général des bitumes de soufflage avec 15% à 20% d'asphaltènes et 42% à 55% d'huiles.



Bitume de Type II : Systèmes « liquides » avec environ 11% d'asphaltènes et une grande proportion de résines (bitumes peu soufflés, de distillation ou de désasphaltage).

Bitume de Type III : La plupart des bitumes routiers sont intermédiaires aux deux types I et II précédemment définis.



CHAPITRE II: LES BITUMES ROUTIERS

II-1 Utilisation

De nos jours en construction routière, le bitume sert de liant pour la réalisation de matériaux enrobés à chaud, tels que les bétons bitumineux ou les graves bitumes. Il entre également dans la fabrication d'enduits superficiels sous forme d'émulsion, et/ou, bitume fluidifié par un solvant.

II-2 Typologie

II-2-1 Bitume naturel

II-2-1-a Bitume naturel d'extraction de carrière

Extraits à ciel ouvert, les gisements se présentent comme de véritables lacs. Il peut aussi se présenter sous forme de filons en sous-sol, le plus connu est le bitume de Trinidad qui relève du premier type de gisement.

La production mondiale de ce type, est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 000 tonnes.

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

- Le Bitume de Trinidad Epuré est extrait par raffinage, il contient une partie minérale, sa masse volumique est voisine de 1,40 g/cm³, la pénétration à 25 °C est comprise entre 1 et 4 dixièmes de millimètre, et la température bille-anneau est supérieure à 90 °C, contrairement au bitume « soluble » qui a une pénétration standard de 3 à 12 dixièmes de millimètres et une température bille-anneau comprise entre 68 et 78 °C).
- La Poudre de Trinidad 50/50, s'agit d'un mélange composé de 50 % de Bitume de Trinidad Epuré et de 50 % de charge calcaire.
- La Gilsonite est un hydrocarbure naturel, qui se présente sous forme de 0/2, dont la masse volumique est de 1,05 g/cm³, de pénétration standard voisine de 0 dixième de millimètre et de température bille-anneau supérieure à 150 °C. Le dosage varie de quelques pour cent à 10 % des granulats secs.



II-2-1-b Bitume brut dérivé du pétrole

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

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

II-2-2 Bitume fluidifié Selon la Norme 4104

Un bitume fluidifié, ou cut back, est un bitume dont on a réduit la viscosité en lui ajoutant un diluant assez volatil.

Ce sont des produits constitués de bitume et de solvant hydrocarboné d'origine pétrolière, Ils gardent son état liquide à température ambiante. Lorsqu'ils sont exposés à l'air, le solvant s'évapore et laisse le bitume comme résidu.

Ils se divisent en quatre (4) grandes catégories selon leur vitesse de séchage qui dépend du type de solvant employé.

Tableau 1 : Type de bitume fluidifié

TYPES	VITESSE DE SECHEAGE	TYPE DE SOLVANT
RC	Rapide	Naphte
MC	Moyenne	Kérosène
SC	Lente	Huile légère
RM	Mi- rapide	

Source : Cours enrobés - ETS

II-2-3 Bitume fluxé

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

- ⊕ Ces bitumes fluxés et fluidifiés sont caractérisés par leur distillation fractionnée (Norme AFNOR NFT 66-003) et leur pseudo-viscosité (norme AFNOR NFT 66-005).
- ⊕ Ils sont utilisés pour la réalisation des enduits superficiels, (Directive pour la réalisation des enduits superficiels, Ministère de l'Equipment, Février 1972) et aussi pour la fabrication d'émulsions.



II-3 Structure physico-chimique

Les bitumes sont des mélanges d'hydrocarbures à poids moléculaire élevé pouvant appartenir aux trois groupes suivants :

- aliphatique ;
- naphténique ;
- aromatique.

Le groupe oléfinique est rencontré dans certains bitumes craqués.

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

- la partie dissoute, les maltènes, a l'aspect d'une huile visqueuse de couleur foncée ;
- la fraction précipitée, les asphaltènes, est constituée par des corps de poids moléculaire très élevé se présentant sous la forme d'une substance solide et noirâtre.

Il n'y a pas de discontinuité entre maltènes et asphaltènes, le fractionnement obtenu dépend du solvant employé. On a longtemps utilisé l'éther de pétrole, maintenant remplacé par l'heptane normal.

On constate que les maltènes se comportent comme un fluide parfaitement visqueux (fluide newtonien), la présence des asphaltènes confère aux bitumes des propriétés caractéristiques de l'état colloïdal.

Les asphaltènes ont tendance à absorber la fraction aromatique la plus lourde des maltènes et forment ainsi des corpuscules complexes — les micelles — qui sont en suspension dans une phase continue formée par les maltènes de bas poids moléculaire.

Si les maltènes contiennent suffisamment d'aromatiques pour que les forces d'absorption des asphaltènes soient saturées, les micelles sont complètement mobiles au milieu de la phase dispersante : elles sont peptisées. La solution colloïdale est alors à l'état de sol.

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. Cette structure, qui confère au bitume des propriétés élastiques, est désignée sous le nom de gel.

SOUFFLAGE

Le bitume se présente comme un système colloïdal. Mais s'il y a suffisamment de molécules aromatiques dans la partie maltènes, les asphaltènes peuvent alors être floculés.



Ce système peut être considéré comme un gel qui confère au bitume ses propriétés élastiques. C'est en particulier le cas des bitumes dits soufflés ou oxydés.

Mais aussi, si on le garde tel quel lors de sa sortie des unités de raffinage, il est trop mou pour être utilisé pour les revêtements de toiture. Et pour le rendre plus dur, on procède à son soufflage. Le procédé est ni plus ni moins une déshydrogénération partielle et une polymérisation du bitume avec l'oxygène de l'air. L'alternative est de les additionner avec un polymère spécifique (Bitume modifié).

Ainsi, en faisant passer l'air à travers le bitume à haute température (240 à 260 °C), il y a déshydrogénération partielle et le dioxygène contenu dans l'air soufflé forme des ponts oxygène avec les chaînes hydrocarbonées, et il se forme des réseaux tridimensionnels par polymérisation. La réaction est plus ou moins exothermique et la température dans la tour de soufflage ne dépasse jamais 300 °C sous peine d'apparition du phénomène de craquage. La dureté du bitume obtenue peut être contrôlée par le temps de passage de l'air, car plus il y a de ponts oxygène, plus dur est le bitume.

II-4 Classification

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

Les domaines d'utilisation sont variables selon les pays. Les différentes classifications sont les suivantes :



Tableau 2 : Classe du bitume

Type de bitume	Norme	Nature de l'essai de qualification	nb	Classes
Bitumes purs	NF EN 12591[10]	Pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C	9	20-30 ; 30-45 ; 35-50 ; 40-60 ; 50-70 ; 60-70 ; 70-100 ; 100-150 ; 160-220 ; 250-330
		Pénétrabilité à l'aiguille à 15 °C	4	250/330 ; 330/430 ; 500/650 ; 650/900
		Viscosité cinématique à 60 °C	4	V1500 ; V3000 ; V6000 ; V12000
Bitumes routiers durs	NF EN 13924[13]	Pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C	2	10/20 ; 15/25.
Bitumes industriels durs	NF EN 13305[13]	Point de ramollissement bille et anneau	5	H80/90 ; H85/95 ; H90/100 ; H100/110 ; H155/165.
Bitumes oxydés	NF EN 13304[13]	Point de ramollissement bille et anneau	8	85/25 ; 85/40 ; 95/25 ; 95/35 ; 100/40 ; 105/35 ; 110/30 ; 115/15.
Bitumes fluidifiés	XP T 65-002[13]	Pseudo-viscosité à 25 °C	5	0-1 ; 10-15 ; 150-250 ; 400-600 ; 800-1 400.
Bitumes fluxés	XP T 65-003[13]	Pseudo-viscosité à 25 °C	6	0-1 ; 10-15 ; 150-250 ; 400-800 ; 800-1 600 ; 1 600-3 200.
Bitumes modifiés	NF EN 14023[14]	Pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C	10	10-40 ; 25-55 ; 45-80 ; 40-100 ; 65-105 ; 75-130 ; 90-150 ; 120-200 ; 200-300.

Source : LNTPB

✿ **Schéma de séparation chimique des constituants du bitume**

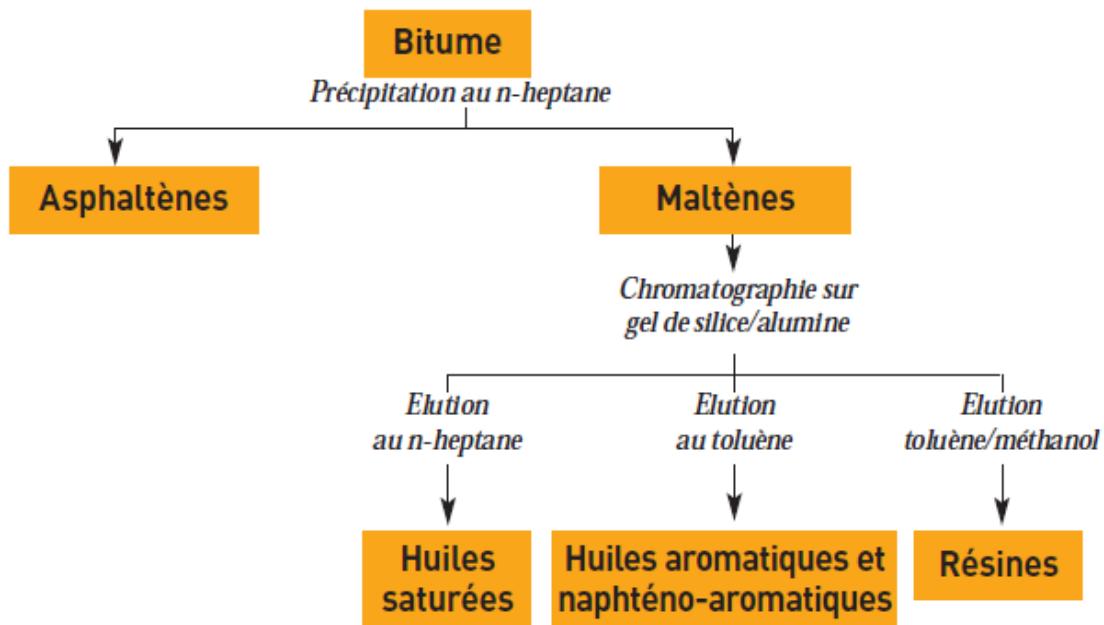
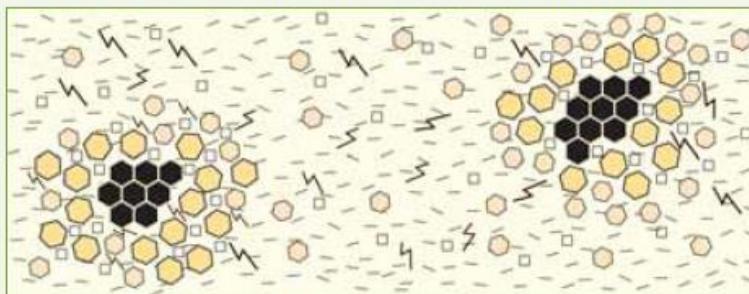


Fig 3 : Schémas de séparation chimique des constituants des bitumes

✿ **Représentation schématique d'un bitume**

Représentation schématique d'un bitume type "SOL"



◆ Asphaltènes

○ Hydrocarbures aromatiques à haut poids moléculaire

○ Hydrocarbures aromatiques à bas poids moléculaire

□ Hydrocarbures naphténo-aromatiques

↗ Hydrocarbures naphténiques et aliphatiques

— Hydrocarbures saturés

Représentation schématique d'un bitume type "GEL"

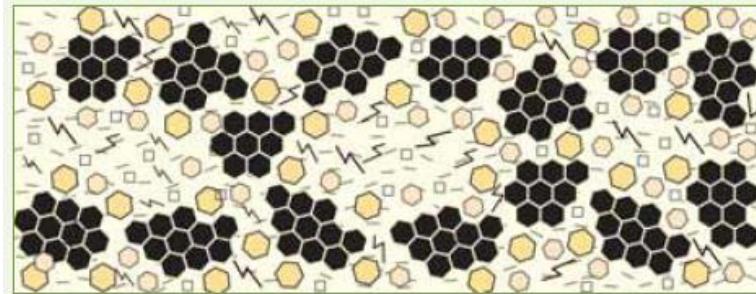


Fig 4 : Représentation schématique d'un bitume

II-5 Propriétés intéressantes des bitumes

Les qualités physiques et chimiques du bitume en ont fait un matériau de toute première importance.

Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre. C'est un excellent isolant thermique et électrique. Il est léger, ductile et souple. Du point de vue mécanique, il se comporte comme un matériau plastique ou élastique.

Il est insoluble dans l'eau, mais l'on peut en obtenir des solutions dans de nombreux solvants organiques. Il est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques usuels.

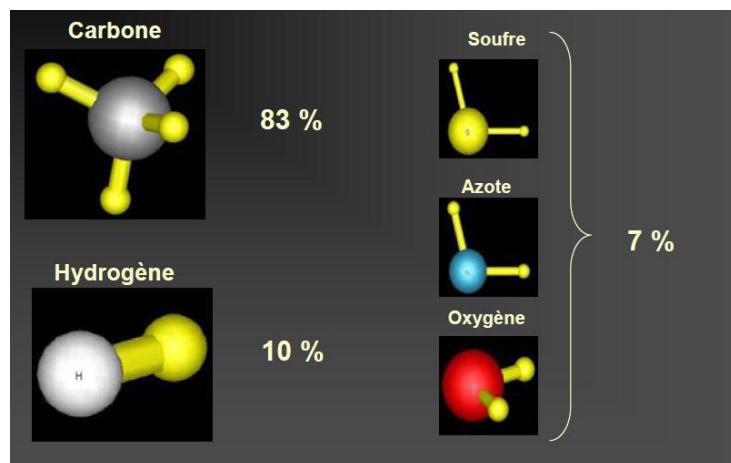


Fig 5 : Propriété chimique du bitume

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

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



CHAPITRE III: LES MATIÈRES PLASTIQUES

III-1 Historique

Les matières plastiques sont quasiment nées avec le XXe siècle. Des centaines de chercheurs et de bricoleurs de génie sont à l'origine de leur essor. Les premiers plastiques, artificiels, résultent de la transformation chimique de polymères naturels tels le caoutchouc, la cellulose et la caséine. La première matière plastique industrielle basée sur un polymère synthétique est la Bakélite.

III-2 La nature des monomères

chez la production des matières plastiques, on emploie des matériaux naturels comme la cellulose, le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Les monomères doivent être des matières avec une structure simple mais doivent être très réactives. Puisqu'elles doivent être enchaînées en molécules macro. Les combinaisons organiques légères (2 à 4 atomes de carbone) et non saturées comme des alcènes et des alcadiènes remplissent les conditions.

Quelques exemples :

Ethène : $\text{CH}_2=\text{CH}_2$

Propène: $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$

1,3-butadiène: $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$

Ces composants sont retirés des fractions naphta léger. Ces fractions contiennent encore des molécules avec 5 jusqu'à 7 atomes de carbone. Ces molécules sont maintenant transformées par cracking pour augmenter le pourcentage des monomères utiles.

III-3 Polymères Thermoplastiques et Thémodurcissables

Dans le cadre des résines constituées de macromolécules pour réaliser des matières plastiques, deux types de comportement très différents sont décrits en fonction de la nature et de la structure des polymères :

- ❖ Une résine thermoplastique est constituée de chaînes linéaires ou ramifiées à liaisons covalentes. Ces chaînes sont liées entre elles par des liaisons faibles de type

Van der Waals et hydrogène par exemple. Les thermoplastiques peuvent être dissous dans certains solvants et se ramollissent à la chaleur d'où le terme «thermoplastique ».

- ❖ Une résine thermodurcissable est constituée de chaînes linéaires réticulées entre elles.

Les chaînes sont liées dans l'espace par des liaisons fortes de type covalent.

Nous sommes donc en présence d'un réseau tridimensionnel insoluble et infusible.

III-4 Classification

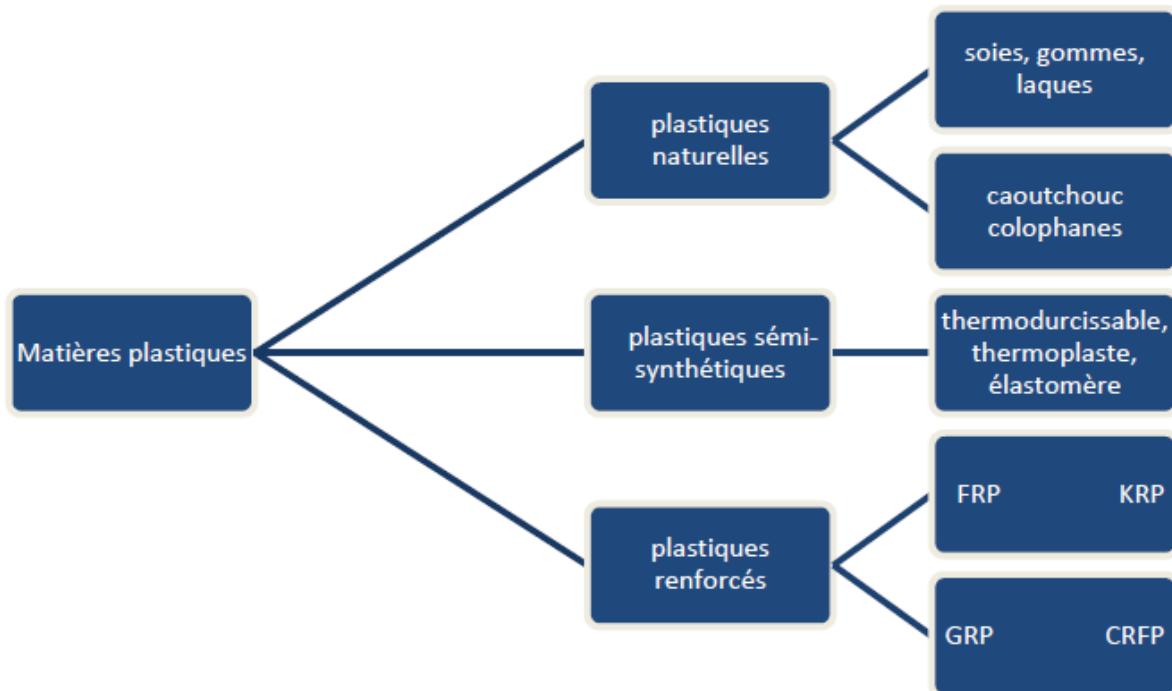


Fig 6 : Classification des matières plastiques

III-5 Les propriétés des matières plastiques

Les propriétés des matières plastiques dépendent de la nature chimique du motif, du degré de polymérisation ou de polycondensation et aussi de l'adjuvant.

III-5-1 Propriétés physiques

- Masse volumique : elle varie, en générale, de 1 à 1.7 kg/cm³ mais augmente progressivement suivant le degré de polymérisation ou de condensation ;
- Couleur : suivant la quantité de l'adjuvant ajoutée à la matière ;



- Propriétés électriques : bons isolants électriques avec des propriétés statiques dépendant des solutions antistatiques éventuelles ;
- Propriétés thermiques : bons isolants thermiques en général ;
- Solubilité : selon leur nature, la matière plastique peut être soluble dans certains solvants. Cette solubilité décroît quand le degré de polymérisation ou de polycondensation augmente ;
- Propriétés mécaniques : principalement la résistance à la traction, à la compression, et à la flexion, l'allongement à la rupture. On peut ajouter à la liste la plasticité et l'élasticité.

III-5-2 Propriétés chimiques

Ces propriétés chimiques sont très variables par rapport aux différents produits chimiques.

III-6 Différents types de plastique

Le plastique doit être trié par type pour le recyclage car chaque type de plastique a des propriétés différentes. L'industrie du plastique a créé un système de sept codes. Vous pourrez les trouver en regardant en dessous du produit (ex: en dessous des bouteilles).

La polymérisation des monomères peut être effectuée en deux manières : la polyaddition et la polycondensation.

III-6-1 Les principaux polymères issus de la polyaddition

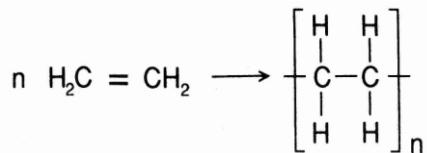
Pendant la polyaddition, beaucoup des mêmes molécules (les monomères) se combinent. Le monomère est une petite molécule non saturée. La double liaison est cassée et deux radicaux se forment, qui à leurs tours produisent deux nouvelles liaisons. D'une telle façon le polymère prend naissance.



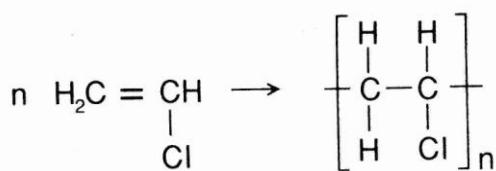
- **HDPE** : Polyéthylène haute densité ou High Density Polyethylene (HDPE). Souvent utilisé pour les bouteilles de détergents, jus de fruits... Il représente 50% du marché des bouteilles en plastique.



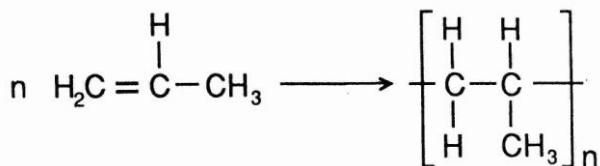
- **LDPE** : Polyéthylène basse densité ou Low Density Polyethylene (LDPE). Utilisé pour certains sacs ou emballages plastiques.



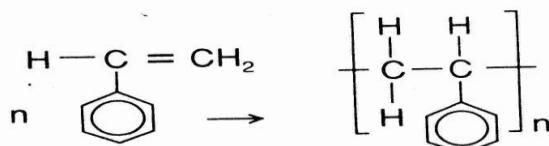
- **V** : Le polychlorure de vinyle (PVC). C'est le 3ème plastique utilisé dans le monde (16,5% de l'ensemble des plastiques) après les polyéthylènes (32 %) et les polypropylènes (20 %). La fabrication et l'incinération de ce plastique non recyclable rejettent des dioxines, des substances cancérogènes et des disruptifs hormonaux. En contact avec de la nourriture chaude et/ou grasse, le PVC peut aussi laisser filtrer des produits chimiques comme les adipates ou les phthalates, dont on a vu qu'ils provoquaient sur les souris de laboratoire des malformations de naissance, et des dégâts sur le foie, les reins, les poumons et le système reproductif. Malheureusement, les emballages en PVC sont utilisés dans la plupart des supermarchés et des épiceries pour emballer le fromage et la viande.



- **PP** : Polypropylène (PP). Un des plastiques les plus utilisés à travers le monde. Il est utilisé pour certaines tasses pour enfant, certaines gourdes souples réutilisables pour sportifs, des récipients alimentaires réutilisables, les pots de yogourt, de margarine... Attention: des chercheurs canadiens ont démontré que le PP contient quelques fois des additifs qui relarguent naturellement (sans nécessairement être chauffé) des Quaternary ammonium biocides et de l'oléamide.



- **PS** : Polystyrène (PS). Le polystyrène peut laisser filtrer du styrène, un cancérogène potentiel qui peut être également un disruptif hormonal. Il est facile de l'éviter en utilisant des tasses en verre ou en porcelaine au lieu des tasses en plastique, en évitant les couverts en plastique, et en ne chauffant jamais les aliments dans des récipients en polystyrène (ils fondraient dans votre nourriture et rejettentraient des gaz toxiques).



III-6-2 Les principaux polymères issus de la polycondensation

La polycondensation se passe toujours entre deux monomères différents, qui possèdent chacune au moins un groupe réactif. Chaque fois une petite molécule est séparée (par exemple H_2O), d'une telle manière les différentes parties de molécules sont accrochées.

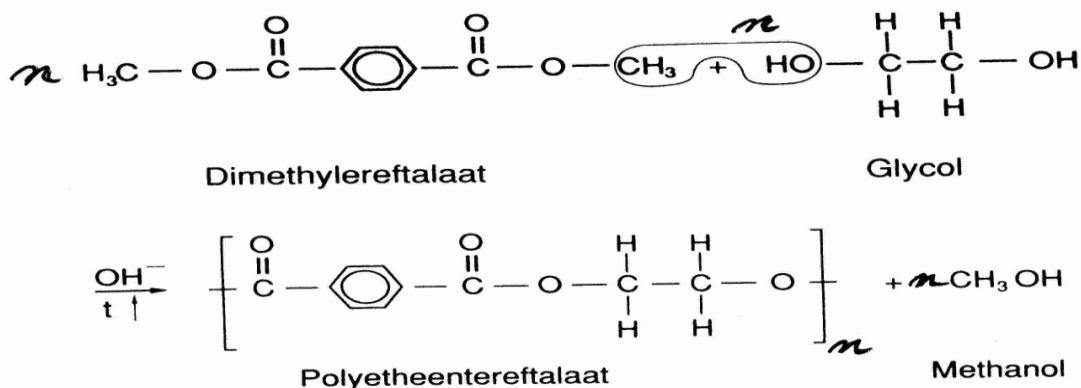


- **PETE** : Polyéthylène Terephthalate (PET). Souvent utilisé pour les bouteilles de boissons gazeuses, d'huile de cuisine... C'est actuellement le plastique le plus recyclable. Bien que le PET ait été considéré comme le choix le plus sûr pour les bouteilles en plastique, une étude italienne récente a conclu que le taux de DEHP (un phthalate, disruptif endocrinien probablement cancérogène pour l'homme dans l'eau) augmentait après 9 mois de stockage dans une bouteille en PET.

Présence d'antimoine : "Une étude réalisée par l'Institut de géochimie environnementale à l'Université Heidelberg d'Allemagne et publiée dans le Journal of Environmental Monitoring en janvier dernier s'alarme de la présence d'antimoine dans l'eau embouteillée". Cette substance a une toxicité comparable à celle de l'arsenic. La dose

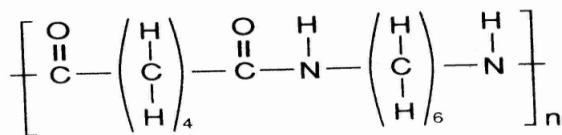
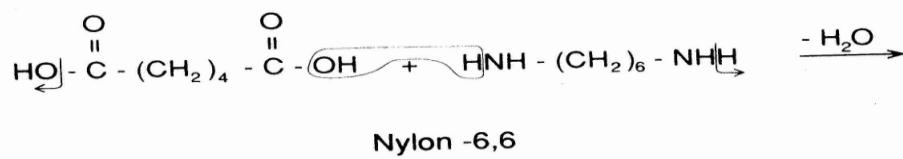


augmente avec le temps de séjour de l'eau dans la bouteille. Des associations demandent des expertises notamment au ministère de la santé en France.



■ Polyamides PA

Les polyamides sont tenaces, solides et ils ont une grande résistance mécaniques et ils ont une faible friction. C'est pour cela qu'ils sont utilisés pour des roues dentées, des vis, des boulons, des bouchons et des bas.



- **Other** : Tout plastique autre que ceux nommés de 1 à 6, par exemple les plastiques à base de polycarbonate ou contenant plusieurs type de plastiques. Ce signe est une



indication pour le consommateur final qui souhaite recycler mais ne donne pas d'indication sur le matériau utilisé pour fabriquer le contenant.

Pour information, si le polycarbonate contient du bisphénol-A, un produit chimique œstrogénique et un disruptif hormonal chez les animaux de laboratoire, ce qui veut dire qu'il peut interférer avec la manière dont les hormones guident le développement fœtal. Comme il en a été fait état dans Current biology le premier avril 2003, l'exposition de souris enceintes au bisphénol-A a entraîné des erreurs de divisions cellulaires du fœtus. Une autre étude a permis de constater des anomalies reproductives chez des rats mâles exposés dans l'utérus à de faibles niveaux de bisphénol-A. Plusieurs études ont démontré que le bisphénol-A présent dans le plastique pouvait s'exfiltrer s'il était chauffé ou exposé à des solutions acides ou après une utilisation prolongée. Cette possibilité d'infiltration est une raison supplémentaire de choisir l'allaitement, qui donne au nourrisson un lait à la bonne température et provenant d'un récipient naturel et sûr. Quand vous êtes obligé d'utiliser un biberon, choisissez-en plutôt un en verre de sécurité ou en plastique opaque comme le polypropylène (#5) ou le polyéthylène (#1), qui ne contiennent pas de bisphénol-A.

III-7 Différents types de déchets plastiques

III-7-1 Définition

Un déchet (détritus, résidu..) est un objet en fin de vie ou une substance issue d'un processus, jugés devenus inutiles, dangereux ou encombrants, et dont on veut se débarrasser.

Les matières plastiques sont des matériaux organiques de synthèse fondés sur l'emploi des macromolécules (polymères). Les caoutchoucs sont aussi regroupés sous cette appellation.

Matière plastique = résine de base + adjuvants + additifs

La matière première généralement utilisée est le pétrole, duquel sont extraites des molécules d'hydrocarbure. Elles sont ensuite unies entre elles pour former des molécules de masse plus importante: les polymères. 4% du pétrole est utilisé pour fabriquer des matières plastiques. On peut aussi trouver du pétrole dans le dentifrice.



En sus de la résine, les additifs et adjuvants sont là pour améliorer les propriétés chimiques et physiques du matériau, notamment la résistance aux chocs, la couleur, la plasticité, la résistance au vieillissement, etc.

III-7-2 Types de déchets

Un déchet est un résidu issu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation ou un objet que son propriétaire destine à l'abandon (loi du 15 juillet 1975). Tout ce que tu jettes dans ta poubelle est un déchet : papier, nourriture, vieux vêtement, matériaux, etc...

- Des résidus d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus.
- Tout produit, substance ou organisme qui n'est plus utile pour son propriétaire ou producteur et qui est par conséquent jeté.

Tableau 3 : Type de déchets

Type de déchets	
OM	Ordures Ménagères
DIB	Déchets Industriels Banaux
DV	Déchets verts
DIS	Déchets Industriels Spéciaux
DMA	Déchets Ménagers et Assimilés
DTQD	Déchets Toxiques en Quantités Dispersées
FFOM	Fraction Fermentescible des Ordures Ménagers
VHU	Véhicules Hors d'Usage
PEEFV	Produits Electriques et Electroniques en Fin de vie
PUR	Pneumatique Usagé Réutilisable
PURN	Pneumatique Usagé Non Réutilisable

Source : <http://ddaf.oise.agriculture.gouv.fr>



- Les risques possibles selon les types de déchets

Tableau 4 : *Les risques des déchets*

Classification des déchets	Risques
Explosibles	Explosions
Comburantes	Incendies
Facilement inflammables	Incendies
Inflammables	Incendies
Irritantes	Attaques aux organes vitaux
Novices	Empoisonnement
Toxiques	Empoisonnement mortel
Cancérogènes	Source directe ou indirecte de cancer
Corrosive	Attaques aux matériaux
Infectieuses	Maladies
Toxiques vis-à-vis de la production	Attaque à l'organisme humain
Mutagènes	Affecte la génétique
Ecotoxiques	Empoisonne l'environnement, polluants

Source : <http://ddaf.oise.agriculture.gouv.fr>

PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV: APPROCHE POUR LE CHOIX DES CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX

IV-1 Caractérisation du bitume

IV-1-1 Mesure de la densité du bitume

Cette mesure a pour but de déterminer la masse du bitume en kilogramme par son volume en décimètre cube à 25°C, généralement exprimée en densité relative. La densité relative est le rapport de la densité d'un corps à la densité de l'eau. Celle-ci étant comme unité de référence.

IV-1-1-a Appareillage

- ❖ Godet de dimensions :

Diamètre : 55 mm

Profondeur : 35 mm

Poids : 53.92 mm



Photo 1 : Mesure de la densité, perte à la chaleur et à la pénétration

- ❖ Plaque de verre dont les dimensions sont :

Côté : 65 mm

Poids : 49.66 mm

IV-1-1-b Principe

On pèse l'ensemble godet-plaque de verre simultanément, puis on verse de l'eau dans le godet pour obtenir son volume exact.



Photo 2 : Pesage du godet

On élimine l'eau dans le godet en le remplaçant du bitume de 10 à 15 mm de hauteur pour avoir son poids. Puis on doit remplir l'espace restant par un certain volume d'eau. Enfin, nous possédons le volume du liant et sa densité.

Tableau 5 : Mesure de la densité du bitume

MESURE DE LA DENSITE A 25°C (gramme)	1er essai	2ème essai
GODET I-II	I	II
Poids Godet + verre (P1)	103,58	92,83
Poids Godet + verre + eau (P2)	189,7	176,81
Volume Godet: $V1 = P2 - P1$	86,12	83,98
Poids Godet + verre + bitume = P3	130	118,27
Poids bitume = P4 = P3 - P1	26,42	25,44
Poids Godet + verre + bitume + eau : P5	190,29	177,42
Poids d'eau restant : P6 = P5 - P3 =	60,29	59,15
Volume liant : $V2 = V1 - P6 =$	25,83	24,83
Densité liant : $P4/V2 =$	1,022	1,024

Source : Auteur

Enfin on a la densité du bitume pur : $(1,022 + 1,024)/2$

$$\rho_b = 1,023$$

IV-1-2 Pénétrabilité à l'aiguille

IV-1-2-a Définition

La pénétrabilité à l'aiguille du bitume pur est donnée par la mesure de l'enfoncement exprimée en dixième de millimètre d'une aiguille type soumise à une charge donnée dans la prise d'essai, dans des conditions normalisées.

IV-1-2-b Principe de la méthode

Faire fondre la prise d'essai, la refroidir à une température déterminée et mesurer dans des conditions normalisées au moyen d'un pénétromètre muni d'une aiguille type, la profondeur à laquelle pénètre cette aiguille dans le liant à examiner.

IV-1-2-c Appareillage

- ❖ Godets : c'est un cylindre à fond plat en métal

Pour les pénétrabilités inférieures ou égales à 200, on utilise un gobelet A dont les dimensions intérieures sont :

Diamètre : 55mm

Profondeur : 35mm

Et pour des pénétrabilités supérieures à 200, on utilise un gobelet B de dimensions :

Diamètre : 55mm

Profondeur : 57mm

- ❖ Aiguille type : c'est une aiguille en acier conforme aux dimensions indiquées sur la figure ci-après :

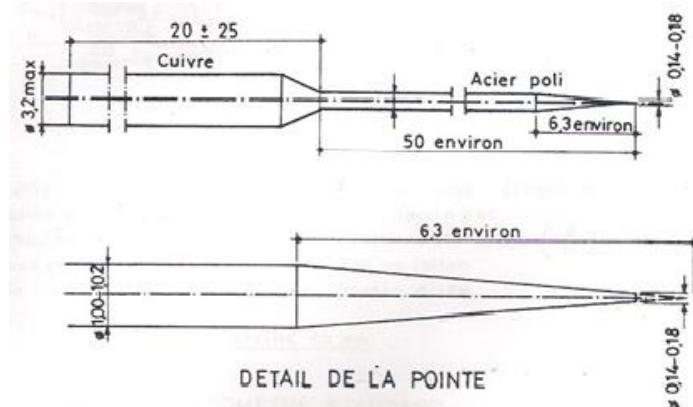


Fig 7 : Pointe du pénétromètre

-bain thermostatique : capacité supérieure à 10 litres, la température doit pouvoir être réglée à 0,10°C



Photo 3 : Bain thermostatique pouvant tenir la température à 25°C

-pénétromètre :

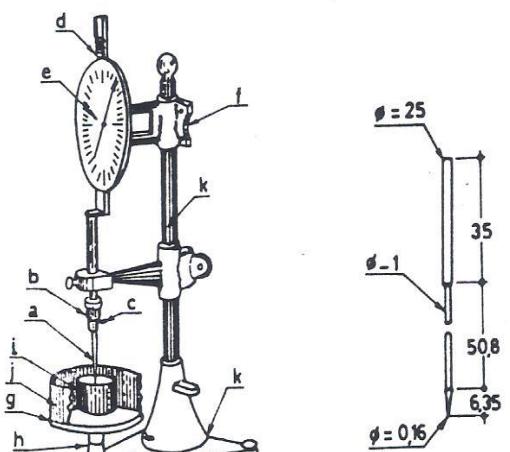


Photo 4 : Pénétromètre



Photo 5 : Récipient à gobelet

IV-1-2-d Préparation de la prise d'essai

Chauder l'échantillon à la température la plus basse à laquelle il devient suffisamment fluide pour pouvoir être versé. Agiter l'échantillon pour l'homogénéiser, ensuite le verser dans le gobelet. Il faut que sa hauteur soit supérieure à 10mm environ, profondeur à laquelle l'aiguille est susceptible de pénétrer au cours de l'essai. Protéger le gobelet et son contenu de la poussière par un couvercle, le mettre dans un local dont la température est comprise entre 20 et 30°C pendant une heure à 1h 30mm. Placer ensuite le gobelet dans le bain d'eau ainsi que le récipient de transfert, l'y laisser encore pendant 1h à 1h 30mm, le bain d'eau étant maintenu à $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

IV-1-2-e Exécution de l'essai

Placer la prise d'essai dans le récipient rempli d'une quantité d'eau suffisante provenant du bain pour recouvrir complètement le gobelet. Ensuite placer le récipient sur le plateau du pénétromètre. Déplacer l'aiguille chargée de 100 grammes (charge totale) pour qu'elle affleure en surface de l'essai. Ramener à zéro l'aiguille du cadran, libérer l'aiguille pendant 5 secondes, la bloquer ensuite et mesurer la profondeur d'enfoncement en dixième de millimètre.



Photo 6 : Exécution de l'essai de pénétrabilité

L'opération est répétée trois fois en différents points de la surface de la prise d'essai distants d'au moins 10mm les uns des autres.

IV-1-2-f Expression des résultats

La pénétration est la moyenne des résultats des trois déterminations répondant aux conditions du tableau ci-dessous, arrondie à l'unité la plus proche, chaque unité correspondant à 0,1mm.

Tableau 6 : Expression des résultats de la pénétration

Pénétration	0-12	13-70	71-125	126-180	181-225	>225
Différence entre les valeurs extrêmes	2	3	4	5	6	3% de la valeur la plus faible

Source : Essais normaux de réception des produits noirs – LNTPB

On a réalisé, dans cet essai de pénétrabilité, 5 pénétrations distantes de 10 mm.

Soit : 60, 68, 72, 59 et 65, les valeurs obtenues sur le Pénétromètre.

La moyenne est 64.8 ~ 65

On peut dire donc que ce bitume a la **CLASSE 60/70**

C'est un Bitume Semi dur

IV-1-3 Méthode Bille-anneau

IV-1-3-a Introduction

Un autre critère d'appréciation de la qualité d'un bitume est sa susceptibilité aux variations de la température.

Ce paramètre est déterminé par l'essai du point de ramollissement Bille-Anneau (B.A)

IV-1-3-b Définition

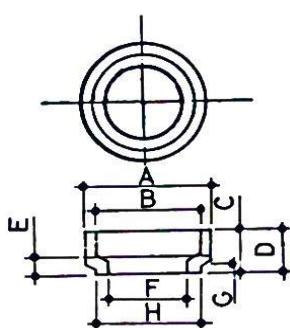
Le point de ramollissement Bille et Anneau est la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

IV-1-3-c Principe

Une bille d'acier d'une masse déterminée est placée sur une prise d'essai du produit, contenue dans un anneau de métal de dimension normalisées. L'ensemble est chauffé à une vitesse constante déterminée. La température à laquelle la prise d'essai devient assez molle pour que la bille, ayant pénétré le produit bitumineux tombe enveloppée de celui-ci d'une hauteur déterminée, est prise comme le point de ramollissement du produit étudié.

IV-1-3-d Appareillage

Anneau à épaulement en laiton (conforme aux dimensions indiquées sur la figure ci-dessous)

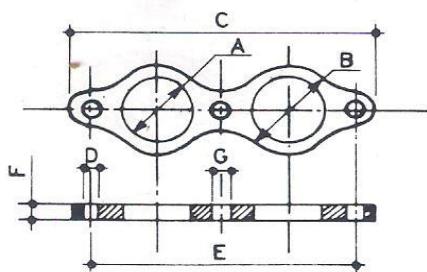


$A = 23,0 \pm 0,1$	$E = 2,8 \pm 0,1$
$B = 19,8 \pm 0,1$	$F = 15,9 \pm 0,1$
$C = 4,4 \pm 0,1$	$G = 2,0$
$D = 6,4 \pm 0,1$	$H = 19,0 \pm 0,1$

Fig 8 : Anneau à épaulement

Les anneaux sont supportés par un dispositif en laiton ayant les dimensions indiquées sur la figure ci-dessous.

- Billes : billes en acier dont le diamètre est de 9,53mm et la masse est de $3,5 \pm 0,05$ gramme.
- Guides : guide de centrage de la bille, c'est un dispositif en laiton sa forme et sa dimension sont indiquées ci-dessous :



A = 19,1, ce diamètre doit permettre l'insertion de l'anneau jusqu'à son épaulement.

B = 24,0

C = 76,0

D = 5,5

E = 67,0

F = 1,5

G = 5,5

Fig 9 : Support d'anneau

- Vase cylindrique en verre : susceptible d'être chauffé
- Thermomètre précis au $0,2^{\circ}\text{C}$ (t° max : 80°C)
- Pince
- Spatule



Photo 7 : Essai TBA



IV-1-3-e Préparation de L'échantillon

Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit assez fluide pour être versé.

Verser l'échantillon chauffé dans deux anneaux. Pendant cette opération, les anneaux reposent sur une plaque. Laisser refroidir pendant 30mn.

Après refroidissement, enlever l'excès de produit par arasement en utilisant une spatule légèrement chauffée.

IV-1-3-f Exécution de l'essai

Assembler l'appareillage avec les anneaux, le thermomètre et les guides en position correcte, remplir le vase avec de l'eau distillée à $5 \pm 1^\circ\text{C}$ sur une hauteur comprise entre 102 et 108mm. Maintenir la température de 5°C pendant 15 minutes, en plaçant si nécessaire le vase cylindrique dans de la glace fondante. Placer une bille à l'aide d'une pince au centre de chaque guide.

Chauffer l'ensemble de façon à éléver la température de 5°C par minute. Cette élévation de température doit être uniforme. Noter pour chaque ensemble anneau-bille la température indiquée par le thermomètre, à laquelle l'échantillon enveloppant la bille touche la plaque inférieur du support.

IV-1-3-g Expression des résultats

Arrondir à $0,5^\circ\text{C}$ près la moyenne des températures enregistrées des deux essais et noter ce résultat comme le point de ramollissement.

➤ Indice de pénétrabilité

$$Ip = \log 800 - \frac{\log(\text{pénétration à } 25^\circ\text{C})}{TBA - 25}$$

AN : $Ip = \log 800 - [\log 65/(45 - 25)]$

$$Ip = 0.26$$

La température Bille-Anneau à temps réel en 9 minutes est :

$$TBA = 50^\circ\text{C}$$

IV-1-4 Perte à la chaleur

IV-1-4-a Définition

La perte de masse au chauffage des produits bitumineux est le rapport exprimé en pourcent de la perte de masse de la prise d'essai à sa masse initiale.

IV-1-4-b Principe

Une prise d'essai est pesée puis chauffée à $163^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant 5h dans une étuve ventilée. Elle est à nouveau pesée pour déterminer sa perte de masse.

IV-1-4-c Appareillage

- Etuve, pouvant être maintenue à $163^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$



Photo 8 : Etuve CENCO pouvant maintenir 163°C

- Thermomètre
- Godet en métal de forme cylindrique à fond plat, dont les dimensions intérieures sont :

Diamètre : 55mm

Profondeur : 35mm

IV-1-4-d Préparation de l'échantillon

Homogénéiser l'échantillon et chauffer à la température minimale nécessaire, en évitant l'inclusion de bulles d'air. Prélever la prise d'essai.

**IV-1-4-e Exécution de l'essai**

Prélever une prise d'essai de $54 \pm 0,5$ gramme et l'introduire dans un godet propre sec vitré pesé à 0,01g. Porter l'étuve à une température de $163^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et y placer le godet contenant la prise d'essai. Maintenir la température à 163°C pendant cinq heures. Une fois la période terminée retirer la prise d'essai de l'étuve, la refroidir et peser à 0,01g près.

IV-1-4-f Expression des résultats

La perte de masse à la chaleur est le rapport exprimé en pourcent de la perte de la prise d'essai à sa masse initiale.

Elle est donnée par la moyenne de deux déterminations arrondie à 0,05% près.

Tableau 7 : Perte à la chaleur du bitume

PERTE A LA CHALEUR A 163°C	1er essai	2ème essai
GODET	I	II
Poids Godet = P1	53,92	55,61
poids Godet + Bitume avant étuvage = P2	65,94	67,27
poids Godet + Bitume après étuvage = P3	65,88	67,22
Perte à la chaleur = P4 = P2-P3	0,06	0,05
% perte à la chaleur = $(P4*100) / (P2-P1)$	0,499	0,431

Source : LNTPB

La perte à la chaleur du bitume pur est :

$$PC = 0,465\%$$

IV-2 Analyse des granulats**IV-2-1 Les granulats****IV-2-1-a Dimensions des granulats**

On utilise, dans cet ouvrage, les classes granulaire de 0/6 ; 6/10 ; 10/14.

Les conditions de refus et de tamisât doivent être inférieures à 15% pour les éléments supérieurs à D et inférieurs à d , le refus sur le tamis de maille 1.56 D doit être nul.

IV-2-1-b Traitements des granulats

Les granulats secs

Les granulats sont préalablement séchés. 100 granulats sont comptés dans un petit pot en carton que l'on place 24 heures en atmosphère ventilée à 50°C. Le pot contenant les granulats est ensuite introduit dans une boîte métallique close, qui est laissée 24 heures dans une enceinte réglée à la température de l'essai soit +5°C.

Les granulats humides

Pour obtenir des granulats humides tout en conservant la gangue terreuse et les poussières, on compte 100 granulats dans un panier en toile métallique perforée que l'on place 24 heures dans une enceinte réglée à +5°C avec une hygrométrie de 100%.

IV-2-2 Tamisage

Les formules granulométriques sont obtenues par tamisage des granulats



Photo 9 : Tamis

IV-2-2-a Sable sec 0/6

Poids initial : 2523.5 g

Nombre du tamis : 10



Tableau 8 : Granulométrie du sable sec

Module AFNOR	Tamis (en mm)	Refus (gramme)	Refus cumulés	Pourcentage	
				Cumulé	Compt.
38	5	1,5	1,5	0,06	100
37	4	42,5	44	1,74	98
35	2,5	197,5	241,5	9,57	90
34	2	385,5	627	24,85	75
31	1	406,5	1033,5	40,96	59
28	0,5	484	1517,5	60,13	40
26	0,315	211	1728,5	68,5	32
24	0,2	264	1992,5	78,96	21
22	0,125	169	2161,5	85,65	14
20	0,08	105	2266,5	89,82	0

Source : LNTPB

IV-2-2-b Gravillon 6/10

Poids initial: 4052.63 g

Nombre du tamis : 7

Tableau 9 : Granulométrie du gravillon 6/10

Module AFNOR	Tamis (en mm)	Refus (gramme)	Refus cumulés	Pourcentage	
				Cumulé	Compt.
42	12,5	77	77	1,9	98
41	10	454,5	531,5	13,15	87
40	8	2302,5	2834	70,11	30
38	5	906,5	3740,5	92,53	7
37	4	159,5	3900	96,47	3
35	2,5	95,5	3995,5	98,84	1
20	0,08	40	4035,5	99,83	0

Source : LNTPB

**IV-2-2-c Gravillon 10/14**

Poids initial : 7189 g

Nombre du tamis : 8

Tableau 10 : Granulométrie du gravillon 10/14

Module AFNOR	Tamis (en mm)	Refus (gramme)	Refus cumulés	Pourcentage	
				Cumulé	Compt.
43	16	67,5	67,5	0,93	99
42	12,5	145,5	213	2,96	97
41	10	3330,5	3543,5	49,29	51
40	8	2411	5954,5	82,83	17
38	5	1170,5	7125	99,11	1
37	4	31,5	7156,5	99,55	0
35	2,5	1,5	7158	99,57	0
20	0,08	14,5	7172,5	99,76	0

Source : LNTPB

IV-2-3 Essai d'usure des granulats**IV-2-3-a Essai LOS ANGELES**

C'est un essai normalisé de la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats, norme française P 18-573 [143]. Il mesure la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant aux chocs de boulets normalisés. La machine comporte un cylindre creux en acier de 12 mm $\pm 0,5$ mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de 711 mm ± 2 mm. Les boulets sphériques en acier sont d'un diamètre de 47 mm ± 1 mm et pèsent entre 420 et 445 g. La vitesse de rotation de la machine est entre 30 et 33 tr/min. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les six classes : 4/6 mm, 6/10 mm, 10/14 mm, 15/25 mm, 16/31,5 mm, 25/50 mm. La masse de l'échantillon pour essai sera de 5 000 g ± 5 g. Le résultat est calculé par l'équation suivante :

$$LA = 100 * \frac{m}{5000}$$



Tableau 11 : Nomenclature pour LA

Essai LOS ANGELES	
Classe Granulaire	Cg
Nombre de rotation	Nr
Nombre boulets	Nb
Masse limite des boulets	Mlb
Masse réelle	Mr
Coefficient Los Angeles	LA

Source : Auteur

Tableau 12 : Coefficient LA

Cg	Nr	Nb	Mlb	Mr	Granulât	Masse de Prise	Après essai masse des éléments		LA
							> 1,6 mm m'	< 1,6mm m	
3	500	11	4690 - 4860	4720	10\14	5000	3450	1550	31

Source : LNTPB

IV-2-3-b Essai Micro-Deval

L'essai micro-Deval permet de mesurer la résistance à l'usure des granulats, selon la norme française P 18-572 [142]. C'est un essai normalisé destiné à caractériser l'usure par frottements réciproques en présence d'eau d'un gravillon et consistant à mesurer la quantité de fines produites lors de la rotation d'un cylindre contenant le matériau et de l'eau. Il comporte deux cylindres creux, fermés à une extrémité, ayant un diamètre intérieur de 200 mm ± 1 mm et une longueur utile de 154 mm ± 1 mm pour les gravillons compris entre 4 et 14 mm et de 400 mm ± 2 mm pour les 25 - 50 mm. L'usure est réalisée à l'aide des billes sphériques de 10 mm $\pm 0,5$ mm de diamètre en acier. La vitesse de rotation est de 100 tr/min ± 5 tr/min. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires : 4/6 mm, 6/10 mm, 10/14 mm et 25/50 mm. Le résultat s'exprime sous la forme du coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE) :



$$MDE = \frac{(500 - m')}{5}$$

Tableau 13 : Coefficient MDE

Essai MICRO DEVAL	
Essai	Avec eau
Prise d'essai	5000
Masse chargée	500
Volume d'eau	2,5
Refus à 16 mm (m')	419,5
Coefficient micro-deval	MDE
MD=(500-m')/5	16

Source : Auteur

IV-2-3-c Coefficient d'aplatissementGravillon (g) : 6/10

Tableau 14 : Coefficient d'aplatissement du gravillon 6/10

TAMISAGE SUR TAMIS		TAMISAGE SUR GRILLE	
Classes granulaires (d/D)	Masse de chaque d/D	Ecartement des grilles	Eléments passants
10 à 12,5	77	6,3	6
8 à 10	454,5	5	29
6 à 8	2302,5	4	354,5
5 à 6	906,5	3,15	254,5
4 à 5	159,5	2,5	111,5
M	$\longrightarrow \Sigma = 3900$	P	$\longrightarrow \Sigma = 755,5$

Source : Auteur

Coefficient d'aplatissement Global **A = P/M = 0,19 soit 19,37%**

Gravillon (G) : 10/14

Tableau 15 : Coefficient d'aplatissement du gravillon 10/14

TAMISAGE SUR TAMIS		TAMISAGE SUR GRILLE	
Classes granulaires (d/D)	Masse de chaque d/D	Ecartement des grilles	Eléments passants
16 à 20	67,2	10	13
12,5 à 16	145,5	8	6,5
10 à 12,5	3330,5	6,3	290,5
8 à 10	2411	5	247
6,3 à 8		4	
5 à 6,3	1170,5	3,15	27,5
4 à 5	31,5	2,5	1
M	$\Sigma = 7156,5$	P	$\Sigma = 585,5$

Coefficient d'aplatissement Global $A = P/M = 0,08$ soit 8,18%

IV-3 Caractéristiques des résidus

IV-3-1 Densité apparente

La densité apparente est la densité qui se montre aux yeux ou à l'esprit, elle est obtenue par le rapport du poids de l'échantillon par le volume du moule.

L'expression est formulée comme suit :

$$\gamma_d = \frac{P_3}{V}$$

**IV-3-1-a Sable de carrière 0/6**

Tableau 16 : Densité apparente 0/6

	Essai (gramme)
Poids du moule P1	635
Poids moule + échant P2	2036
Poids échant P3 = P2 - P1	1401
Volume moule V	1000

Source : Auteur

$$\gamma_d = 1.401$$

IV-3-1-b Granite rose 6/10

Tableau 17 : Densité apparente 6/10

	Essai (gramme)
Poids du moule P1	7866
Poids moule + échant P2	19201,5
Poids échant P3 = P2 - P1	11335,5
Volume moule V1	8000

Source : Auteur

$$\gamma_d = 1.416$$

IV-3-1-c Granite rose 10/14

Tableau 18 : Densité apparente 10/14

	Essai (gramme)
Poids du moule P1	7866
Poids moule + échant P2	19108,5
Poids échant P3 = P2 - P1	11242,5
Volume moule V1	8000

Source : Auteur

$$\gamma_d = 1.405$$

**IV-3-2 Poids spécifiques**

Le poids spécifique est la valeur de l'échantillon, en gramme, par unité de volume en centimètre cube.

Il est obtenu par la formule :

$$\gamma_s = \frac{E5}{V}$$

IV-3-2-a Sable de carrière 0/6

Tableau 19 : Poids spécifique du sable 0/6

Référence Picno	Picno n°2
Poids du Picnomètre P1	388,5
Poids du Picno + Eau P2	890
Volume du Picno + V1 = P2 - P1	501,5
Poids Picno + échant P3	1056,5
Poids Picno + échant + eau P4	1305
Poids Eau = P4 - P3 = V2	248,5
Volume échant V1 - V2 = V	253
Poids échant P3 - P1 = E5	668

Source : Auteur

$$\gamma_s = 2.64 \text{ g/cm}^3$$

IV-3-2-b Granite rose 6/10

Tableau 20 : Poids spécifique du sable 6/10

Référence Picno	Picno n°1
Poids du Picnomètre P1	714
Poids du Picno + Eau P2	1797
Volume du Picno V1 = P2 - P1	1083
Poids Picno + échant P3	1812,5



Poids Picno + échant + eau P4	2477
Poids Eau = P4 - P3 = V2	664,5
Volume échant V1 -V2 = V	418,5
Poids échant P3 - P1 = E5	1098,5

Source : Auteur

$$\gamma_s = 2.624 \text{ g/cm}^3$$

IV-3-2-c Granite rose 10/14

Tableau 21 : Poids spécifique du sable 10/14

Référence Picno	Picno n°3
Poids du Picnomètre P1	683,5
Poids du Picno + Eau P2	1799
Volume du Picno V1 = P2 -P1	1115,5
Poids Picno + échant P3	1854
Poids Picno + échant + eau P4	2530
Poids Eau = P4 - P3 = V2	676
Volume échant V1 -V2 = V	439,5
Poids échant P3 - P1 = E5	1170,5

Source : Auteur

$$\gamma_s = 2.663 \text{ g/cm}^3$$

IV-4 Identification de l'additif

L'additif utilisé est le déchet plastique de la SMTP ; qui recycle des produits plastiques (films plastiques, profilés de fenêtre, Polyéthylène haute densité (emballages de produits ménagers), matériaux chimiques contenant du carbone et de l'hydrogène, etc. Ce polymère est d'une granulométrie de 2 à 3 mm. Il est dénommé PR PLAST et offre, au niveau de l'enrobé, un double effet de renforcement. Un effet de liant offrant notamment un abaissement de la pénétrabilité, une augmentation de la température bille et anneau, un abaissement de la susceptibilité thermique. Un effet d'armature initié par des fibres plastiques présentes en créant des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique. Un

effet bloquant dû aux particules ramollies lors de la mise en œuvre et qui seront ainsi thermoformées lors du compactage en remplissant les vides du squelette granulométrique.

L'ensemble de ces trois effets permet à l'enrobé ainsi amélioré d'obtenir une amélioration importante des performances des chaussées et de leur durée de service.

Les caractéristiques principales du PR PLAST sont les suivant :

- La densité : 0,94
- La température de fusion : 200°C
- La température critique de dégradation : 240°C



Photo 10 : Granulats de Polyéthylène à Basse Densité



CHAPITRE V : MISE EN ŒUVRE DE L'ENROBAGE

V-1 Les chaussées

V-1-1 Généralités sur les chaussées

Le rôle premier d'une chaussée est de permettre la circulation tout en assurant la sécurité et le confort. Dans le but de réduire les coûts, il est nécessaire de trouver une structure capable de supporter et de transmettre au sol les sollicitations mécaniques et thermiques s'exerçant sur la chaussée.

V-1-1-a Structures

Une chaussée se présente sous forme d'un empilement de couches, qui ont chacune un rôle bien défini. Elle est composée de trois parties (voir figure 10) :

- ❖ **La plate-forme** : elle est constituée d'une couche de forme et d'une sous-couche et permet de d'assurer la transition avec le terrain naturel en reprenant les hétérogénéités du sol support.
- ❖ **Le corps de chaussée ou assise** : il permet de répartir les charges induites par les véhicules pour les amener à niveau compatible avec les caractéristiques du sol support. Il est constitué de deux sous-couche, appelées couche de base et couche de fondation, de nature distincte ou non en fonction de l'environnement et du trafic subi par la structure.
- ❖ **Les couches de surface** : elles comportent la couche de roulement et éventuellement la couche de liaison. La couche de roulement peut être une couche d'enrobé ou une couche d'enduit superficiel. Elle a pour but de protéger des infiltrations d'eau et de l'agressivité du trafic. La couche de liaison assure un bon collage entre la couche de roulement et les assises.

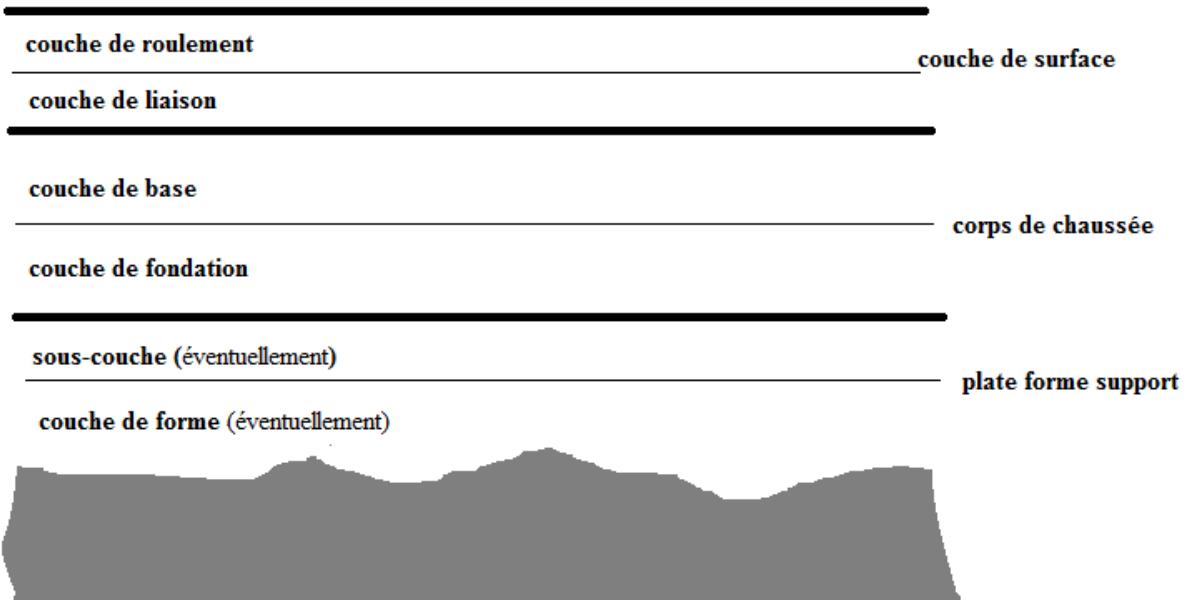


Fig 10 : Structures des chaussées

V-1-1-b Types de chaussées

Selon la nature des matériaux utilisés et la répartition des charges sur sol, les différents types de chaussées sont classés en trois familles principales :

- ❖ **Les chaussées souples** : elles acceptent plus facilement les déformations du support et conviennent à des routes peu fréquentées par les poids-lourds.
- ❖ **Les chaussées semi-rigides** : elles conviennent à des trafics plus conséquents. Par leur nature et leur épaisseur, elles se déforment moins que les chaussées souples.
- ❖ **Les chaussées rigides** : ce sont des chaussées en béton de ciment, peu développées en France mais très utilisées par exemple aux Etats-Unis.

V-1-2 Les dégradations des chaussées

V-1-2-a Conditions d'observation

Au passage d'une charge roulante, une chaussée subit des efforts normaux et transversaux qui conduisent à divers types de dégradations dont les principales sont l'orniérage et la fissuration.

L'orniérage est une déformation irréversible transversale apparaissant sous le passage des roues qui concerne d'assez grandes longueurs de chaussée. Son origine est le



plus souvent un fluage de la couche de roulement dû à l'utilisation d'un bitume trop **mou** (cas des ornières à faible rayon).

La fissuration est une famille de dégradation caractérisée par une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée.

Les deux familles de fissuration des couches sont :

La fissuration des couches inférieures est principalement due à la fatigue de la structure qui se caractérise par la rupture de l'enrobé après application répétée d'un grand nombre de sollicitations, dont l'amplitude est inférieure à celle conduisant à la rupture au premier chargement. La fatigue des enrobés bitumineux constitue l'un des principaux modes de rupture des chaussées bitumineuses épaisses. L'évaluation du comportement à la fatigue est donc à la base des méthodes de dimensionnement dans de nombreux pays.

La fissuration dans les couches supérieures se manifeste dans la chaussée par des fissures transversales régulièrement espacées de 5 à 20 mètres et des fissures longitudinales qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres. Leur ordre d'apparition et leur origine ne sont pas clairement établis, car l'expérience de terrain est parfois en désaccord avec les guides pratiques et techniques qui définissent un répertoire des déformations et préconisent des solutions d'entretien. Après plusieurs années, ces fissures peuvent atteindre 20 mm de large. A moins d'être remplies par un enduit d'étanchéité, elles permettent à l'eau d'infiltrer la chaussée et de réduire sa capacité structurelle. Cette fissuration peut être le résultat d'un seul passage d'une charge roulante mais peut aussi être dû à un phénomène de fatigue.

V-1-2-b Fissuration thermique

Les sollicitations thermiques sont également à l'origine d'un grand nombre de dégradations, et sont souvent un facteur important de vieillissement des chaussées.

★ *Amplitudes thermiques*

En ce qui concerne les sollicitations sous trafic aux températures de service extrêmes, les déformations permanentes et la fissuration des chaussées après vieillissement accéléré, dû aux effets thermiques, demeurent une préoccupation majeure des maîtres d'ouvrages.

Cette fissuration est principalement liée aux grandes amplitudes thermiques. Une température ambiante élevée est un facteur de vieillissement du bitume car elle a pour effet d'augmenter sa rigidité ce qui le rend plus résistant à la déformation permanente. En revanche, lorsque la température ambiante devient très basse (< 20°C), le matériau se fragilise.

La fissuration à basse température est ainsi l'un des premiers mécanismes de détérioration dans les climats froids.

Comportement à basse température

Pour étudier le comportement des enrobés bitumineux à basse température, il n'y a pas encore de méthodologie d'étude bien codifiée. Des enseignements peuvent être obtenus à partir d'essais visant à caractériser la résistance mécanique ou la capacité de l'enrobé à relaxer les contraintes. La résistance à la fissuration thermique fragile des enrobés est généralement appréhendée par la détermination du coefficient de dilatation thermique et par une combinaison d'essais de retrait thermique empêché, de traction et de relaxation à basse température.

V-2 Les enrobés bitumineux

V-2-1 Définition des enrobés bitumineux simples

L'enrobé bitumineux est un mélange uniforme des granulats enrobés de bitume.



Photo 11 : Mélange EB 0/14 avec bitume pur

II-2-2 Enrobés bitumineux à base d'additifs polymères

C'est un mélange du bitume, granulats et granulats de polyéthylène à basse densité



Photo 12 : Mélange EB 0/14 mélangé avec du PEBD

V-2-3 Formulation des mélanges enrobés bitumineux 0/14 à chaud**V-2-3-a Caractéristiques des enrobés**

La figure illustre le schéma de la relation entre les différents composants d'un enrobé bitumineux.

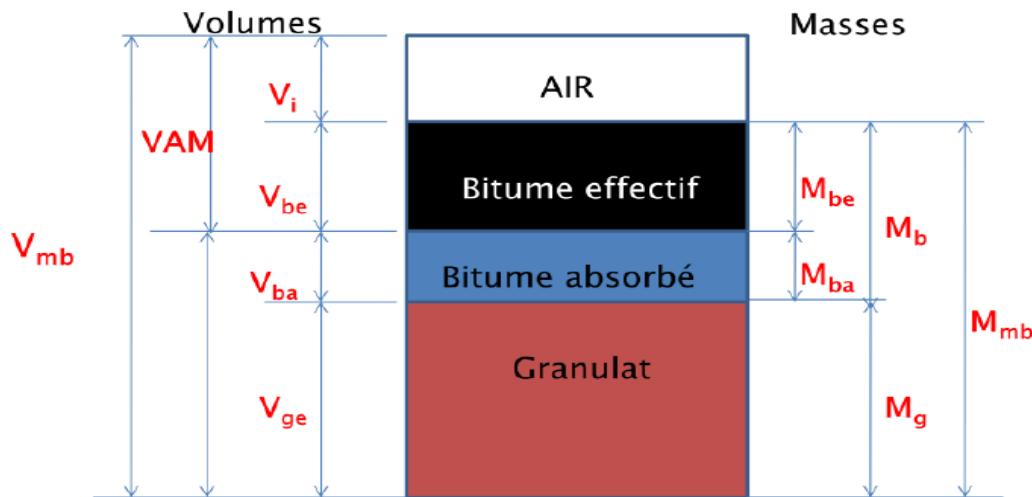


Figure 11 : Composants d'un Enrobé Bitumineux

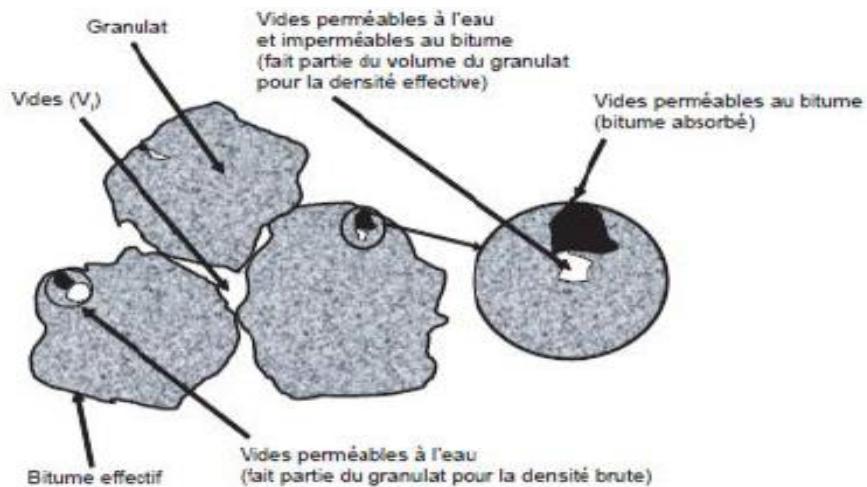


Fig 12 : Schémas des vides

V-2-3-b Résultats de la granulométrie

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées dans les pays tropicaux pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement. Les trois fractions utilisées sont 0/6, 6/10 et 10/14 extraites de la carrière de Toamasina.

La formulation est obtenue par tamisage des granulats.



★ Formule A

Tableau 22 : Pourcentage des granulats pour la formule A

Module AFNOR	Tamis (en mm)	Refus	Refus cumulés	Cumulé	Compt.
		en gramme			en %
		S=0/6	g=6/10	G=10/14	
44	20	45	25	30	100
43	16	45	25	29,7	99,7
42	12,5	45	25	29,1	99,1
41	10	45	24,5	15,3	84,8
40	8	45	21,8	5,1	71,9
38	5	45	7,5	0,3	52,8
37	4	44,1	1,8	0	45,8
35	2,5	40,5	0,8	0	41,3
34	2	33,8	0,3		34,1
31	1	26,6			26,6
28	0,5	18			18
26	0,815	14,4			14,4
24	0,2	9,5			9,5
22	0,125	6,3			6,3
20	0,08	4,5			4,5

Source : LNTPB

Séparation des éléments :

Tableau 23 : Séparation des éléments pour la formule A

G > 10mm	G*1	15,2	1	15,2
5mm < g < 10mm	0,25*g	32	0,25	8
0,315 mm < S < 5mm	2,3*S	38,4	2,3	88,32
0,08 mm < s < 0,315	12*s	9,9	12	118,8
f < 0,08mm	135*f	4,5	135	607,5
Total (T)				821,26

Source : LNTPB



★ Formule B

Tableau 24 : Pourcentage des granulats pour la formule B

Module AFNOR	Tamis (en mm)	Refus	Refus cumulés	Cumulé	Compt.
		en gramme			en %
		S=0/6	g=6/10	G=10/14	
44	20	35	25	40	100
43	16	35	25	39,6	99,6
42	12,5	35	25	38,8	98,8
41	10	35	24,5	20,4	79,9
40	8	35	21,8	6,8	63,6
38	5	35	7,5	0,4	42,9
37	4	34,3	2	0	36,3
35	2,5	31,9	1	0	32,9
34	2	26,3	0,3		26,6
31	1	20,7			20,7
28	0,5	14			14
26	0,815	11,2			11,2
24	0,2	7,4			7,4
22	0,125	5,3			5,3
20	0,08	3,5			3,5

Source : LNTPB

Séparation des éléments :

Tableau 25 : Séparation des éléments pour la formule B

G > 10mm	G*1	20,1	1	20,1
5mm < g < 10mm	0,25*g	37	0,25	9,25
0,315 mm < S < 5mm	2,3*S	31,7	2,3	72,91
0,08 mm < s < 0,315	12*s	7,7	12	92,4
f < 0,08mm	135*f	3,5	135	472,5
Total (T)				667,16

Source : LNTPB



★ Formule C

Tableau 26 : Pourcentage des granulats pour la formule C

Module AFNOR	Tamis (en mm)	Refus	Refus cumulés	Cumulé	Compt.
		en gramme			en %
		S=0/6	g=6/10	G=10/14	
44	20	55	15	30	100
43	16	55	15	29,7	99,7
42	12,5	55	15	29,1	99,1
41	10	55	14,7	15,3	85
40	8	55	13,1	5,1	73,2
38	5	55	4,5	0,3	59,8
37	4	53,9	1,1	0	55
35	2,5	49,5	0,4	0	49,9
34	2	41,3	0,2		41,5
31	1	32,5			32,5
28	0,5	22			22
26	0,815	17,6			17,6
24	0,2	11,6			11,6
22	0,125	7,7			7,7
20	0,08	5,5			5,5

Source : LNTPB

Séparation des éléments :

Tableau 27 : Séparation des éléments pour la formule C

G > 10mm	G*1	15	1	15
5mm < g < 10mm	0,25*g	25,2	0,25	6,3
0,315 mm < S < 5mm	2,3*S	42,2	2,3	97,06
0,08 mm < s < 0,315	12*s	12,1	12	145,2
f < 0,08mm	135*f	5,5	135	742,5
Total (T)				1006,06

Source : LNTPB

Surface spécifique Σ (m^2/kg)

Photo 13 : Picnomètre pour les surfaces spécifiques des granulats

Elle est donnée par la formule :

$$\Sigma = \frac{T}{100}$$

D'où on a les résultats suivants :

Tableau 28 : Récapitulation des résultats des surfaces spécifiques

Formule	Surfaces spécifiques (m^2/kg)
A	8,2126
B	6,6716
C	10,0606

Source : Auteur

V-2-3-c Calcul du teneur en liants

Le teneur en liants est obtenu à partir de la formule du module de richesse.

Dans cet ouvrage on a réalisé 3 essais de différents pourcentage de teneur en liants, dont 3 modules de richesses différents 3,6 ; 3,8 et 4. (Formule A, B, C)

Mais on a apparu, ici, la formulation optimale c'est-à-dire on a pris la formule B.

D'où on a :

$$\%L = M * \sqrt[5]{\Sigma}$$

Tableau 29: Teneur en bitume retenu

Formule	A	B	C
Module de richesse	3,8	3,8	3,8
Teneur en liant (%)	5,79	5,5	6,02

Source : Auteur

V-2-4 Choix de la formulation granulaire et le teneur en bitume

Tableau 30 : Pourcentage du mélange

Formules	Granulats	Graviers		Sable concassé	Bitume
		%		%	%
Fraction	10/14	6/10	0/6	60/70	
A	45	25	30	5,78	
B	35	25	40	5,5	
C	55	15	30	6,04	

Source : Auteur

➔ Prise d'essai au LNTPB : Mélange granulats = 5000 grammes

Tableau 31 : Prise d'essai du mélange

Poids (en gramme)	Granulats	Graviers		Sable concassé	Bitume
	Fraction	10/14	6/10	0/6	60/70
A	2250	1250	1500	264	
B	1750	1250	2000	306	
C	2750	750	1500	315	

Source : Auteur

La courbe granulométrique du mélange est donnée dans la figure n°13. La formule B s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 selon la recommandation de SMATP le Février 2014.

Les teneurs en liants en fonction des modules de richesses sont données dans le tableau 29. La fabrication de l'enrobé bitumineux au niveau du LNTPB a été réalisée conformément à la norme NFP 98-250-1.

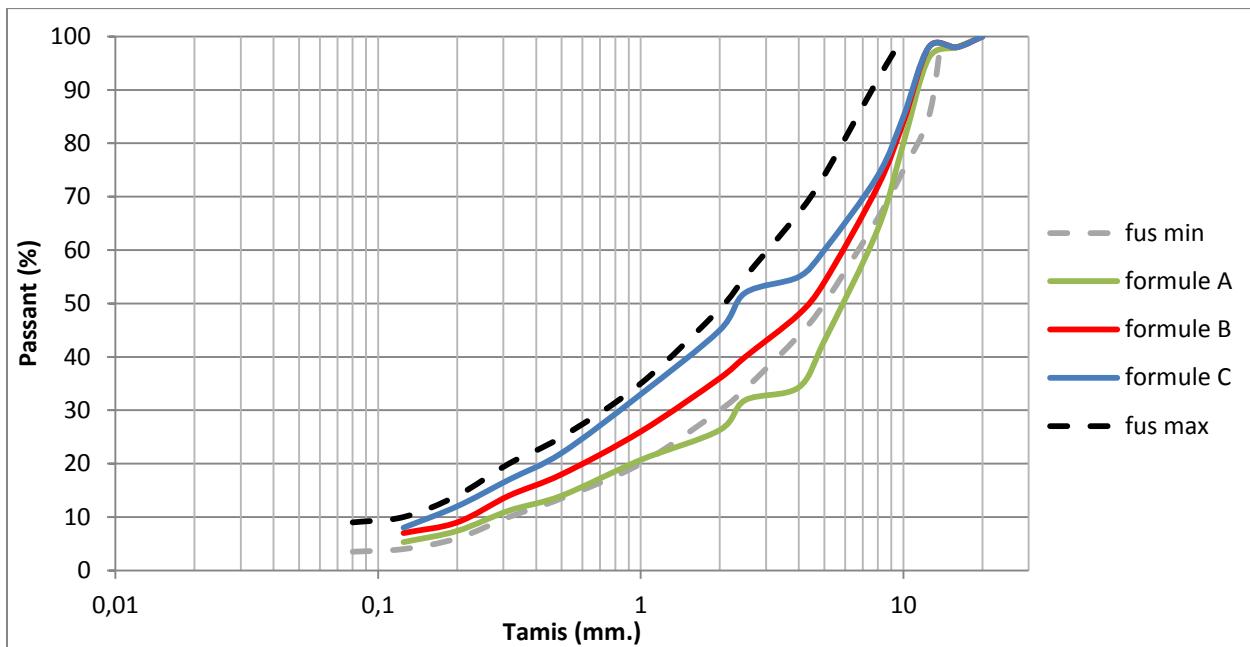


Fig 13 : Courbe granulométrique du mélange granulaire

V-3 Essais de performances mécaniques

Deux formulations de mélange à base d'additif polymère ont été retenues dans cette étude (formulation A avec 10% de Polyéthylène, formulation B avec 20% de Polyéthylène).

V-3-1 Essai Marshall

V-3-1-a Principe de la méthode Marshall

Avant d'utiliser un enrobé, celui-ci devra satisfaire aux exigences de conformité. Comme pour le béton, un enrobé doit être soigneusement préparé. Il doit :

- ❖ Résister aux déformations ou orniérage
- ❖ Résister à la fissuration par effet de fatigue ou thermique

Une des méthodes de dosage la plus utilisée au Canada et aux Etats-Unis est la méthode Marshall. Elle s'applique pour tous les enrobés préparés et posés à chaud à base de bitume et de granulats ne dépassant pas le 28 mm.

La méthode Marshall consiste à déterminer la teneur optimale en bitume d'un mélange de granulométrie connue. Des éprouvettes de forme cylindrique de 10 cm de diamètre et d'environ 6,3 cm de hauteur sont préparées avec différentes teneurs en bitume avec des matériaux répondant aux exigences du devis des revêtements.



Photo 14 : Essai Marshall et mesure de fluage

V-3-1-b Confection de l'éprouvette

Pour chaque teneur en bitume ainsi trouvée, il faut ensuite trouver ou mesurer les caractéristiques de l'éprouvette chauffée et compactée : stabilité, fluage, masse volumique, volume des vides, volume des vides comblés par le bitume, film (ou feuille) de bitume effectif.

- Cuisson lors du malaxage : 140°C à 150°C
- Chauffage dans un bain thermostatique avant compactage : 60°C
- Prise d'échantillon : 1200 grammes



Photo 15 : Eprouvette pour l'essai Marshall

V-3-1-c Stabilité de l'enrobé bitumineux

Pour les besoins de cette étude, nous avons sélectionné un enrobé pur qui répond aux recommandations de SMATP sur l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux à chaud. Les spécifications [CTTP 2004] préconisent ; dans le cas de l'utilisation d'un bitume

60/70, une stabilité supérieure à 700 N et un fluage compris entre 20 à 40 mm. La figure 14 montre respectivement la variation de la stabilité en fonction du déchet PEBD selon les procédés de fabrication.

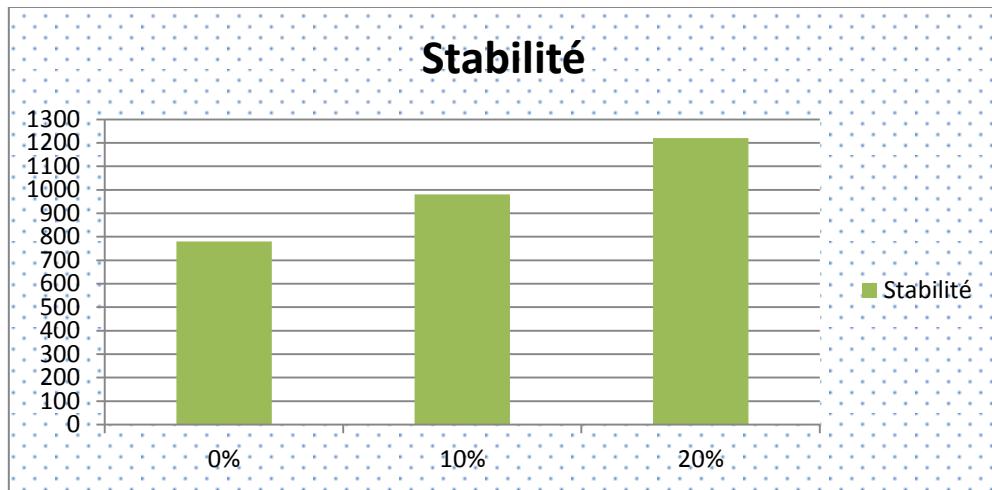


Fig 14 : Stabilité en fonction du PEBD

La stabilité des mélanges à 10% et 20%, est améliorée pour toutes les teneurs en modifiants. Les meilleures stabilités sont obtenues avec le dernier procédé. Dans le cas de 10% de PEBD, l'amélioration est estimée à 25,64% par rapport à l'enrobé pur. Alors que pour 20% de PEBD elle est de 56,41%.

V-3-1-d Fluage de l'enrobé bitumineux

Le figure 15 montre que le fluage de l'enrobé pur est amélioré par les deux procédés pour certaines teneurs de modifiants. Il s'agit des mélanges à 10% et 20% de PEBD. Le fluage obtenu par le dernier procédé peut être l'optimum.

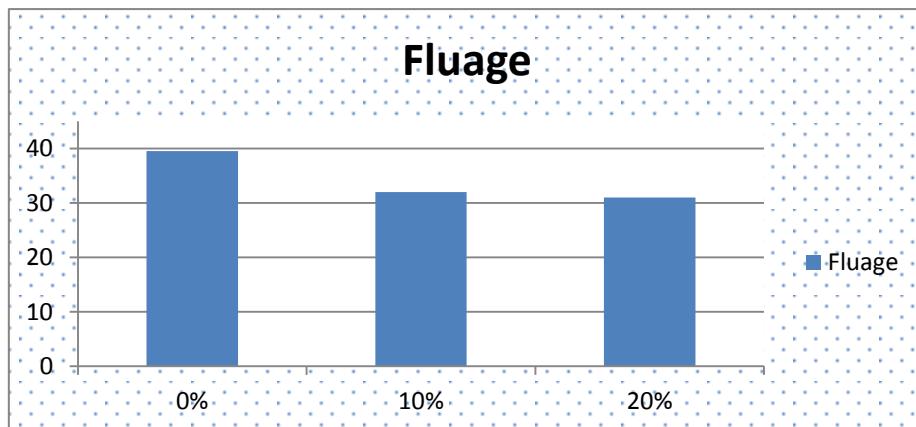


Fig 15 : Fluage en fonction du PEBD

**V-3-1-e Caractéristiques de l'enrobé à chaud 0/14 selon le principe Marshall**

Déroulement des calculs pour obtenir les caractéristiques Marshall :

Tableau 32 : Calcul du poids spécifique

	Sans PEBD	10% PEBD	20% PEBD
Densité du solvant	0,78	0,78	0,78
Poids du picnomètre P1	102	102	102
Volume du picnomètre V1	105	105	105
Poids échantillon + picnomètre P2	145	142	156
Poids échantillon + picno + solvant P3	232,6	229,76	235,89
Poids échantillon P4	43	40	54
Poids du solvant P5	87,6	87,76	79,89
Volume du solvant V2	87,6	87,76	79,89
Volume de l'échantillon V3	17,4	17,24	25,11
Poids spécifique γ_s	2,47	2,32	2,15

Source : Auteur

- ✓ $P4 = P2 - P1$
- ✓ $P5 = P3 - P2$
- ✓ $V2 = P5$
- ✓ $V3 = V1 - V2$

Tableau 33 : Les caractéristiques Marshall

Caractéristique du mélange à 5,5% de bitume	Enrobé sans Polymère	Enrobé avec 10% de Polymère	Enrobé avec 20% de Polymère
Stabilité (Newton)	780	980	1220
Fluage (mm)	39,5	32	31
Poids spécifique (kg/dm ³)	2,47	2,32	2,15

Source : Auteur

V-3-2 Essai Duriez

V-3-2-a Principe de la méthode Duriez

Le but de l'essai est de déterminer, pour une température et un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud, à partir du rapport des résistances en compression avec et sans immersion des éprouvettes après une période de 7 jours. Les résultats des essais DURIEZ montrent que la résistance à la compression à sec et le rapport de résistance après immersion sur la résistance à sec sont conformes aux spécifications de LNTPB.



Photo 16 : Confection de l'éprouvette pour essai duriez

V-3-2-b Confection de l'éprouvette

La confection de l'éprouvette pour l'essai Duriez se fait dans un moule cylindrique, sous charge axiale à double effet. On tient la charge à 60 KN pendant 5mn.

- Moule : 40mm de diamètre intérieur
- Prise d'échantillon : 1050 grammes



Photo 17 : Essai duriez



V-3-2-c Caractéristiques de l'enrobé à chaud 0/14 selon le principe Duriez

Le but de l'essai est de déterminer, pour une température et un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud, à partir du rapport des résistances en compression avec et sans immersion des éprouvettes. Les résultats des essais DURIEZ montrent que la résistance à la compression à sec et le rapport de la résistance après immersion sur la résistance à sec sont conformes aux spécifications de LNTPB.

➡ La densité apparente des différents mélanges

Tableau 34 : Calcul de la densité apparente

	Sans PEBD	10% PEBD	20% PEBD
Poids de l'échantillon à l'air	1047,5	965,5	1042
Poids de l'échantillon paraffiné à l'air	1069,5	1001,5	1066,5
Poids de la paraffine	22	36	24,5
Volume de la paraffine	24,44	40	27,2
Poids échantillon paraffiné dans l'eau	574,5	508,5	525,5
Volume échantillon paraffiné	495	493	541
Volume échantillon	470,56	453	513,8
Densité apparente γ_d	2,2	2,32	2,03

Source : Auteur

- ✓ Poids de la paraffine = Poids échantillon paraffiné à l'air + Poids échantillon à l'air
- ✓ Volume de la paraffine = Poids de la paraffine/0,9
- ✓ Volume échantillon paraffiné = Poids paraffiné à l'air - Poids paraffiné dans l'eau
- ✓ Volume échantillon = Volume échantillon paraffiné – Volume de la paraffine

V-3-1-d Compacité de l'enrobé bitumineux

L'obtention de bonnes performances mécaniques passe par l'optimisation de la compacité des enrobés bitumineux. Elle représente un paramètre de résistance à l'orniérage. Elle est conditionnée par le respect des plages de températures et d'épaisseurs d'application [Serfass et al. 2000]. La figure 16 donne les compacités des différents mélanges.

Ces résultats montrent que l'ajout des modifiants selon le dernier procédé donne de meilleures compacités. Ceci trouve son explication dans le fait que le déchet additif joue le rôle de réducteur de vides. La granulométrie de l'ajout joue un rôle important. Il est essentiel de définir le rôle du modifiant afin d'optimiser leur application. Concernant le premier procédé, les faibles compacités obtenues sont directement liées à la température de malaxage et notamment de compactage. Ces températures doivent être augmentées de 10 à 20°C afin de rendre les bitumes modifiés plus maniables assurant ainsi une bonne cohésion. Toutefois ces températures ne doivent pas dépasser les 150°C pour que le bitume ne soit pas calciné et d'assurer leur bon comportement.

La compacité est obtenue par la formule suivante :

$$\text{compacité} = \frac{\text{densité apparente}}{\text{poids spécifique}}$$

Tableau 35 : Caractéristiques duriez

Caractéristique du mélange à à 5,5% de bitume	Enrobé sans Polymère	Enrobé avec 10% de Polymère	Enrobé avec 20% de Polymère
Poids spécifique (kg/dm ³)	2,47	2,32	2,15
Compacité (%)	89	91,8	94,4

Source : Auteur

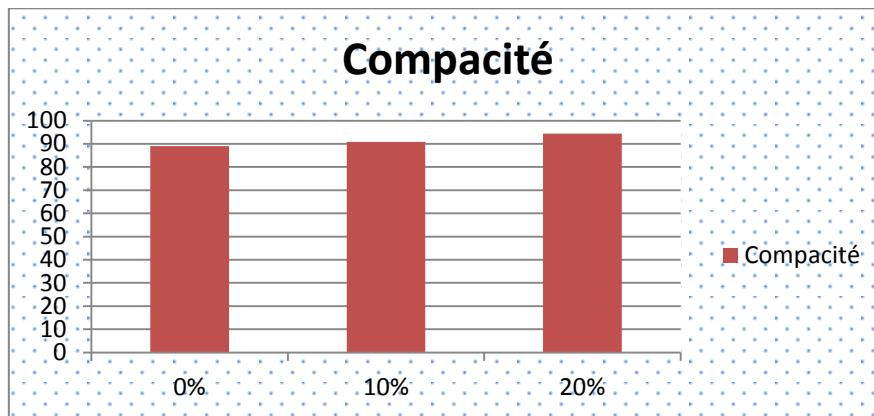


Fig 16 : Compacité en fonction de PEBD

Compression après 7 jours à l'air à 18°C

Tableau 36 : Compression après 7 jours à sec

Eprouvette	Poids		Stabilité		Hauteur		
	à sec	ds théorique	en Newton	en bars	hi (cm)	hf (cm)	Δh %
Sans PEBD	1051,5	2,2	2800	56	9,5	9,28	2,31
10% de PEBD	1025,5	2,24	3240	64,8	9,1	8,7	4,39
20% de PEBD	1049,5	2,17	3400	68	9,6	9,4	2,08

Source : Auteur



Photo 18 : Conservation à l'air de l'éprouvette dans la chambre froide

Compression après immersion de 7 jours à l'air à 18°C

Tableau 37 : Compression après 7 jours immergé

Eprouvette	Poids				Stabilité		Hauteur		
	à sec	à 7 jours	Absp %	ds théorique	en Newton	en bars	hi (cm)	hf (cm)	Δh %
Sans PEBD	1040,5	1066	2,39	2,2	2200	44	9,4	9,38	0,21
10% de PEBD	965,5	1043	2,08	2,18	4160	83,2	8,85	8,5	3,9
20% de PEBD	1046,5	1068,5	2,02	2,21	4600	92	9,4	9,3	1,07

Source : Auteur



Photo 20 : Conservation à l'immersion de l'éprouvette dans la chambre froide

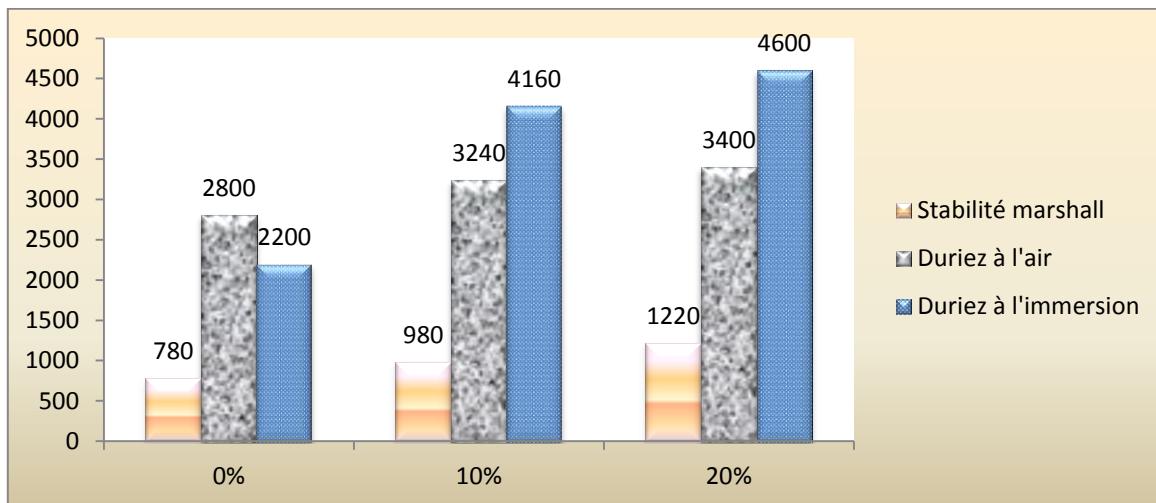


Fig 17 : Diagramme récapitulatif des essais expérimentaux

L'histogramme nous fait voir que la stabilité Marshall des mélanges est améliorée quelques soit la teneur en modifiant. La meilleure stabilité est obtenue avec 20% de modifiant.

Dans le cas de l'enrobé sans PEBD, la stabilité est de 780N. Alors que dans le cas de 10% de PEBD, l'amélioration est estimée à 980N. L'ajout de 20% de modifiant montre que la stabilité s'est encore améliorée, 1220N.

On constate aussi qu'une valeur plus grande de modifiant présente une plus grande résistance aux déformations permanentes.

Les résultats des essais Duriez indiquent que l'ajout à 20% de PEBD avec immersion présente les meilleures performances en termes de résistances à la compression à sec. Les calculs ont donné 2200N ; 4160N ; 4600N pour respectivement les cas de bitume sans modifiant, bitume modifié à 10% et bitume modifié à 20% de polymère.

V-3-2-d Rapport de stabilité

Après 7 jours de conservation, on mesure les stabilités des deux éprouvettes (à sec et avec immersion).

On a alors les rapports de stabilité :

- Résistance après immersion de 7 jours à 18°C : $R'c$
- Résistance après 7 jours à l'air à 18°C : rc
- Rapport de stabilité : $R'c/rc$



Tableau 38 : Rapport de stabilité des EB

Enrobé	Rapport de stabilité
Sans PEBD	0,75
Avec 10% de PEBD	1,28
Avec 20% de PEBD	1,35

Source : Auteur

Le rapport de stabilité ci-dessous, nous indique que le rapport : résistance après immersion R'_c / la résistance à sec R_c , évolue avec l'augmentation du pourcentage d'ajout de granulats plastiques qui sont très résistants et très flexibles. Et c'est à partir de 10% d'ajout de PEBD que les valeurs des résistances obtenues commencent à se stabiliser.

V-4 Domaines d'applications des couches bitumineuses

Le choix de revêtement est en fonction de sa destination. Cependant, la comparaison des codes couleurs doit pouvoir être nuancée en fonction du type de couche considérée.

V-4-1 Lexique

Ce lexique précise les applications pour lesquelles les codes couleurs ont été établis

Tableau 39 : Applications sur les différents enrobés

Aéroport	Ne concerne que le trafic lourd. Une distinction est faite entre les pistes, les taxiways et les aires de stationnement.
Aire de stockage	Essentiellement les aires de stockage, de manutention et de déchargement des zones portuaires et industrielles. Ne sont pas reprises ici les voiries attenantes.
Autoroute	Exclusivement les autoroutes et voies express (vitesse supérieure à 90km/h).
Carrefour	Carrefours et ronds-points où les efforts tangentiels sont importants. Le croisement de rues à faible trafic n'est pas repris ici (Voiries urbaines).
Parking	Aires de stationnement (y compris les voiries intégrées) pour véhicule de toutes catégories. Une distinction est faite entre trafic lourd et trafic léger (voitures).



Parking sur toiture	Parking sur toiture, sans isolation thermique, accessibles aux seuls véhicules légers.
Piste cyclable	Piste cyclables et voies réservées uniquement aux usagers légers motorisés.
Pont	Pont ou viaduc à tablier en béton dont l'épaisseur du revêtement est comprise entre 70 et 120 mm.
Terrain de sport	Tous types de terrain de sport (tennis, basket, etc.) et aires de jeux.
Virage dangereux	Virages où la vitesse non adaptée des véhicules peut entraîner des accidents.
Voie de tramway	Tous types de voies de roulement comprenant des voies de tramway.
Voie piétonne	Voiries piétonnes et trottoirs.
Voirie agricole	Voiries agricoles et forestières.
Voirie industrielle	Voiries industrielles, sites propres et arrêts de bus. Les sites propres réservés conjointement aux bus et tramways sont repris sous la dénomination « Tramways ».
Voirie locale	Routes de lotissements voies sans issue, route de village et toutes rues à faible trafic mises à part la voirie reprise sous la dénomination « Voirie agricole ».
Voirie rurale	Exclusivement les liaisons entre entités (vitesse généralement inférieure ou égale à 90 km/h) où une distinction est faite en fonction de l'importance du trafic (véhicule de charge > 3,5 t).
Voirie urbaine	Tous types de voiries urbaines (vitesse généralement ≤ 50 km/h), non comprises les voiries à faible trafic (Voirie locale). Une distinction est faite entre trafic lourd et important, trafic lourd et faible, et trafic léger et important (voirie non accessible aux bus et camions).

Source : Centre de recherches routières

V-4-2 Codes couleurs

Les codes couleurs expriment l'adéquation d'un enrobé à un domaine d'application particulier. Ils donnent également leur domaine d'emploi.



Les codes couleurs sont attribués aux produits bitumineux «standard», c'est-à-dire, aux produits les plus couramment utilisés. Ces caractéristiques apparaissent en gras dans la fiche correspondante suivante :

Tableau 40 : Code couleur

Numéro de fiche	Produit
101	Béton bitumineux BB-1B
102	Béton bitumineux clouté BB-2C
103	Béton bitumineux BB-4 (C,D)
104	Béton bitumineux BB-8 (D,E)
105	Splitmastixasphalt SMA (B,C,D)
106	Enrobé drainant ED-B, RMTO-C
107	Revêtement mince discontinu RMD (C,D)
108	Revêtement ultra mince grenu RUMG (C,D)
201	Enduit superficiel monocouche simple gravillonnage
202	Enduit superficiel monocouche double gravillonnage
203	Enduit superficiel bicouche
204	Enduit superficiel à haute performance ESHP
205	Revêtement bitumineux coulé à froid monocouche RBCF
206	Revêtement bitumineux coulé à froid bicouche RBCF
207	Enduit superficiel scellé par un RBCF
301	Asphalt coulé pour réparation localisée ou revêtement
302	Enrobé percolé
303	Béton bitumineux à module élevé BBME
401	béton bitumineux BB-3 (A,B,C,D)
402	Sable-bitume
403	Asphalt coulé pour chape d'étanchéité
404	Asphalt coulé pour chape de protection
405	Enrobé à module élevé EME/AVS
406	Enrobé stockable

Source : Centre de recherches routières



Certaines modifications de formulation (par exemple: remplacement d'un bitume routier par une bitume polymère) peuvent influencer cette codification. Cette possibilité est renseignée dans la fiche.

V-4-3 Remarque concernant les ponts

Le choix du type de revêtement de l'ouvrage d'art dépend principalement des épaisseurs (éventuellement variables) disponibles, compte tenu de la présence d'une étanchéité et de sa protection. Le revêtement est de préférence du même type que celui du revêtement adjacent.

V-4-4 Utilisation particulière

Dans le tableau des domaines d'utilisation des couches bitumineuses, lorsqu'une couche est notée «utilisation particulière», cela signifie que son utilisation diffère de celle des enrobés «courants» eu égard à sa composition et/ou à sa destination particulière.

PARTIE 3 : ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX



CHAPITRE VI : ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTALE

VI-1 Généralités

Pour satisfaire à diverses dispositions réglementaires, tout projet industriel doit désormais faire l'objet avant son lancement d'une EIE. Elle vise à dresser un bilan aussi complet que possible de toutes les conséquences du projet à chacun de ses stades (étude, développement, industrialisation, production, retrait ou démantèlement), en fonctionnement normal ou accidentel, sur tous les éléments de son environnement humain, industriel, socio-économique et naturel : personnel, population, air, eau, sols, faune, flore, installations, déchets, consommation énergétique, image de marque... La série des normes ISO 14000 donne aux entreprises un cadre pour contrôler la qualité environnementale de leurs activités. La nature des matériaux concernés et les procédés de mise en œuvre constituent une contribution importante à ces bilans.

Dans la majorité des pays, les déchets font l'objet d'une collecte organisée, et de plus en plus fréquemment après un pré-tri par l'émetteur.

Certains déchets comme le polyéthylène expansé, fréquemment souillé sont théoriquement recyclables, mais en réalité ne le sont pas. Ils prennent énormément de place pour un faible poids et leur brûlage sauvage est très polluant.

VI-2 Définitions

VI-2-1 Selon le dictionnaire robert

Ensemble des conditions naturelles et culturelles agissant sur les organismes vivants et les activités humaines.

VI-2-2 Selon H. SADAR

La terre, l'eau et l'air, y compris toutes les couches de l'atmosphère.

VI-2-3 Selon VAILLANT COURT

Environnement est un système organisé, dynamique et évolutif des facteurs naturels (physiques, chimiques, biologiques) et humains (économiques, politiques, sociaux, culturels) où les organismes vivants opèrent et où les activités humaines ont lieu, et qui ont de façon



directe ou indirecte, immédiatement ou à long terme, un effet ou une influence sur ces êtres vivants ou sur les activités humaines à un moment donné et dans une aire géographique définie.

VI-2-4 Selon la Charte des Environnements Malgache (CEM)

Environnement est l'ensemble des milieux naturels et artificiels, y compris les milieux humains et les facteurs sociaux et cultures qui intéressent le développement.

VI-2-5 Selon Mme Gro Harlem BRUNDTLANT (Premier Ministre Norvégien, 1987)

Environnement, c'est le mode de développement qui répond aux besoins du présent, sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

Cette dernière définition est considérée comme la meilleure, car elle ne se limite pas seulement à la protection de l'Environnement, mais vise aussi à l'épanouissement de l'être

VI-3 Problématiques et objectifs

VI-3-1 Problématiques

La prise en compte des problèmes environnementaux dans les projets de développement est énoncée dans les différentes constitutions et lois fondamentales des pays signataires du protocole de Kioto en 1997, et, effectivement appliqué en 2005. La considération des questions environnementales dans les projets de développement, comme conditions de certaines institutions financières et bailleurs de fonds pour leur participation au financement des projets, a été à la base de son application courante et du progrès des réglementations nationales en matière de gestion des projets.

Aborder cette étape importante, c'est la mise en œuvre pratique des propositions contenues dans les rapports d'études d'impacts et du suivi de ces impacts dans le court, moyen et long terme (respects de mesures pratiques au cours des travaux, remise en état des sites d'emprunts et bases de vie, reconstitutions des biotopes, écosystème et habitat perturbés, plantation d'arbres, mise en œuvre des mesures d'atténuations au profit des populations, etc.).



Dans bien des cas, ces études sont souvent archivées voire ignorées lors de l'exécution pratique du projet. L'EIE est-elle donc, une pure formalité de complément de dossier de financement et d'exécution ?

Et, quel est le bien-fondé de ces études dans les projets d'investissements pour des pays en voie de développement, et particulièrement, dans la phase de construction des infrastructures? Quelles sont les conditions pour y remédier face aux nouveaux enjeux de développement durable ? Tels sont les principaux questionnements que nous nous sommes posées, et que nous allons essayer d'apporter quelques réponses.

VI-3-2 Les ressources utilisées

Le projet s'est déroulé au laboratoire de LNTPB, relatif à la recherche d'une meilleure formulation de bitume modifié par du polymère, à obtenir une bonne formulation des granulats et à trouver une meilleure qualité de liant hydrocarboné.

Rappelons que, les liants utilisés lors de l'expérimentation proviennent du chantier de SMATP et destinés à la réhabilitation du Boulevard d'Ankorondrano, tandis que les granulats sont d'origine des carrières de Toamasina, et de chez SMTP Ambohibao pour les granulés de déchets plastiques.

- ✚ Ainsi, il est important de connaître les matières premières, additifs et matériaux utilisés (provenance, quantité, caractéristiques, entreposage, transport, etc.) ;
- ✚ Les ressources naturelles utilisées, renouvelables ou non, tels que les sols ou les ressources géologiques, les eaux (collecte, contrôle, dérivation, confinement), les bois et les ressources biologiques, etc.
- ✚ Les ressources humaines (mode de recrutement, main d'œuvre requise, nombre de personnel, qualification, hébergement (si nécessaire), mode d'approvisionnement sur les lieux de travail etc... ;
- ✚ Et, les besoins énergétiques, les types d'énergie utilisés et leur source.

VI-3-3 Description du milieu récepteur

La description du milieu récepteur est essentielle à l'analyse environnementale afin d'obtenir une connaissance adéquate des composantes du milieu d'insertion du projet.



Cette activité comprend la délimitation de la zone d'étude et la caractérisation des composantes pertinentes de l'environnement, telles qu'elles sont avant l'implantation du projet.

Le projet de recherche sur l'amélioration de bitume modifié à base de polymère, s'inscrit alors entièrement dans la Commune Urbaine d'Antananarivo, situé plutôt au nord-ouest du centre-ville, sur un axe, où circule plus de 1100 véhicules toutes les heures, et, beaucoup plus dans les heures de grandes affluences. Les embouteillages monstres durent des heures et causent la rupture des matériaux bitumineux voire la dégradation rapide de la chaussée. Cette route est bordée de Sociétés industrielles et commerciales des deux côtés, ce qui suppose un flux intense de camions poids-lourds de plus de 25 tonnes. Ainsi, la connaissance du milieu de travail permettra :

- ❖ D'avoir un aperçu de la situation initiale de la zone d'étude sur le plan écologique, socio-économique et culturel ;
- ❖ D'identifier à l'intérieur de la zone d'étude les composantes susceptibles d'être touchées par le projet, et en particulier les composantes qui sont à la source des préoccupations environnementales majeures définies lors de la présentation du contexte et de la justification du projet ;
- ❖ De mieux saisir les interactions entre les composantes du milieu physique et celles des milieux biologique et humain ;
- ❖ De mieux comprendre la dynamique des écosystèmes qui seront influencés par le projet ;
- ❖ De déterminer les potentiels aussi bien écologiques qu'économiques des composantes, afin de pouvoir exprimer les tendances observées en termes de leur intégrité et de cerner tous les effets directs ou indirects du projet.

VI-3-4 Contexte

Madagascar a une politique nationale pour le développement durable. Le transport occupe une place prépondérante à travers son Cadre Stratégique de Lutte contre la Pauvreté (CSLP).



Le Ministère des Travaux Publics assure la maîtrise d'ouvrage en matière de politique de désenclavement (définition des stratégies et programmes en matière d'infrastructures routières, suivi des études et contrôle de la mise en œuvre des projets) et entend accompagner efficacement cette volonté politique nationale en intégrant l'environnement dans les paramètres de dimensionnement et d'exploitation des routes.

Et, dans le cadre du programme sectoriel des transports (PST), tous les projets routiers font systématiquement l'objet d'une étude d'impacts sur l'environnement (EIE) qui précède la prise de décision pour la réalisation physique du projet. De même, au cours et aux termes du projet, la surveillance et le suivi environnemental sont prévus.

Il appartient alors au ministère de tutelle de définir les termes de références des études, de participer à la sélection des consultants pour l'étude, de suivre les études, d'examiner et adopter les rapports établis par les consultants et bureaux d'études, enfin, de transmettre les conclusions des études au ministre en charge de l'Environnement pour l'obtention d'un « avis de conformité environnementale du projet ».

Ces rapports comprennent l'étude d'impact, les mesures d'atténuations et le plan de gestion environnementale et social (PGES) de mise en œuvre du projet.

Cependant, le suivi de la mise en œuvre pratique de ces rapports sur le terrain rencontre d'énormes difficultés d'ordre réglementaire, technique, financier, logistique et organisationnel. Et, sans une pression de la part des partenaires financiers internationaux, les résultats de ces études ne seront pas appliqués et respectés.

VI-3-5 Objectifs

Parti de l'hypothèse principale que la route soit un outil de développement socio-économique, tout en prenant compte des aspects environnementaux, notre étude a pour objectifs :

- ✚ d'insister sur l'importance des EIE dans le cadre d'une politique de développement durable,
- ✚ d'identifier quelques paramètres pertinents à prendre en compte dans le cadre des EIE des projets routiers, afin d'améliorer la précision dans la prévision des impacts et l'efficacité des mesures d'atténuations,



⊕ de faire des propositions visant à améliorer l'intégration des aspects du développement durable, à assurer le suivi environnemental pendant et après l'exécution des projets routiers, à améliorer ainsi les méthodes de gestion environnementale et à perfectionner les futures évaluations des impacts des projets routiers afin d'inscrire les routes sous l'angle de la durabilité et donner à la route une meilleure image.

Ainsi, nous nous tenterons de poser les quelques questions suivantes:

Quelle relation existe-t-il entre amélioration des matériaux de construction de routes et développement durable?

Quelle est l'importance d'une étude d'impact environnemental dans le cadre d'un projet routier ? Quelles sont les difficultés liées à l'intégration des problèmes environnementaux en général et en particulier au suivi environnemental des projets routiers?

Quel est le niveau de participations des différents acteurs à l'intégration des questions environnementales dans le secteur routier (politique environnementale des entreprises de BTP, respect des cahiers de charges et recommandations des rapports d'EIE) ?

Bref, à notre avis, lorsqu'on parle de route ou de ses agrégats, le seul objectif prioritaire reste le renforcement des critères de durabilité :

La réduction du bruit, l'amélioration de la sécurité routière, la réduction de la consommation d'énergie, la valorisation des matières premières, ainsi que la protection des travailleurs contre les substances dangereuses...

VI-4 Résultats attendus

Aux termes de cette étude, nous pensons dans un avenir proche, pouvoir identifier les entraves à l'intégration efficace d'une politique environnementale dans la gestion des projets routiers, établir une analyse environnementale de projet routier et identifier les paramètres pertinents à prendre en compte dans une perspective de développement durable, faire des propositions concrètes à partir de nos analyses de la situation et d'une étude de faisabilité expérimentale, en vue de renforcer la politique en matière d'intégration des critères de développement durable aux paramètres de conception et de dimensionnement des infrastructures.



CHAPITRE VII : EVALUATION DES IMPACTS

VII-1 Dégradation des matières plastiques

La dégradation des matières plastiques est très lente aussi bien avec les UV, la chaleur et l'oxydation. Ce sont bien les trois facteurs les plus efficace.

Et en mettant en évidence la nécessité de plusieurs facteurs, par exemple : "l'humidité seule ne fait rien, les UV seuls ne font rien, mais humidité + UV dégradent.

Pour cela, la solution que nous proposons, c'est de créer un système reposant sur la technique de « Diagnostic Concerté », qui consiste à utiliser les atouts des enjeux locaux. Les collectivités doivent être intégrer dans la politique environnementale adoptée à l'échelon national. Elles doivent jouer un rôle déterminant dans l'éducation et la mobilisation des populations. Et, de les rappeler la réalité incontestable du changement climatique et de ses impacts, ainsi que l'épuisement à venir des ressources fossiles, car l'objectif est de permettre aux générations futures de disposer des ressources dont elles auront besoin pour leur développement.

VII-2 Milieu physique

VII-2-1 Impacts sur l'air

Les sources de rejets atmosphériques sont :

- ✓ le four
- ✓ l'évaporateur.
- ✓ Le stockage des granulats
- ✓ Les fumées des engins et véhicules lourds des chantiers...

Les principaux composantes chimiques des émissions polluantes sont le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes de soufre (SO_x), les oxydes d'azote (NO_x).

Les pollutions de l'air engendrées sont les poussières et les fumées émises par l'usine de traitement du bitume ainsi que les entreposages des granulats, mais aussi les fumées dégagées par les échappements des engins et des véhicules en circulation.



Pollution de l'air

La qualité de l'air est caractérisée par le taux de dispersion de certains éléments polluants dans l'atmosphère.

Tableau 41 : Normes OMS

	Monoxyde de carbones (CO)	Nitrate et nitrite de carbone (NO _x)	Dioxyde de soufre (SO ₂)	Particules en suspension de diamètre inférieur à 10µm
Exposition de courte durée	30mg/m ³ pour une exposition d'une heure	0,2mg/m ³ pour une exposition d'une heure	0,35mg/m ³ pour une exposition d'une heure	
Exposition de longue durée	10mg/m ³ pour une exposition moyenne de 8h/jour	Moyenne annuelle de 0,04 – 0,05mg/m ³	0,05mg/m ³ pour une moyenne annuelle	0,07mg/m ³ pour une exposition moyenne de 24 heures

Le dépassement de la norme de dispersion de monoxyde de carbone constitue les principales sources de maladies respiratoires, de céphalées et de vertige. Un taux de dispersion élevé d'oxyde de carbone pourrait être lié avec la forte proportion de maladies respiratoires, comme l'asthme, les infections bronchiques et pulmonaires, l'irritation des yeux et de la peau.

D'autre part, l'air est pollué principalement par l'émission de fumée résultant de l'incendie des gaz, par les mauvaises odeurs, l'émission de CO₂ et les pluies acides provoquées par l'évaporation des gaz et des huiles. Le raffinage du pétrole entraîne le rejet de plusieurs polluants atmosphériques, dont les oxydes de soufre, les oxydes d'azote, les composés organiques volatils, le monoxyde de carbone et le benzène, de même que de nombreux gaz à effet de serre (GES).

Lors de l'extraction des sables bitumineux, la tourbière est un immense réservoir de CO₂: 15 à 30 % du carbone stockés dans les sols se trouveraient dans les tourbières.

L'impact environnemental le plus inquiétant du pétrole est effectivement cette émission de dioxyde de carbone résultant de sa combustion comme carburant.



Sur un autre tableau, le transport routier contribue aussi pour beaucoup à la pollution de l'air, du fait que les camions et les véhicules à tracteur roulent au pétrole : la consommation moyenne d'un poids lourd-citerne émet 79g de CO₂ par tonne transportée et par kilomètre parcouru, sachant qu'un camion transporte entre 10 et 22 tonnes de pétrole, soit pour 22 tonnes 1738 g de CO₂ libérés par kilomètre. En outre, les accidents des camions citerne, fréquents, sont fatals.

L'exploitation de pétrole est donc également facteur de changements climatiques, favorisés par l'émission de gaz à effet de serre.

Tableau 42 : Concentration des véhicules à Antananarivo-ville

Lieu	Concentration			Valeur guide en PM ₁₀	Caractéristique de la zone
	PM _{2,5}	PM _{2,5-10}	PM ₁₀		
Avaradoha	38	6	44		A surveiller
Soarano	85	19	104		Saturée
Ampasamadinika	48	21	69		Latente
Ambohidahy	62	18	80	70	Saturée
Route digue	27	14	41		A surveiller
Akorondrano	60	20	74		Saturée

Source : Madagascar-INSTN, 2011

VII-2-2 Impacts sur les ressources en eau

Les déchets solides qui sont constitués par la silice et le refus de tamisage seront exposés aux pluies et pourront être sources de pollution des eaux souterraines. L'eau est une ressource vitale pour les hommes, les plantes et les animaux. C'est aussi une ressource collective qu'il faut partager. Toute activité en un point donné a toujours des répercussions sur les habitants et l'environnement en aval.

Pollution des eaux

L'impact de cette activité sur les masses d'eau (rivières, lacs, eaux souterraines) va dans deux sens: soit il est dû à la pollution engendrée par les déchets des opérations, soit il résulte de l'interruption de leur cours.



La pollution des masses d'eau à grande échelle débute lors du forage exploratoire, lorsqu'une grande quantité de polluants sont générés, dont des résidus. Ces déchets, qui sont parfois radioactifs ou sont constitués d'autres substances polluantes, sont déversés dans des bassins. Là les rejoignent les boues de forage auxquelles on a ajouté des produits chimiques polluants.

Les eaux usées s'évaporent en surface et les polluants se tassent au fond, polluant les sols, les rivières, et contaminant les plantes dont se nourrissent les animaux. Les aliments deviennent mauvais et déclenchent des cancers, des attaques cardiaques et des tumeurs du foie.

Pour le cas, particulier, de l'axe routier d'Ankorondrano, la majorité des eaux usées domestiques des agglomérations environnantes sont évacuées par les canaux collectifs longeant les bas-côtés du boulevard. Certains usagers non branchés aux réseaux collectifs utilisent des fosses septiques ou des puisards pour leurs eaux usées -cas des immeubles et lotissements...- Ces réseaux d'évacuation acheminent les effluents vers les égouts collectifs qui aboutissent vers les eaux surfaciques les plus proches. Certains milieux récepteurs tels que les marais ou les rizières ne constituent que des lieux de transit car les eaux finiront toujours par rejoindre les eaux surfaciques.

Le problème qui se pose est que les égouts de cette zone se datent des années 60 et n'ont subi des quelconques réparations depuis tous ce temps. En conséquence, des fuites d'eau au niveau de ces caniveaux s'incrustent sous la chaussée et créent des décollements de bitumes.

L'incidence de la pollution de l'eau ont augmenté d'une manière exponentielle, du fait de la croissance démographique et de l'expansion de l'activité économique de la zone. Un réel assainissement serait obligatoire pour protéger le boulevard qui venait d'être réhabilité.

Tableau 43 : Répartition de la population selon le type de logement occupé

Ville	Appartement	Studio	Chambre	Maison individuelle (type traditionnel)	Villa moderne	Autres	Total
Antananarivo	5,4	5,5	24,9	56,8	3,6	3,8	100,0
Grand centre urbain	12	1,6	10,6	70,4	4,2	1,1	100,0
Commune urbaine secondaire	4,1	0,4	6,3	86,4	1,4	1,4	100,0

Source : INSTAT/DSM/EPM-2011



VII-2-3 Impacts sur le sol et sous-sol

L'acidification NO₂ a un effet dans le sol et dans l'eau. Les effets sont la diminution du PH, une baisse de la teneur en nutriments et l'augmentation de la teneur en élément potentiellement toxique.

Les déchets solides constituent une source de pollution du sol dans la mesure où des restes de produits chimiques peuvent persister dans ces rejets.

Les impacts typiques générés sur le sol comprennent : l'érosion due aux activités de construction, la pollution pétrolière provenant des boues de forage et des effluents, la déforestation, la perte de sols et la destruction de terres destinées à l'agriculture.

La pollution pétrolière du sol peut produire l'étouffement des racines réduisant la vigueur de la plante et dans de nombreux cas, allant jusqu'à entraîner sa mort.

Lorsque les polluants atteignent des zones cultivées, on enregistre des pertes de récoltes étant donné que beaucoup de plantes cultivées meurent au contact du pétrole brut. La productivité de la culture baisse, ce qui entraîne de sérieuses conséquences pour l'économie des propriétaires de ces terres.

Il est à souligner que les risques vis-à-vis des ressources en eau et des sols sont essentiellement liés :

- Aux installations de chantier : risques de pollution par rejet directs d'eau de lavage, d'eaux usées...
- Aux risques de pollution par mauvaises gestion de déchets.
- Aux produits polluants susceptibles d'être manipulés ou stockés sur des aires annexes, hydrocarbures, peintures ...
- Aux incidents de chantier, lors de l'approvisionnement en hydrocarbure, en cas de fuites des moteurs des machines et appareils divers ;

VII-2-4 Bruits et vibration

Une usine de fabrication de bitume est par nature, une activité bruyante. On distingue le bruit lié au chantier lui-même sur le site et une zone périphérique et le bruit lié aux transports de chantier.

Sur le site, le bruit provient notamment des véhicules utilitaires, du fonctionnement des moteurs, des engins chargés du dépôt de matériaux, des pompes électrogènes... Les



niveaux sonores engendrés par le chantier peuvent atteindre des niveaux élevés, de l'ordre de 80 à 90 décibels-dB- à moins de 20 mètres.

L'impact est d'autant plus important que le chantier se situe à proximité de la zone d'habitation.

A l'échelle du périmètre du projet, l'impact des nuisances sonores produites restera limité compte-tenu du fait qu'un chantier est par nature une activité temporaire.

VII-3 Milieu biologique

Les pollutions de l'air, du sol et de l'eau peuvent entraîner des problèmes pour le milieu biologique environnant. C'est pour cela qu'il faut constamment chercher des solutions pour le résoudre. Notre cas consiste à la recherche de la valorisation biologique à partir de la valorisation des déchets plastiques. Donc il est nécessaire de pousser les recherches relatives à l'exploitation des déchets plastiques biodégradables. Actuellement, les techniques utilisées ont recours au procédé : pour qu'une dégradation soit complète, le polymère doit être introduit dans un compost qui lui apporte la bonne quantité de dioxygène et d'humidité.

Cette dégradation peut avoir lieu aussi par photolyse, on parle alors de photo dégradation.

VII-4 Milieu humain

- ❖ L'installation de l'usine va provoquer le bouleversement des conditions de vie de la population alentour pouvant entraîner des conflits sociaux entre eux.
- ❖ La cuisson du grès peut provoquer des effets néfastes sur la santé des ouvriers.
- ❖ Les bruits émis lors de la cuisson, le broyage, le tamisage, les odeurs lors de dégagement et l'extraction peuvent perturber la population environnementale.
- ❖ L'émission des Gaz à Effet de Serre comme CO₂ peut provoquer la toxicité, des effets cancérogène, les effets allergènes, les irritations de la peau, de la muqueuse, des yeux, etc.).



VII-5 Milieu socio-économique

Tableau 44 : Source d'impact socio-économique

MILIEU	SOURCES D'IMPACTS	IMPACTS POSSIBLES
MILIEU HUMAIN	<ul style="list-style-type: none">- Matériels à moteurs d'exploitation ;- Tir de mine ;- Poussière et déchets chimiques ;- Augmentation de la population	<ul style="list-style-type: none">- Perturbation de l'équilibre économique existant ;- Prolifération des maladies- Emission des bruits et de vibration gênant la population ;- Pollution de l'air et dégradation des qualités des eaux par la contamination des déchets.
INFRASTRUCTURES	<ul style="list-style-type: none">- Vibrations évoquées par le tir et le fonctionnement des matériels d'exploitation ;	<ul style="list-style-type: none">- Déstabilisation des infrastructures et risque de dégâts aux constructions voisines ;

VII-6 Analyse de cycle de vie

VII-6-1 Pétrole

Le cycle de vie comprend toutes les étapes couvertent la naissance jusqu'à la mort d'un produit.

La figure ci-dessous montre le cycle de vie du pétrole :

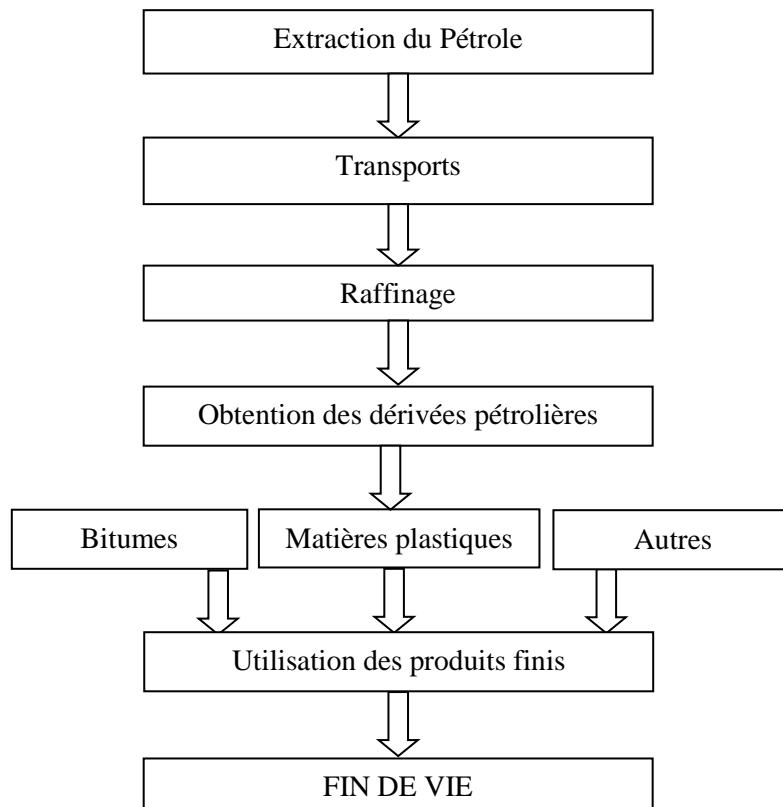


Fig 18 : Cycle de vie du pétrole

VII-6-2 Liant hydrocarboné

Le revêtement routier est obtenu par la cuisson du bitume.

Dans ce cas, il nous faut une combustion qui nécessite des combustibles.

Durant toutes les opérations :

- Dégagement de CO₂
- Dégagement de N₂O₅ après le dégagement d'eau

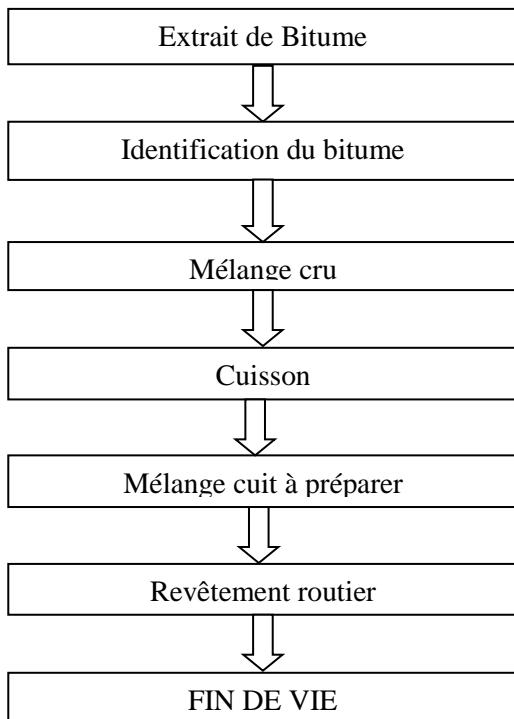


Fig 19 : Cycle de vie du liant hydrocarboné

VII-6-3 Mélange matière plastique - liant hydrocarboné

Notre cas étudie l'amélioration d'un revêtement routier à base d'additif des déchets plastiques.

Le cycle de vie de ce mélange est représenté par la figure ci-dessous :

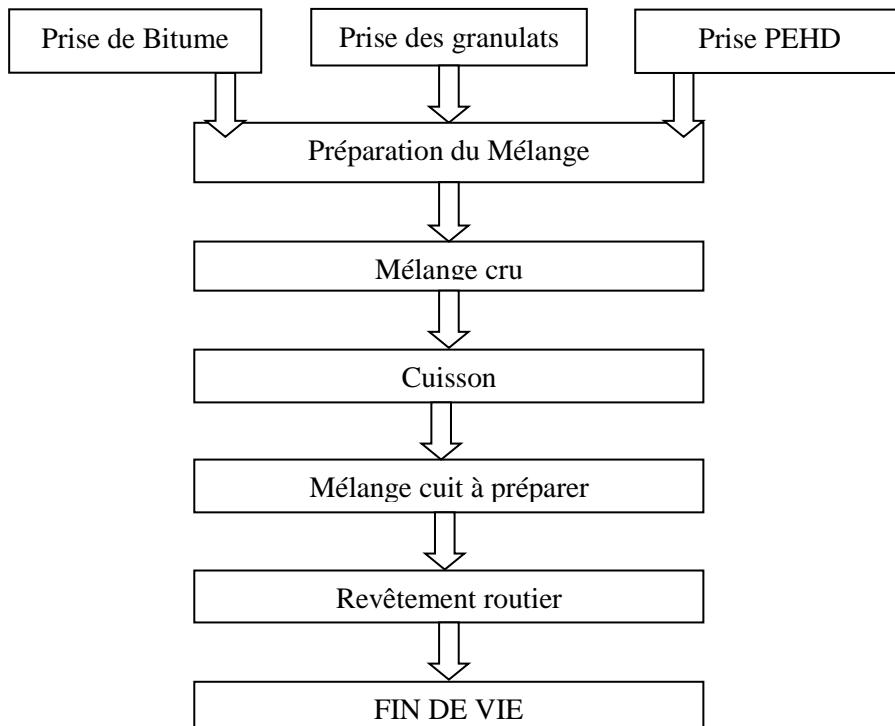


Fig 20 : Cycle de vie du mélange liant-polymère

CHAPITRE VIII : EVALUATION DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les principes du développement durable s'inscrivent dans l'équilibre de trois piliers schématisés comme suit :

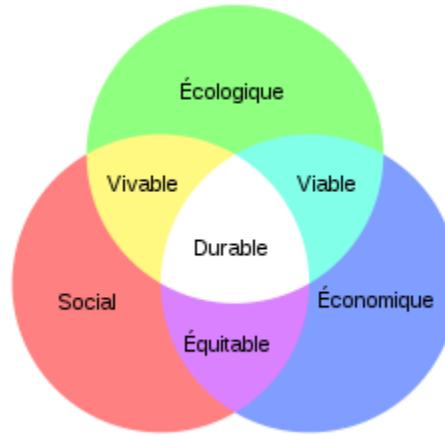


Fig 21 : Principes du développement durable

Pour être durable, le développement doit être à la fois social, économique et environnemental : un pilier économique garantissant l'objectif de croissance et de rentabilité, un pilier social répondant à des objectifs d'équité et de cohésion sociale, et, un pilier environnemental permettant la survie des espèces, la conservation et la gestion des ressources, ainsi que la limitation des dégradations.

Dans le cadre des dispositions légales et réglementaires, l'Office National pour l'Environnement, en collaboration avec le Ministère chargé de l'Environnement et les Ministères sectoriels concernés, élaborent les directives techniques en matière d'environnement.

L'objectif de cette directive est de fournir à tout initiateur de projet, un canevas général indiquant la nature, la portée et l'étendue de l'étude d'impact sur l'environnement qu'ils doivent réaliser. Elle pose les principes d'une démarche explicite et homogène visant à fournir les informations nécessaires à l'évaluation environnementale desdits projets par les instances compétentes, et à la prise de décision par les autorités gouvernementales concernées quant à leur autorisation.



VIII-1 La croissance économique durable

La théorie économique durable, c'est d'identifier la quantité et la qualité du capital physique et humain, ainsi que le degré technologique du pays, comme facteurs déclencheurs de la croissance économique.

Il est donc aisément de constater les retards qu'exhibe Madagascar dans ce domaine :

- son indice de développement humain est parmi les plus faibles, 145 sur 185 pays,
- son taux d'utilisation de l'internet s'élève péniblement à 6 pour 1000 habitants,
- son réseau routier reste le moins développé, la densité de routes revêtues est de 9,7km par millier de kilomètre carré, comparé à 31km en Afrique Subsaharienne.

Inverser ces tendances ne suffit pas. L'instauration des principes de bonnes gouvernances, le renforcement des institutions ainsi que la relance des recherches technologiques, sont des conditions nécessaires pour que la durabilité soit pérenne.

Pour être efficace la relance doit alors se focaliser sur les points faibles structurels et se baser sur ses atouts, tout en assurant la mise en place d'un contexte adéquat à la croissance :

VIII-1-1 Mise en place des conditions

- ▶ Des institutions qui assurent le respect des droits de propriété et une optimisation optimale des produits de recyclage, bonne gouvernance.
- ▶ ouverture économique qui encourage les transferts technologiques et de l'eau.

VIII-1-2 Exploitation des points forts

- ▶ Diversité environnementale, atout pour le développement d'activité à haute valeur ajoutée, comme la production de matériaux et de liants bitumineux, des textiles...
- ▶ Les gisements miniers et pétroliers.
- ▶ L'agriculture.
- ▶ La main d'œuvre locale.

VIII-1-3 Exploitation des points faibles

- ▶ L'isolement et le manque de connectivité.
- ▶ Le retard en matière de développement humain.

- ▶ Les déficits en matière d'énergie et de gestion de compétences.
- ▶ Exposition particulière aux risques naturels.

Ainsi, les projets doivent toujours viser une augmentation durable du bien-être social.

VIII-2 Développement social durable

Le développement social de Madagascar doit s'appuyer sur une main d'œuvre locale disponible et compétitive au niveau des salaires. Elle constitue un élément clé à l'essor des activités industriels et des services, notamment les technologies simples qui ont servi de base à l'industrialisation des pays émergents.

L'exemple du textile, une activité fortement intense en travail, montre que Madagascar peut attirer de nouveaux investisseurs de tous horizons.

Le développement du secteur routier et de construction reste aussi le moteur de croissance dans les secteurs intensifs en main d'œuvre.

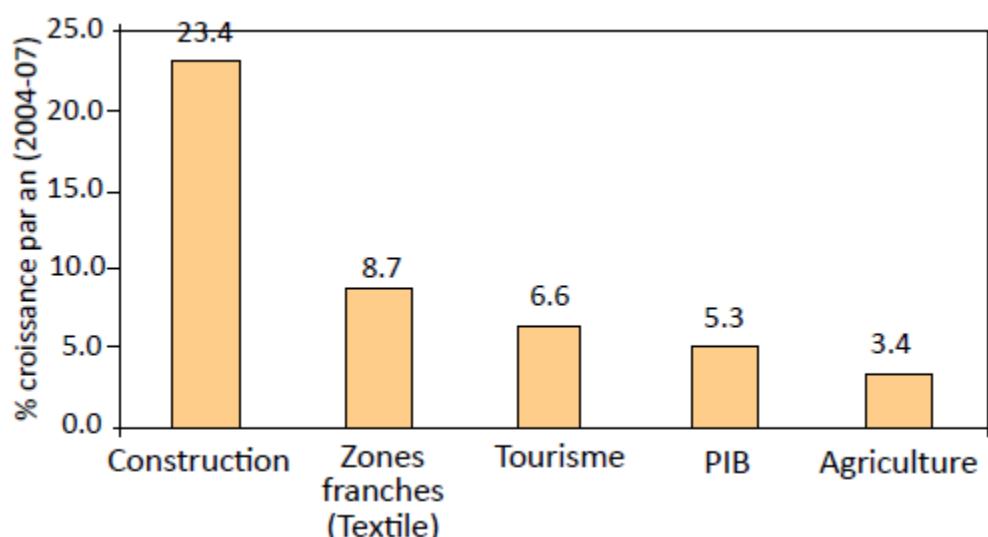


Fig 22 : Moteurs de croissance : les secteurs intensifs de main d'œuvre

Cependant, il n'existe pas encore de stratégie de l'emploi inclusive à Madagascar. Les autorités réagissent ponctuellement aux pressions sociales et économiques, avec par exemple, des effets d'annonce concernant les travaux publics à haute intensité de main



d'œuvre ou encore le recrutement des maîtres FRAM dans la fonction public qui ne dispose qu'un nombre très limité de postes budgétaires.

Cette défaillance nuit à l'émergence d'un emploi décent, et contribue à l'émergence de tensions entre minorité de privilégiés, qui ont un travail décent et rémunérateur, et tous les autres.

Des enquêtes auprès des ménages rappellent que le maintien du pouvoir d'achat par un emploi stable et rémunérateur demeure leur première priorité, bien avant l'aide publique ou l'accès à des biens sociaux.

Pour un ménage démunie, l'accès à l'éducation n'a de sens que si celui-ci lui permet de mieux vivre, c'est-à-dire d'obtenir un meilleur emploi et un salaire intéressant.

Quelques solutions peuvent être proposées :

- améliorer le climat des affaires en attirant les investisseurs,
- faciliter l'accès aux crédits et à l'information pour les PMI et PME, ce qui pourrait se traduire par la création d'emploi,
- encourager la formation professionnelle,
- améliorer les réglementations du travail.

VIII-3 Développement Environnemental durable

Le capital naturel de Madagascar, qui comprend les forêts, aires protégées, terres agricoles, ressources halieutiques et minières, représente pour l'instant l'essentiel de la richesse du pays, plus de 50%, sans même tenir compte des ressources minières.

De plus Madagascar dispose de source d'eau et de potentiel hydroélectrique majeur. Or ces atouts sont mal gérés, et les déficits en matière d'énergie, d'accès en eau potable et l'assainissement sont criants. Il paraît difficile de projeter le développement économique et social harmonieux d'un pays sans accès à des sources d'énergie et à une bonne gestion des ressources aquatiques.

Les ressources minérales, bien qu'encore mal connues, constituent un autre point non négligeable. L'installation de deux grands projets miniers est sur le point de modifier le panorama du secteur. QMM et Sherritt représentent à eux seul plus de 3 milliards US\$ d'investissements, soit l'équivalent de presque la moitié du revenu national.



Les potentiels d'exploitation existent, notamment dans le secteur pétrolier, où de nombreuses compagnies internationales sont en phase d'exploration et de prospection.

Les dirigeants du pays doivent cependant rester vigilants de manière à s'assurer que les revenus générés par toutes ces activités ne deviennent pas une tentation pour les opérateurs et les politiciens, aggravant ainsi les risques de détournement et de mauvaises utilisations.

Pour le moment, d'une part, le développement de Madagascar repose sur la gestion efficace et prudente du capital naturel dont il dispose, afin qu'il puisse être efficacement transformé en capital productif et humain, et appuyer un développement durable.

D'autre part, Madagascar doit éviter le syndrome de la « malédiction des ressources naturelles » c'est-à-dire :

- ✓ la surdépendance de l'économie aux exportations des ressources naturelles, notamment les ressources naturelles et pétrole en particulier, traduisant par une grande vulnérabilité aux risques de changes et à la volatilité des prix,
- ✓ la vente des matières premières crée une dynamique de captation des rentes, donnant lieu à des luttes déstabilisantes. Par exemple, les ventes de « Bois de Roses » génèrent de la corruption d'un niveau inimaginable, et financent des activités illicites.
- ✓ le syndrome hollandais : l'appréciation de la monnaie locale, suite à l'entrée massive de devises, nuit à la compétitivité des autres secteurs d'exportation.

VIII-4 Mesure d'atténuation et de prévention de risque et danger

Les risques associés à la déforestation et au changement climatique accroissent l'incidence des catastrophes. Les experts nationaux et internationaux en environnement prévoient en effet une augmentation de la variabilité de la précipitation, entraînant une augmentation de l'intensité des inondations et des sécheresses, ainsi qu'une augmentation de la fréquence et de l'intensité des cyclones, dans les années à venir.

Cependant, Madagascar ne dispose pas encore de politique d'adaptation digne de ce nom, et continue à intervenir sur le mode de l'urgence après les cataclysmes, cyclones, sécheresses... il n'y a pas non plus d'institutions avec les capacités et les ressources



nécessaires pour préparer et mettre en œuvre les programmes, ni d'ailleurs une prise de conscience du public sur les enjeux du changement climatiques pour le pays.

Une stratégie adaptée doit surtout être adopté, et qui aurait un caractère préventif et réparateur pour les groupes et zones vulnérables, à travers :

- le renforcement du système d'alerte précoce,
- l'identification des zones non constructibles ou impropre, du fait des dangers associés à l'érosion et à l'inondation,
- l'adoption des normes anticycloniques dans la construction d'infrastructures,
- la décentralisation de fonds d'entretien,
- la construction d'ouvrage de prévention de petites envergures et les mesures d'urgences.

Ces mesures concernent les enjeux nationaux d'une possible croissance durable. Mais, d'autres mesures devraient aussi être respectées, et plus particulièrement, par les industries de transformations et extractives.

- Milieu physique : il faut mettre en place un système de dépôt des déchets solides pour les ressources en eau et le sol.
- Milieu biologique : mise en place de bassin de stockage de l'eau usée
- Milieu humain : utilisation d'une masque anti-poussière et une casque antibruit
- Suivi des santé des ouvriers
- Mettre en place un Plan d'Opération Interne (POI) et un Plan d'Urgence(PU)
- L'usine doit être implantée loin des habitations de la population. (odeur du bitume et plastiques)
- L'exploitation doit avoir une politique de déplantation et de reboisement afin d'absorber le CO₂.
- Il faut mettre en place un système de récupération du gaz nitrique et recyclage de l'acide nitrique.
- Pour le personnel de l'usine, toutes les protections corporelles nécessaires doivent être effectuées : les casques, les gants, les blouses, les bottes.



CONCLUSION

L'utilisation de bitume en technique routière a imposé à ce matériau issu du pétrole, un strict contrôle de ses propriétés. Pour se faire, des recherches scientifiques ont été faites et se font toujours afin de trouver une meilleure formule pour avoir un bitume qui soit performant dans toutes les conditions de trafic et de climat, faisant appel à la modification du bitume par ajout de polymère et aux choix pertinents du squelette granulaire.

Ce travail s'est concentré à modifier un bitume semi-dur de classe 60/70, provenant de l'Entreprise SMATP et destiné à la réhabilitation du Boulevard d'Ankorondrano, en utilisant le Polyéthylène à Basse Densité de chez Société Malgache de Transformation de Plastiques, comme additif, à des teneurs qui varient de 10% à 20% du poids du bitume pur. Le bitume pur a été testé à la mesure de sa densité, aux essais de pénétrabilité, à la méthode Bille – Anneau, aux essais de perte à la chaleur.

Les granulats de classes différentes ont subi divers analyses et traitements : dimensionnement, tamisage, essai d'usure, essai d'aplatissement, identification des caractéristiques des résidus : densité apparente et poids spécifiques du sable de carrière et de granits.

L'additif a été identifié. La densité est de 0,94 ; la température de fusion à 200°C ; et la température critique de dégradation à 240 degré C.

Ensuite dans la Partie Mise en œuvre, nous avons effectué le mélange, Bitume Pur-Granulat-PEBD, au Laboratoire du LNTPB. Nous avons cherché à optimiser la formulation granulaire et la formulation du mélange de l'enrobé. Aussi, le mélange d'enrobé 0/14 à chaud a été retenu car, inscrit dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi-grenu, fig. n°13, il respecte parfaitement les recommandations de SMATP. Des essais mécaniques, essais Marshall, et, essais Duriez faisant ressortir un rapport de résistance en compression avec et sans immersion à l'eau des éprouvettes, ont été entrepris pour connaître la stabilité, la compacité, le fluage et les coefficients de stabilité.

A la lumière des résultats et observations issus de la présente étude, nous pouvons conclure que la modification change les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux. La pénétrabilité diminue, le point de ramollissement augmente par l'ajout de PEBD. Les degrés d'influence varient en fonction de la nature et de la quantité de modifiant ajouté. Avec un



bitume modifié avec du polymère, on pourra éviter le phénomène d'orniérage qui se manifeste à une température de plus de 50°C, à laquelle le bitume devient mou. La masse volumique déterminée à une température de 25°C pour les bitumes modifiés, augmente légèrement par rapport au bitume de base, ceci est dû à la formation de produits carbonés. Mais, l'insolubilité du polymère dans le bitume peut parfois poser problème, donc pour éviter la séparation entre grains de polymère et bitume, il serait nécessaires d'utiliser un polymère et du sable de granulométrie plus fine. Ce type de bitume modifié diminue la susceptibilité thermique, améliore les caractéristiques visco-élastiques et la rhéologie de l'enrobé, possède des propriétés cohésives supérieures à celles des bitumes purs, augmente la résistance au désenrobage de la chaussée, bref accroît la durée de vie.

Cependant, la technique d'Essai Marshall a une limite. Cet Essai permet uniquement d'établir une distinction entre des enrobés ayant de très mauvaises performances et des enrobés ayant de très bonnes performances. L'Essai ne convient convenablement pas à l'étude de l'influence du type de liant sur la résistance à l'orniérage. Aussi, le procédé d'Essais au simulateur de Trafic devra être, prochainement, utilisé au Laboratoire de contrôle, en complément d'analyse.

Enfin pour le Développement Durable, nous avons essayé d'avoir une approche de durabilité de l'Environnement. Les priorités de durabilité ont été concentrées sur les changements climatiques et la qualité de l'air ; le maintien de la qualité de l'eau et sa disponibilité ; la protection sociale et de la nature, sans oublier que pour être durable il faudra s'appuyer sur les trois piliers de développement : social, économique et environnemental. Le recyclage des déchets plastiques (496,28 kg carbone/tonne), comme additif de matériaux, contribuera à faire diminuer de moitié (250kg carbone/tonne), la valeur d'émission de carbone, source ADEME. Et, «*tous projets, toutes décisions tant publiques que privées, seront désormais, arbitrés en intégrant leur coût pour le climat*», N. Sarkozy.



BIBLIOGRAPHIE

[1] Nouveau traité de matériaux de construction,

M. DURIEZ, J. ARRAMBIDE, Tome II DUNOD

[2] Liants routiers enrobés

M. DURIEZ, J. ARRAMBIDE, DUNOD

[3] Normes Française

NFT 66-004

NFT 66-005

NFT 66-008

[4] Modes opératoires : CEBTP-Division Matériaux Bitumineux-LNTPB

[5] Manuel du Laboratoire Routier : PELTIER DUNOD

[6] International journal pavement Research and Asphalt Technologie

[7] Bergeron, G., et M. Routhier. Suivi de performance de la route 117, Sbaretti, Turquetti.

[8] Dossier : 0117-07-050(31)96 Direction du laboratoire des chaussées, ministère des Transports, Québec, mars 2007.

[9] Ministère des Transports. Info DLC, vol. 3, no 10, octobre 1998 Direction du laboratoire des chaussées, Québec, mai 1995.

[10] Xavier Chavannes, La production des champs pétroliers, Laboratoire Environnement et Développement, Uni. D. Diderot, Paris.



WEBOGRAPHIE

- [1] www.wikipedia.htm
- [2] www.bank-pdf.fr
- [3] www.bitumequebec.ca
- [4] www.innovdays-plasturgie.com
- [5] www.lagrandepoubelle.com
- [6] www.tempusmagrheb.org
- [7] www.metaline.de
- [8] www.sciencedirect.com
- [9] www.lecarbone.com
- [10] www.zookeeper.fr
- [11] www.usirf.com
- [12] www.CommentCaMarche.net



ANNEXE 1 : Rappel normatif

I- Les normes

- Depuis 1990, 53 normes européennes sont établies
- Toutes sont publiées en tant que normes françaises NF EN.
- Au 1er mars 2008, l'ensemble des normes NF EN se substituera, pour celles qui traitent du même sujet, aux normes françaises en vigueur (qui seront retirées).

3 types de normes sur les « Mélanges Bitumineux »:

- 8 normes « produit » : Spécification des matériaux
- 43 normes « essais » : Méthodes d'essais pour mélange hydrocarboné à chaud
- 2 normes plus directement liées au marquage CE

➔ Les normes « produits » NF EN

Chaque norme est décomposée en deux parties :

- Un avant-propos National (APN) : il rappelle l'obligation de marquage CE et indique les caractéristiques qu'il est proposé de retenir en France.
- La norme européenne elle-même traduite en français présente :
 - Le domaine d'application de la norme
 - Les spécifications des matériaux
 - Les spécifications du mélange
 - L'évaluation de la conformité
 - L'identification du mélange

La norme européenne liste les caractéristiques qu'il est possible de retenir dans la spécification du produit. Contrairement aux anciennes normes françaises, elle ne détermine pas de classe de mélange basée sur des performances.

➔ Les normes « essais » NF EN

43 normes décomposées en deux parties :

- Un avant-propos National (APN)
- La norme européenne elle-même traduite en français décrit l'essai concerné :



Principe,
Appareil,
Mode opératoire,
Calcul,
Répétabilité...

Il existe une bonne correspondance avec les anciennes normes d'essai française.

II- Les documents

II-1 Les documents d'accompagnement existant

- Guides
 - Le GANE (1994): à réviser (RRN)
 - Le GAN (STBA, 2003): en révision
 - Le Guide »variantes »(2003): à réviser (RRN)
- Les autres documents
 - Fascicule 27 du CCTG: à réviser...
 - CCTP, CCAP, BP-types: des exemples en circulation; à adapter au cas par cas; le RST a la compétence.

II-2 Les documents d'accompagnement NOUVEAU

II-1-a Le GUN : Guide d'utilisation des normes

Les documents : le gun

- _ Document à caractère général
- _ Traduit les « anciens » produits selon les normes NF EN
- _ Explique les approches empiriques et la performance
- _ Fournit les caractéristiques minimales des granulats selon NF EN 13042 et XP P

18 545

- _ Rappelle les spécifications sur agrégats d'enrobés

Utilisation, classe et type

Appellation française	Appellation européenne	Utilisation	Classe	Type
BBSG	EB Ø roul liant	Couche de roulement	1, 2 ou 3	0/10 ou 0/14
BBSG	EB Ø liai liant	Couche de liaison	1, 2 ou 3	0/10 ou 0/14
BBME	EB Ø roul liant	Couche de roulement	1, 2 ou 3	0/10 ou 0/14
BBME	EB Ø liai liant	Couche de liaison	1, 2 ou 3	0/10 ou 0/14
BBCS	EB Ø roul liant	Couche de roulement	Pas de classe	0/10 ou 0/14
BBCS	EB Ø liai liant	Couche de liaison	Pas de classe	0/10 ou 0/14
BBA	EB Ø roul liant	Couche de roulement	1, 2 ou 3	C ou D et 0/10 ou 0/14
BBA	EB Ø liai liant	Couche de liaison	1, 2 ou 3	C ou D et 0/10 ou 0/14
BBM	EB Ø roul liant	Couche de roulement	1, 2 ou 3	A, B ou C et 0/10 ou 0/14
BBM	EB Ø liai liant	Couche de liaison	1, 2 ou 3	A, B ou C et 0/10 ou 0/14
BBTM	BBTM Ø classe liant	Couche de roulement	1 ou 2	0/6 ou 0/10
BBD _r	BBD _r Ø liant	Couche de roulement	1 ou 2	0/6 ou 0/10
GB	EB Ø assise liant	Couche de base	2, 3 ou 4	0/14 ou 0/20
GB	EB Ø assise liant	Couche de fondation	2, 3 ou 4	0/14 ou 0/20
EME	EB Ø assise liant	Couche de base	1 ou 2	0/10, 0/14 ou 0/20
EME	EB Ø assise liant	Couche de fondation	1 ou 2	0/10, 0/14 ou 0/20

II-2-b La norme 98 150-1 : exécution des assises de chaussés, couche de liaison et couche de roulement

- Constituants
- Formulation
- Fabrication
- Transport
- Mise en œuvre
- Contrôle sur chantier

II-3-c La note d'info n°17, décembre 2008

- _ Informe les Maîtres de l'ouvrage et les Maîtres d'œuvres des changements réglementaires
- _ Propose des modalités pratiques et recommandations
- _ Précise les contrôles de fabrication dans le cadre d'un marché



ANNEXE 2 : Autres types de liants bitumineux

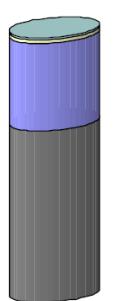
Dans les chaussées, on emploie habituellement, en plus du bitume, deux autres sortes de liants bitumineux qui servent généralement de liant d'accrochage: les émulsions de bitume (émulsions bitumineuses) et les bitumes fluidifiés.

I- Les émulsions bitumineuses (Norme 4105)

Les émulsions bitumineuses sont un mélange de bitume et d'eau liés grâce à la présence d'un agent émulsifiant (savon). Lorsqu'elles sont exposées à l'air, l'eau s'évapore et laisse le bitume qui durcit et sèche en place. Selon la vitesse de séchage (appelée aussi rupture) de l'émulsion, on trouvera les appellations:

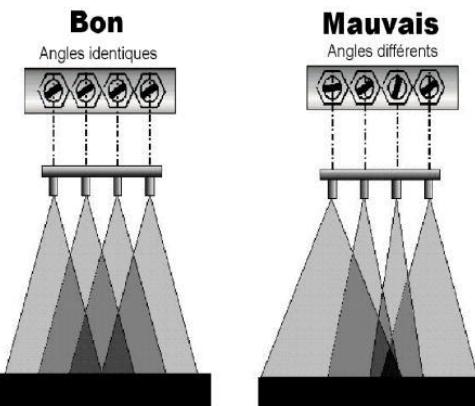
- RS (Rapid Setting) pour rupture rapide;
- MS (Medium setting) pour rupture moyenne;
- SS (Slow setting) pour rupture lente.

Les émulsions bitumineuses comprennent: les émulsions anioniques (charge des particules solubles dans l'eau est-), les émulsions cationiques (charge des particules solubles dans l'eau est+) identifiées par la lettre C et les émulsions à flottabilité élevée (HF). Les émulsions bitumineuses sont utilisées pour les mélanges bitumineux préparés en usine et posés à froid c'est à dire à la température ambiante. Elles servent aussi pour les mélanges préparés sur place et pour le recyclage de vieux pavage, les amorces de revêtement, les traitements de surface et les couches de scellement et exclusivement comme liants d'accrochage.



■ Base / Acide
■ Emulsifiant
■ Eau
■ Bitume

- Bitume : 55 à 70 %
- Eau : 30 à 45 %
- Emulsifiant : 0,2 à 3 %
- Base ou acide selon le type d'émulsion : < 1 %
- Solvant ou fluxant si nécessaire : < 6 %



Selon la norme 4105 du MTQ, la classification des émulsions comprend:

– Émulsions anioniques :

- à rupture rapide (RS);
- à rupture moyenne (MS);
- à rupture lente (SS).

– Émulsions anioniques à flottabilité élevée (HF) :

- à rupture rapide (HFRS);
- à rupture moyenne (HFMS);

– Émulsions cationiques :

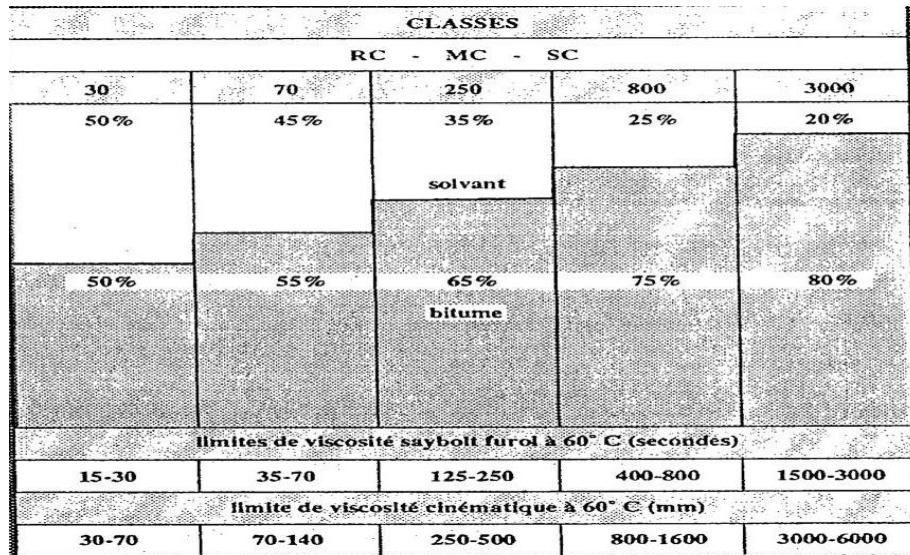
- à rupture rapide (CRS);
- à rupture moyenne (CMS);
- à rupture lente (CSS).

II- Les bitumes fluidifiés norme 4104



Les bitumes fluidifiés sont surtout employés pour les mélanges bitumineux de réparation de pavage. On peut les fabriquer en usine ou sur place. On les pose à froid, c'est à dire à la température ambiante. Ils ont comme avantage de ne pas être affectés par le gel, on peut donc les utiliser en hiver ou en période de gel.

Chacune de ces catégories de vitesses de séchage se subdivise ensuite selon la proportion de solvant employé ou de la viscosité cinématique à 60°C en 5 sous classes.



Source : Cours enrobés ETS

Les chiffres de chacune des classes désignent le degré de viscosité minimal du bitume.

Les types de liant d'accrochage

TYPE DE LIANT	PÉRIODE D'APPLICATION RECOMMANDÉE	REMARQUES
À RUPTURE LENTE (SS OU CSS)	Été	La vitesse de mûrissement des émulsions à rupture lente est fortement influencée par les conditions météorologiques. Ce type d'émulsion est stable dans le temps et est plus facilement manipulable.
À RUPTURE RAPIDE (RS OU CRS)	Printemps, été et automne	Lorsque les conditions sont défavorables, (manque d'ensoleillement et T° < 20 °C), des rupteurs peuvent être utilisés pour accélérer le mûrissement ³ .
BITUMES FLUIDIFIÉS	Entre le 1er octobre et le 1er mai ⁴	Il faut s'assurer que le mûrissement est complété lorsqu'il y a risque de gel sur une chaussée de plus d'un an. Il faut éviter que les enrobés sous-jacent soient endommagés par certains solvants présents dans le bitume fluidifié.

Source : Cours enrobés ETS



ANNEXE 3 Choix des Liants, additifs, granulats possible

I- Choix des liants

En règle générale, le bitume routier constitue la sélection de base pour le liant des revêtements des chaussées souples. Toutefois, pour des conditions particulières de trafic, de chargement, de mise en œuvre, d'esthétique, de sécurité ou de climat, il peut s'avérer nécessaire de s'orienter vers un autre type de liant. Le tableau ci-dessous est consacré uniquement aux liants prêts à l'emploi destinés à être utilisés tels quels pour la fabrication des enrobés ou à la réalisation des traitements superficiels. Il présente une définition des différents liants, leurs propriétés, leur domaine d'application et les produits concernés en vue d'aider au choix de la solution la plus appropriée en fonction de chaque cas.



Type	Définition	Propriétés	Domaines d'application	Produits concernés
Bitume routier	Produit obtenu par distillation d'un pétrole brut bien choisi et répondant à la norme NBN EN 12591 (réf. 54).	Ce sont des bitumes conventionnels qui se différencient par leur pénétration, notamment 35/50, 50/70 et 70/100.	Tous.	Tous.
Bitume élastomère (bitume polymère ⁽¹⁾)	Mélange stable et homogène de bitume routier et d'élastomère(s) (par exemple SBS).	<ul style="list-style-type: none"> - Faible susceptibilité thermique; - amélioration possible du comportement à froid; - résistance élevée aux déformations aux hautes températures de service; - adhésivité élevée entre le liant et les granulats ce qui confère une résistance élevée au plumage; - à éviter en cas de mise en œuvre manuelle de l'enrobé. 	Revêtements soumis à un trafic lourd et/ou à des efforts tangentiels importants.	ED, SMA, BB-1, RMD, RMTO, BB-3 (pour certaines applications), enduits superficiels et RBCF.
Bitume plastomère (bitume polymère ⁽¹⁾)	Mélange stable et homogène de bitume routier et de plastomère(s) (par exemple EVA, polyéthylène).	<ul style="list-style-type: none"> - Faible susceptibilité thermique; - résistance élevée aux déformations aux hautes températures de service; - à éviter en cas de mise en œuvre manuelle de l'enrobé. 	Revêtements soumis à trafic lourd.	SMA, RMD, BB-1, BB-3 (pour certaines applications) et AC.
Bitume à indice de pénétration positif (IP+)	Bitume chimiquement modifié en raffinerie.	<ul style="list-style-type: none"> - Très faible susceptibilité thermique; - résistance élevée aux déformations aux hautes températures de service; - diminue le risque de post-compactage; - à éviter en cas de mise en œuvre manuelle de l'enrobé. 	Revêtements soumis à trafic lourd.	Couches de roulement en SMA et BB-1 et BB-3 (pour certaines applications).
Bitume dur (10/20 ou 15/25)	Bitume distillé de certains pétroles bruts et traité en raffinerie pour obtenir une très haute rigidité (NBN EN 13924, réf. 62).	<ul style="list-style-type: none"> - Rigidité très élevée, ce qui confère une résistance élevée aux déformations; - sensible à la fissuration aux basses températures de service; - enrobés difficiles à mettre en œuvre manuellement. 	Revêtements soumis à un trafic lourd.	EME ou BB-3.
Bitume pigmentable	Bitume conventionnel contenant moins d'asphaltènes que les bitumes routiers, ayant des affinités avec certains pigments.	Liant pigmentable pour le rouge (oxyde de fer) et le vert (oxyde de chrome). Les teintes obtenues sont ternes et évoluent dans le temps. Le pourcentage de pigment nécessaire est élevé (2 à 3 fois plus que pour les liants synthétiques pigmentables).	Revêtements colorés de pistes cyclables, zones piétonnes, terrains de sports et voiries locales.	Tous.
Bitume fluidifié	Liant composé de bitume routier ou polymère fluidifié par l'ajout de solvants de pétrole plus ou moins volatiles.	Le bitume et le solvant utilisés définissent les propriétés du bitume fluidifié, à savoir la viscosité du bitume résiduel, la stabilité au stockage, la vitesse de maturation et l'adhésivité entre le bitume résiduel et les granulats. Il permet une production et une mise en œuvre à une température peu élevée.	Tous les domaines d'application des enduits superficiels et enrobés stockables.	Enduits superficiels et enrobés stockables.

(1) Les bitumes élastomères et plastomères sont repris sous la dénomination «bitumes polymères» dans la normalisation européenne NBN EN 14023



Type	Définition	Propriétés	Domaines d'application	Produits concernés
Emulsion de bitume	Dispersion de bitume dans l'eau avec adjonction d'un agent tensio-actif ou émulsifiant et, parfois, d'un fluxant. La proportion bitume-eau est de environ 60/40.	Le bitume et l'émulsifiant utilisés et la proportion de bitume dans l'eau définissent les propriétés de l'émulsion, à savoir la viscosité du bitume résiduel, la stabilité au stockage, la vitesse de rupture et l'adhésivité entre le bitume résiduel et les granulats. Elle permet une production et une mise en œuvre à température ambiante.	Tous.	Couches d'accrochage, RBCF, graves-émulsion, enduits superficiels, enrobés stockables et enrobés à froid.
Liant synthétique pigmentable	Liant translucide ne contenant pas d'asphaltènes.	Liant pigmentable pour toutes les couleurs.	Revêtements colorés de pistes cyclables, zones piétonnes, terrains de sports, voiries urbaines à trafic léger et important et voiries locales.	Tous.
Liant synthétique pigmentable modifié par des polymères	Mélange stable et homogène d'un liant synthétique pigmentable et de polymères.	Liant pigmentable pour toutes les couleurs; à utiliser pour des sollicitations importantes.	Revêtements colorés pour revêtement de voirie urbaine à trafic lourd et faible et, dans certains cas, de pistes cyclables.	Tous.
Résine à plusieurs composants	Liant synthétique contenant une ou plusieurs résines.	- Risque de fissuration élevé; - excellente adhésivité liant-granulats et excellente adhérence au support; - excellente résistance au plumage.	Domaines d'application des ESHP.	ESHP.

Note: Le goudron et les bitumes élastomères recyclés ne sont plus utilisés pour des raisons environnementales et/ou de santé et/ou économiques.

Les asphalte de Trinidad ne peuvent plus être utilisés dans la production des enrobés en Wallonie à cause de leur odeur.

II- Choix des additifs

Les additifs s'ajoutent dans le malaxeur lors de la fabrication du mélange constituant l'enrobé.

Ils visent à modifier les caractéristiques du liant (polyoléfines, Gilsonite) ou du mélange (fibres).

Le tableau suivant présente une définition des différents additifs, leurs propriétés, leur domaine d'application et les produits concernés en vue d'aider au choix de la solution la plus appropriée en fonction de chaque cas.



Type	Définition	Propriétés	Domaines d'application	Produits concernés
Fibres de cellulose	Fibres obtenues par traitement des déchets de bois ou de papier.	Inhibiteur d'écoulement. L'addition des fibres de cellulose permet d'accroître la teneur en liant en évitant la ségrégation du mélange hydrocarboné pendant le transport et la mise en œuvre.	Tous.	Certains SMA, RMD, ED et RMTO. Elles peuvent être ajoutées également dans certains BB et dans le sable-bitume.
Polyoléfines	Fibres synthétiques obtenues à partir de polymères hydrocarbonés.	Résistance élevée aux déformations aux hautes températures de service.	Revêtements soumis à de fortes sollicitations.	BB-1, SMA, RMD et BB-3.
Uintate (Gilsonite)	Matériau (bitume) pur, noir et brillant originaire du bassin Uintah dans l'est de l'Utah (USA).	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance élevée aux déformations aux hautes températures de service; - maniabilité élevée; - sensible à la fissuration aux basses températures de service. 	Revêtements soumis à de fortes sollicitations.	BB-1, SMA, AC et BB-3.
Granulés d'EVA ⁽¹⁾	Plastomère fourni sous forme de granulés.	<ul style="list-style-type: none"> - Faible susceptibilité thermique; - résistance élevée aux déformations aux hautes températures de service; - à éviter en cas de mise en œuvre manuelle de l'enrobé. 	Revêtements soumis à trafic lourd.	SMA, RMD, BB-1, BB-3 (pour certaines applications) et AC.

(1) Les granulés d'EVA sont en règle générale (sauf dans l'asphalte coulé) seulement utilisés dans de petites quantités, lors de la préparation d'enrobé modifié. En raison de problèmes éventuels de compatibilité lors du mélange de ces granulés avec le bitume de base, il est préférable d'utiliser des bitumes aux polymères prêts à l'emploi lors de travaux importants.

III- Choix des granulats

Le type de granulats à utiliser ne doit donc pas être précisé davantage au niveau du projet sachant que ces matériaux seront le cas échéant adaptés au type de couche, d'enrobé ou de traitement superficiel. A titre d'exemple, la pierre calcaire se voit généralement exclue des couches de roulement alors qu'elle convient parfaitement pour les couches de liaison, les granulats de débris bitumineux conviennent pour les couches de liaison mais sont interdites dans certaines couches de roulement, l'enduit superficiel à haute performance (ESHP) exige l'emploi de bauxite calcinée, etc. Toutefois, en cas d'enrobé coloré, des exigences spécifiques (couleur) peuvent être imposées en complément.

Le choix du calibre maximal des granulats d'un enrobé (et autres produits assimilés) est fonction de divers paramètres, notamment l'emplacement de la couche dans la structure (couche de liaison ou couche de roulement) et de son domaine d'application.

Une fois déterminés le type et l'épaisseur des diverses couches constitutives du revêtement, il est possible de choisir le calibre maximal de chacune d'entre elles. Il est recommandé d'utiliser un calibre maximum (D) compris entre 0,25 à 0,50 fois l'épaisseur de la couche, sauf pour les couches d'épaisseur inférieure à 2 cm.

III-1 Résistance au glissement

Lors du choix du calibre maximal, il faut tenir compte de:

- la vitesse d'utilisation de la route considérée;
- l'environnement de la route.

Pour caractériser la rugosité des différents revêtements, on mesure la rugosité à faible vitesse (directement influencée par la micro texture) et la diminution de celle-ci à des vitesses plus élevées (moins sensible pour la forte macro texture).

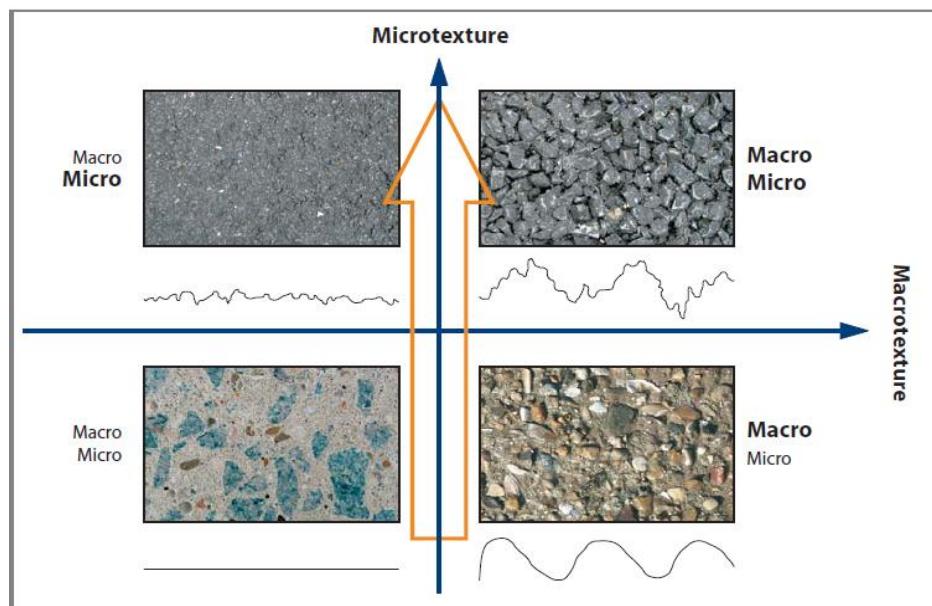


Figure : Illustration des diverses textures participants à la rugosité d'un revêtement

Si le mélange contient des parts égales de sable et de pierres, on peut dire que la rugosité initiale est déterminée par le nombre de points de contacts possibles entre le pneu et le revêtement. Un mélange à base d'un calibre plus fin peut obtenir de meilleurs résultats qu'un mélange plus grossier, mais il présente une diminution plus importante de la rugosité à mesure que la vitesse augmente. C'est pourquoi:

- on choisit pour les routes en milieu urbain, où l'on ne peut rouler à plus de 50 km/h, une macro texture fine (qui cause également moins de nuisances sonores);
- on recommande pour les routes hors milieu urbain (vitesses allant jusqu'à 90 km/h ou plus) une texture plus grossière de telle manière que la diminution de la rugosité reste minimale.



III-2 Bruit de roulement

Pour conclure, on peut dire que parmi des mélanges identiques, c'est le mélange qui a le calibre maximal le plus petit qui sera le moins bruyant, tous les autres paramètres restant par ailleurs identiques.

III-3 Drainabilité superficielle

La drainabilité superficielle dépend essentiellement de la macro texture du revêtement. Plus celle-ci est importante, meilleure est la drainabilité. Pour un même type d'enrobé, la macro texture est fonction du calibre des granulats: plus le calibre est gros, plus la macro texture est élevée.

III-4 Confort

En vue d'augmenter le confort (et la sécurité) des piétons et des cyclistes, notamment en cas de chute, il est souhaitable de s'orienter vers des granularités plus fines.

III-5 Esthétique

La texture de la couche et le calibre des granulats influencent l'esthétique du revêtement. L'esthétique est souvent liée à l'homogénéité d'aspect du revêtement. Pour un même type de produit, plus le calibre est fin, il a le meilleur esthétique.



ANNEXE 4 : Essais normaux sur mélanges hydrocarbonés à chaud

NF P 98 – 251 – 1

★ JOUR J

- A chaud : Fabrication de 12 éprouvettes cylindriques si $D < 14$ mm, 10 éprouvettes si $D \geq 14$ mm.
- A froid : respectivement 14 et 12 éprouvettes cylindriques et selon deux modalités.

★ JOUR J + 1

- Démoulage.
- Détermination de la masse des éprouvettes.
- Maturation : conservation pendant 7 jours à 18°C entre 40% et 70% d'humidité
- Mesure de la hauteur et du diamètre moyens des éprouvettes ; calcul de leur masse volumique apparente géométrique : MVa
- Répartition des éprouvettes cylindriques en lots homogènes :
 - _ Eprouvettes de la modalité 2 mises de côté (à froid) : elles serviront à un calcul de la MVa supplémentaire et comparatif.
 - _ 2 éprouvettes destinées à la mesure de la masse volumique apparente hydrostatique
 - _ 5 éprouvettes si $D \leq 14$ mm (4 éprouvettes si $D \geq 14$ mm) destinées à la conservation sans immersion
 - _ Eprouvettes restantes destinées à la conservation en immersion
- Mesure de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique, notée MVa (NF P 98-250-6) si le pourcentage de vides $v\% < 15\%$.
- Si $v\% \geq 15\%$, la masse volumique apparente prise en compte = MVa.

★ JOUR J + 1

- Dégazage des éprouvettes destinées à être immergées

★ JOUR J +1 à J +8

- Conservation dans l'eau à 18°C des éprouvettes destinées à la conservation en immersion.
- Conservation à 18°C et 50% d'humidité (entre 40% et 70% à froid) des éprouvettes destinées à la conservation sans immersion.

**★ JOUR J +8**

- Essai de compression simple :
- Pesée des éprouvettes immergées.
- Mesure de la résistance en compression à l'air R .
- Mesure de la résistance en compression à l'eau r .
- Calcul :
 - du rapport des deux compressions : r/R qui traduit la résistance au désenrobage de l'enrobé
 - de la masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette
 - du pourcentage de vides occupés par l'air et le liant
 - du pourcentage de vides comblés par le liant
 - de la teneur en eau au démoulage
 - de la teneur en eau après 7 jours de maturation
 - de la teneur en eau après 7 jours de maturation et 7 jours de conservation à sec
 - de la teneur en eau après 7 jours de maturation et 7 jours de conservation en immersion



ANNEXE 5 : LA LOI DE L'ENVIRONNEMENT

I- Charte de l'Environnement

Conformément à l'article 10 de la loi N° 90-033 du 21 décembre 1990 portant Charte de l'Environnement Malagasy et ses modificatifs, les projets d'investissements publics ou privés susceptibles de porter atteinte à l'environnement doivent faire l'objet d'une étude d'impact environnemental (EIE).

II- Décret MECIE

En application de cet article 10 de la Charte, le décret MECIE n°99-954 du 15 décembre 1999, modifié par le décret n° 2004-167 du 03 février 2004, fixe les règles et les procédures à suivre par les promoteurs pour la mise en œuvre d'une EIE. Ce décret définit entre autres le champ d'application des études d'impact, les projets devant être évalués, le processus à suivre, le contenu de l'étude, la procédure d'évaluation et la participation du public à l'évaluation. L'étude d'impact du promoteur doit satisfaire les exigences du décret et le projet sera évalué selon les règles qui y sont préétablies.

III- Législation en vigueur

Le promoteur a pour obligation de satisfaire aux exigences de législations et de réglementations en vigueur à Madagascar pour tous les domaines où ces dernières existent et qui touchent les différents aspects du projet.



TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES	II
LISTE DES TABLEAUX	III
LISTE DES PHOTOS.....	V
LISTE DES ABREVIATIONS	VI
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	
I-1 DEFINITION.....	3
I-2 HISTORIQUE	3
I-3 GISEMENTS DE BITUMES.....	4
I-4 PROCEDEE DE FABRICATION	4
I-5 STRUCTURE COLLOÏDALE DES BITUMES	5
I-6 DIAGRAMME TERNAIRE DE REPRESENTATION DES BITUMES	5
I-7 PROPRIETES MECANIQUES DU BITUME.....	6
II-1 UTILISATION	8
II-2 TYPOLOGIE	8
II-2-1 Bitume naturel	8
II-2-1-a Bitume naturel d'extraction de carrière	8
II-2-1-b Bitume brut dérivé du pétrole.....	9
II-2-2 Bitume fluidifié Selon la Norme 4104.....	9
II-2-3 Bitume fluxé	9
II-3 STRUCTURE PHYSICO-CHIMIQUE.....	10
II-4 CLASSIFICATION	11
II-5 PROPRIETES INTERESSANTES DES BITUMES	14
III-1 HISTORIQUE	15
III-2 LA NATURE DES MONOMERES.....	15
III-3 POLYMERES THERMOPLASTIQUES ET THERMODURCISSABLES	15
III-4 CLASSIFICATION	16
III-5 LES PROPRIETES DES MATIERES PLASTIQUES	16
III-5-1 Propriétés physiques	16
III-5-2 Propriétés chimiques	17
III-6 DIFFERENTS TYPES DE PLASTIQUE	17
III-6-1 Les principaux polymères issus de la polyaddition	17
III-6-2 Les principaux polymères issus de la polycondensation.....	19
III-7 DIFFERENTS TYPES DE DECHETS PLASTIQUES	21
III-7-1 Définition.....	21
III-7-2 Types de déchets	22
PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES	
IV-1 IDENTIFICATION DU BITUME	24
IV-1-1 Mesure de la densité du bitume.....	24
IV-1-1-a Appareillage	24
IV-1-1-b Principe	24
IV-1-2 Pénétrabilité à l'aiguille	26
IV-1-2-a Définition	26
IV-1-2-b Principe de la méthode	26
IV-1-2-c Appareillage	26
IV-1-2-d Préparation de la prise d'essai	28
IV-1-2-e Exécution de l'essai	28
IV-1-2-f Expression des résultats.....	29



IV-1-3 Méthode Bille-anneau.....	30
IV-1-3-a Introduction	30
IV-1-3-b Définition	30
IV-1-3-c Principe.....	30
IV-1-3-d Appareillage	30
IV-1-3-e Préparation de L'échantillon.....	32
IV-1-3-f Exécution de l'essai.....	32
IV-1-3-g Expression des résultats.....	32
IV-1-4 Perte à la chaleur.....	33
IV-1-4-a Définition	33
IV-1-4-b Principe	33
IV-1-4-c Appareillage	33
IV-1-4-d Préparation de l'échantillon.....	33
IV-1-4-e Exécution de l'essai	34
IV-1-4-f Expression des résultats.....	34
IV-2 ANALYSE DES GRANULATS.....	34
IV-2-1 Les granulats.....	34
IV-2-1-a Dimensions des granulats	34
IV-2-1-b Traitements des granulats	35
IV-2-2 Tamisage.....	35
IV-2-2-a Sable sec 0/6	35
IV-2-2-b Gravillon 6/10	36
IV-2-2-c Gravillon 10/14.....	37
IV-2-3 Essai d'usure des granulats.....	37
IV-2-3-a Essai LOS ANGELES	37
IV-2-3-b Essai Micro-Deval	38
IV-2-3-c Coefficient d'aplatissement.....	39
IV-3 CARACTERISTIQUES DES RESIDUS.....	40
IV-3-1 Densité apparente	40
IV-3-1-a Sable de carrière 0/6	41
IV-3-1-b Granite rose 6/10	41
IV-3-1-c Granite rose 10/14	41
IV-3-2 Poids spécifiques	42
IV-3-2-a Sable de carrière 0/6	42
IV-3-2-b Granite rose 6/10	42
IV-3-2-c Granite rose 10/14	43
IV-4 IDENTIFICATION DE L'ADDITIF	43
V-1 LES CHAUSSEES	45
V-1-1 Généralités sur les chaussées.....	45
V-1-1-a Structures.....	45
V-1-1-b Types de chaussées	46
V-1-2 Les dégradations des chaussées	46
V-1-2-a Conditions d'observation	46
V-1-2-b Fissuration thermique	47
V-2 LES ENROBES BITUMINEUX.....	48
V-2-1 Définition des enrobés bitumineux simples	48
II-2-2 Enrobés bitumineux à base d'additifs polymères.....	49
V-2-3 Formulation des mélanges enrobés bitumineux 0/14 à chaud.....	49
V-2-3-a Caractéristiques des enrobés	49
V-2-3-b Résultats de la granulométrie	50
V-2-3-c Calcul du teneur en liants	54
V-3 ESSAIS DE PERFORMANCES MECANIQUES	56
V-3-1 Essai Marshall	56
V-3-1-a Principe de la méthode Marshall	56
V-3-1-b Confection de l'éprouvette	57
V-3-1-c Stabilité de l'enrobé bitumineux	57
V-3-1-d Fluage de l'enrobé bitumineux	58
V-3-1-e Caractéristiques de l'enrobé à chaud 0/14 selon le principe Marshall	59
V-3-2 Essai Duriez	60
V-3-2-a Principe de la méthode Duriez	60
V-3-2-b Confection de l'éprouvette	60



V-3-2-c Caractéristiques de l'enrobé à chaud 0/14 selon le principe Duriez	61
V-3-1-d Compacité de l'enrobé bitumineux.....	61
V-3-2-d Rapport de stabilité.....	64
V-4 DOMAINES D'APPLICATIONS DES COUCHES BITUMINEUSES	65
V-4-1 Lexique	65
V-4-2 Codes couleurs	66
V-4-3 Remarque concernant les ponts	68
V-4-4 Utilisation particulière	68
PARTIE 3 : ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX	
VI-1 GENERALITES	69
VI-2 DEFINITIONS.....	69
VI-2-1 Selon le dictionnaire robert.....	69
VI-2-2 Selon H. SADAR	69
VI-2-3 Selon VAILLANT COURT.....	69
VI-2-4 Selon la Charte des Environnements Malgache (CEM)	70
VI-2-5 Selon Mme Gro Harlem BRUNDTLANT (Premier Ministre Norvégien, 1987).....	70
VI-3 PROBLEMATIQUES ET OBJECTIFS	70
VI-3-1 Problématiques	70
VI-3-2 Les ressources utilisées	71
VI-3-3 Description du milieu récepteur.....	71
VI-3-4 Contexte	72
VI-3-5 Objectifs	73
VI-4 RESULTATS ATTENDUS	74
VII-1 DEGRADATION DES MATIERES PLASTIQUES.....	75
VII-2 MILIEU PHYSIQUE	75
VII-2-1 Impacts sur l'air	75
VII-2-2 Impacts sur les ressources en eau.....	77
VII-2-3 Impacts sur le sol et sous-sol.....	79
VII-2-4 Bruits et vibration	79
VII-3 MILIEU BIOLOGIQUE.....	80
VII-4 MILIEU HUMAIN.....	80
VII-5 MILIEU SOCIO-ECONOMIQUE	81
VII-6 ANALYSE DE CYCLE DE VIE	81
VII-6-1 Pétrole	81
VII-6-2 Liant hydrocarboné	82
VII-6-3 Mélange matière plastique - liant hydrocarboné	83
VIII-1 LA CROISSANCE ECONOMIQUE DURABLE	85
VIII-1-1 Mise en place des conditions	85
VIII-1-2 Exploitation des points forts	85
VIII-1-3 Exploitation des points faibles	85
VIII-2 DEVELOPPEMENT SOCIAL DURABLE.....	86
VIII-3 DEVELOPPEMENT ENVIRONNEMENTAL DURABLE.....	87
VIII-4 MESURE D'ATTENUATION ET DE PREVENTION DE RISQUE ET DANGER.....	88
CONCLUSION.....	90
BIBLIOGRAPHIE	A
WEBOGRAPHIE.....	B
ANNEXE 1 : RAPPEL NORMATIF	C
ANNEXE 2 : AUTRES TYPES DE LIANTS BITUMINEUX.....	F
ANNEXE 3 CHOIX DES LIANTS, ADDITIFS, GRANULATS POSSIBLE	I
ANNEXE 4 : ESSAIS NORMAUX SUR MELANGES HYDROCARBONES A CHAUD.....	O
ANNEXE 5 : LA LOI DE L'ENVIRONNEMENT	Q

Auteur: Zo Idealy ANDRIANJAFIMANANA

Tél : 034 06 313 68

Titre : « CONTRIBUITION A L'ETUDE DE L'AMELIORATION D'UN BITUME PAR ADDITIF POLYMERIQUE ».

Nombre des pages : 90

Nombre des figures : 22

Nombre des tableaux : 44

Nombre des photos : 18

RESUME

Ce travail porte sur la modification du bitume par ajout de déchets plastiques, particulièrement par du Polyéthylène à Basse Densité. Pour rencontrer cet objectif, nous avons élaboré une stratégie d'étude s'appuyant sur des données obtenues à l'aide d'expérimentation en Laboratoire et soutenus par des Ingénieurs et Techniciens du LNTPB. Les travaux réalisés ont permis d'identifier les causes les plus probables des phénomènes de dégradations précoces des chaussées. Ainsi, les résultats obtenus nous permet de conclure que la modification du bitume avec un bon dosage de granulat par un certain pourcentage d'additif de PEBD, améliore la cohésion, diminue la susceptibilité thermique, augmente les capacités d'allongement, améliore les caractéristiques viscoélastiques, donne une meilleure résistance au désenrobage des chaussées, bref, avoir des routes à longue durée de vie. Tels ont été les points focaux de notre étude.

ABSTRACT

This work is about the modification of the asphalt by addition of plastic garbage, especially by the Polyethylene to Low Density. To meet this objective, we elaborated a strategy of survey leaning on data gotten with the help of experimentation in Laboratory and sustained by Engineers and Technicians of the LNTPB. The achieved works permitted to identify the likeliest reasons of the phenomena of precocious deteriorations of the pavements. Thus, the gotten results allow us to conclude that the modification of the asphalt with a good dosage of granulated by a certain percentage of additive of PEBD, improve the cohesion, decrease the thermal touchiness, increase the capacities of elongation, improve the characteristic viscoelastic, give a better resistance to the discoating of the pavements, brief, to have some roads to long life span. Such were the focal points of our survey.

Rubrique: Matériaux

Mots clés: Performance mécaniques, Enrobés Bitumineux, Polymère

Directeur de mémoire: Dr Michel RANARIVELO