



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

.....
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA

.....
Mention Génie Civil

Parcours Matériaux Minéraux



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme MASTER

Titre Ingénieur en Génie Civil

**AMÉLIORATION DES
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES
DES ENROBÉS BITUMINEUX PAR DES
FILLERS MINÉRALES DE LA REGION
VAKINANKARATRA**



Présenté par : Mademoiselle HANTANIRINA Dolie Nilsene

Soutenu le : 31 Août 2021

Encadreurs : Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy

Docteur RANDRIAMALALA Tina Richard

Promotion : 2020



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
D'ANTSIRABE-VAKINANKARATRA



Mention Génie Civil

Parcours Matériaux Minéraux

**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme MASTER
Titre Ingénieur en Génie Civil**

**AMÉLIORATION DES CARACTÉRISTIQUES
MÉCANIQUES DES ENROBÉS BITUMINEUX
PAR DES FILLERS MINÉRALES DE LA
REGION VAKINANKARATRA**

Présenté par : Mademoiselle HANTANIRINA Dolie Nilsene

Soutenu le : 31 Août 2021

Membres de Jury :

Président : Professeur RAJAONARISON Eddie Franck

Examineurs :

- Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriel
- Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela
- Monsieur RANDRIANARIVELO Lanja

Encadreurs :

- Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy
- Docteur RANDRIAMALALA Tina Richard

TENY FISAORANA

Ety am-piandohana dia tsy hay ny tsy hisaotra sy tsy hidera an'Ilay Andriamanitra Andriananahary be fitiavana sy Tsara indrindra nohon' ny fitahiany sy ny fahasoavany ka nanomezany anay fahasalamana sy hery isan'andro ka nahafahanay nanatontosa izao asa fikarohana izao.

Amin'ny fo feno hafaliana ihany koa no isaorana ireo rehetra izay nanampy akaiky tamin'ny fanatontosana ny boky. Isaorana manokana arak'izany ireto olona ho tanisaina manaraka ireto:

- Andriamatoa **RAJAONARISON Eddie Franck**, Professeur, Mpampianatra Mpikaroka, Talen'ny Sekoly IES-AV, noho ny fankasitrahany mba ho anisan'ireo mpianatra mandrato fianarana eo anivon'ny sekoly izahay;
- Andriamatoa **RAKOTONINDRAINY**, Professeur Titulaire, Mpampianatra Mpikaroka, Talen'ny Sekoly IES-AV teo aloha.
- Andriamatoa **RANDRIANARIVELO Lanja**, Mpampianatra Mpikaroka, mpiandraikitra voalohany ny sampam-pianarana mombany « genie civil » eo anivon'ny Sekoly,
- Ramatoa **RAKOTOMALALA Zolimboahangy**, nahafoy fotoana betsaka tamin'ny fanampiana sy ny fanorona lalana nentiko nanantontosa an-tsakany sy andavany ity boky ity no sady tompon'andraikitra voalohany ny sampam-pianarana mombany “Matériaux Minéraux eo anivon'ny Sekoly;
- Andriamatoa **RANDRIAMALALA Tina Richard**, tompon'andraikitra voalohany makasika ny fikarohana momban'ny materialy ao amin'ny Laboratoire National du Travaux Publics et Bâtiments no sady mpanampy sy mpanoro lalana ahy tamin'ny fikarohana nataoko
- Ny mpampianatra voatokana hitsara izao izao, dia Andriamatoa isany:
 - Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriel
 - Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela
- Ireo mpampianatra rehetra , sy ireo tompon'andraikitra rehetra eo anivon'ny Sekoly ;
- Andriamatoa **RANDRIANARISATA Louis de Gonzague**, Talen'ny Laboratoire National des Travaux Publics et Bâtiments sy ny mpiara-miasa aminy rehetra ao amin'ny LNTPB.
- Ary hamaranako ny teny, tsy hay ny tsy hisaotra an'ireo ray aman-dreny niteraka tamin'ny fanohanany ara-bola sy ara-moraly, ny anabaviko sy ny fianakaviana

manontolo ary indrindra koa ireo namana rehetra tamin'ny fanampiana sy ny fanomezan-tanana, tsy ho voavaly ny soa nataon'izy ireo koa enga anie ilay Nahary hamaly izany aminy.

REMERCIEMENTS

D’abord, Nous tenons à remercier DIEU TOUT PUISSANT de nous avoir donné la santé, le temps et l’opportunité d’accomplir ce présent travail.

Nous tenons vivement à remercier :

- Monsieur **RAJAONARISON Eddie Franck**, Professeur, Enseignant Chercheur Directeur de l’Institut d’Enseignement Supérieur d’Anstirabe Vakinankaratra,
- Monsieur **RAKOTONDRAINNY**, Professeur Titulaire, Enseignant Chercheur, ancien Directeur de l’Institut d’Enseignement Supérieur d’Antsirabe Vakinankaratra
- Monsieur **RANDRIANARIVELO Lanja**, Enseignant Chercheur, Responsable de la mention Génie Civil à l’Institut d’Enseignement Supérieur d’Antsirabe Vakinankaratra,
- Madame **RAKOTOMALALA Zolimboahangy**, Maître de Conférences, Enseignant Chercheur, notre Encadreur, Responsable parcours Matériaux minéraux, en dépit de la lourdeur des tâches qui lui incombent, a fait tout son possible pour prodiguer des conseils dans l’orientation et l’élaboration du présent mémoire.
- Monsieur **RANDRIAMALALA Tiana Richard**, Maître de Recherche, Responsable des recherches et matériaux au sein du Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment par ses conseils, et son assistance ;
- Messieurs les membres de jury, qui ont accepté d’examiner nos travaux :
 - Professeur RANAIVONARIVO Velomanantsoa Gabriel
 - Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela
- Monsieur **RANDRIANARISATA Louis de Gonzague**, Directeur général du LNTPB,
- Tous les personnels au LNTPB ainsi que tous les enseignants de l’Institut d’Enseignement Supérieur d’Antsirabe Vakinankaratra,
- A mes amis, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l’élaboration de ce rapport.
- Enfin, un vif remerciement à mes parents qui m’ont soutenu moralement et financièrement durant le stage et durant l’élaboration de ce présent rapport.

SOMMAIRE

TENY FISAORANA

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ET NOTATIONS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

PARTIE I : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I : GENERALITES SUR LES BITUMES

Chapitre II : NOTION SUR LES ENROBES BITUMINEUX

Chapitre III : GEOLOGIE DES GRANITES, BASALTES et POUZZOLANES

PARTIE II : ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre IV : PRESENTATIONS ET CARACTERISTIQUES DES MATIERES
PREMIERES

Chapitre V : CARACTERISATIONS DES MATERIAUX ET ESSAI DE FORMULATION

Chapitre VI : CARACTERISTIQUES DES ENROBES

Partie III : EVALUATION DE L'ETUDE

Chapitre VII : INTERETS ECONOMIQUES

Chapitre VIII : INTERETS ENVIRONNEMENTAUX

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

RESUME

LISTE DES ABREVIATIONS et NOTATIONS

ABREVIATIONS

BBME : Béton Bitumineux Module Elevé.
BBA : Béton Bitumineux Aéronautique
BBSG : Béton Bitumineux Semi Grenu
BBM : Béton Bitumineux Mince
BBTM : Béton Bitumineux Très Mince
BBUM : Béton Bitumineux Ultra Mince
EME: Enrobé a Module Elevé
EN : Norme Européenne
GB: Grave Bitume
IES-AV : Institut d’Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra
NF : Norme Française
LNTPB : Laboratoire Nationale des Travaux Publics et Bâtiments
LA : Los-Angeles
MDE : Micro-Deval en présence d’eau
MRV : Masse Volumique Réelle

NOTATIONS

D : Diamètre maximale
d : Diamètre minimale
V : Volume
P : Poids
P25 : Pénétrabilité à 25 degré Celsius
h : Hauteur
 Δh : Variation d’hauteur
ES : Equivalent de sable
 γ_d : Densité apparente
 γ_s : Poids spécifique
 ρ : Masse volumique
c : compacité

Rc : Résistance à la compression

R'c : Résistance à l'immersion

R'c/Rc : Rapport immersion/compression

T : Température

T°BA : Température Bille-Anneau

T1 : Témoin

Pp : Poudre de pouzzolane

Pb : Poudre de basalte

Pg : Poudre de granite

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Eléments constitutifs des types du bitume [2].....	6
Tableau 2 : tableau de la référence sur la pénétrabilité du bitume PUR [3].....	9
Tableau 3 : Les modules AFNOR correspondant aux tamis de la série normalisé.....	15
Tableau 4 : Compositions chimiques moyennes de la pouzzolane	29
Tableau 5 : Classification du bitume suivant l'indice de pénétrabilité	40
Tableau 6 : Température de chauffage du liant et des granulats.....	47
Tableau 7 : masses volumiques des gravillons.....	49
Tableau 8 : Granulométrie des granulats sable : 0/4	49
Tableau 9 : Granulométrie des granulats 4/6	49
Tableau 10 : Granulométrie des granulats 6/10	49
Tableau 11 : résultats de la coefficient d'uniformité et coefficient de courbure de la courbe .	50
Tableau 12 : Caractéristiques mécaniques des granulats 4/6 et 6/10	52
Tableau 13 : Mesure de la perte à la chaleur.....	52
Tableau 14 : Mesure de la densité du bitume.....	53
Tableau 15 : Tableau de la caractéristique du bitume utilisé	54
Tableau 16 : Résultats de la surface spécifique Blaine des poudres	54
Tableau 17 : Proportion du mélange de l'enrobés bitumineux	55
Tableau 18 : Caractéristiques Marshall.....	63
Tableau 19 : Caractéristiques Duriez	67
Tableau 20 : Prix unitaire de chaque constituant	71
Tableau 21 : Tableau cout total des matériaux.....	74

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Procédés de fabrication du bitume.....	3
Figure 2 : schéma de la séparation des constituants des bitumes.....	4
Figure 3 : Schémas des Structure colloïdale du bitume	5
Figure 4 : Type des enrobés bitumineux	12
Figure 5 : Courbes granulométriques des granulats	50
Figure 7 : Variation de la densité apparente Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine	64
Figure 8 : Variation des masses spécifiques Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine	64
Figure 9 : Variation de la Stabilité Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	65
Figure 10 : Variation de la compacité Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	65
Figure 11 : Influence de la poudre sur le fluage en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	66
Figure 12 : Variation de la densité apparente Duriez en fonction de la nature et du pourcentage de fine	67
Figure 13 : Variation du masses spécifique Duriez en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	68
Figure 14 : Variation de la compacité Duriez en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	68
Figure 15 : Variation de l'absorption d'eau en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	69
Figure 16 : Variation des résistances à l'écrasement sèches en fonction de la nature et du pourcentage de fine	70
Figure 17 : Variation des résistances à l'écrasement après immersion dans l'eau en fonction de la nature et du pourcentage de fine.....	70

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Etuve	photo 2 : Appareil Los-Angeles	38
Photo 3 : Appareil Micro-Deval.....		40
Photo 4 : Bain thermostatique à 25°C	Photo 5 : Pénétration à DOW	42
Photo 6 : Appareils de mesure de la température bill-anneau.....		43
Photo 7 : Test d'adhésivité		47
Photo 8 : Moule et Dame de compactage.....		56
Photo 9 : Malaxage.....		56
Photo 10 : Moulage		57
Photo 11 : Démoulage des éprouvette.....		57
Photo 13 : Pesage	Photo 14 : immersion dans un bain thermostatique.....	59
Photo 15 : Ecrasement de l'éprouvette.....		60
Photo 16 : Moulage	Photo 17 : conservation à l'air	61
Photo 18 : Immersion dans l'eau	Photo 19 : Ecrasement des éprouvettes	61

LISTE DES ANNEXES

Annexes 1 : Tableau de calcul du poids spécifiques Marshall.....	III
Annexes 2 : Tableau de calcul de la densité apparente Marshall.....	IV
Annexes 3 : Tableau de calcul du poids spécifiques duriez.....	V
Annexes 4 : Méthode de calcul de la densité apparente duriez des éprouvettes témoins	VI
Annexes 5 : Méthode de calcul du poids spécifiques duriez des éprouvettes témoins	VII

INTRODUCTION

Les besoins en infrastructures suivent la même courbe de croissance que la population. Afin de répondre aux exigences contemporaines du secteur du transport, les surfaces de circulation doivent avant tout être en bonne état et durable, mais aussi être construites dans le respect de l'environnement et des budgets économiques. La construction des routes est donc nécessaire car le sol à l'état naturel ne constitue pas une surface de circulation adaptée et ne remplit pas les exigences de plus en plus rigoureuses pour le transport des marchandises, des biens et des personnes etc.

La construction routière englobe toutes les applications et disciplines de la construction neuve et de la réfection. Elle nécessite des études au laboratoire avant l'exécution de tous travaux, l'étude de formulation des enrobés en est une. Les enrobés bitumineux constituent un élément essentiel dans le revêtement. Ses propriétés mécaniques et sa durabilité sont assurées par la stabilité de l'édifice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et surtout par une bonne adhésion entre le bitume et les granulats. Il est donc nécessaire d'apporter des améliorations sur les enrobés en vue de sa durabilité.

Dans la région du Vakinankaratra, plusieurs ressources minérales, entre autres scories volcaniques, basalte, granite, pouzzolane, mâchefer, cipolin, etc. ... pourront être valorisées pour améliorer la résistance des enrobés bitumineux. Les caractéristiques et propriétés de ces ressources varient selon la nature, l'origine et le gisement. Une de ces propriétés est le pouvoir pouzzolanique. Cette caractéristique est mise à profit dans plusieurs secteurs industriels. Leurs caractéristiques, chimiques et minéralogiques, leur confèrent des atouts intéressants pour confectionner des enrobés bitumineux.

Notre mémoire qui s'intitule : « **AMELIORATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ENROBES BITUMINEUX PAR DES FILLERS MINERALES DE LA REGION VAKINANKARATRA** », a pour objectif principal de formuler un enrobé bitumineux ayant une bonne performance mécanique, durable et économique.

Ceci nous amène à considérer les parties suivantes pour présenter notre ouvrage :

- La première partie consiste à présenter les études bibliographiques ;
- La deuxième partie est consacrée aux études expérimentales
- Et la dernière partie traitera les évaluations de notre étude.

PARTIE I :
ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I : GENERALITES SUR LE BITUME

I.1. Le bitume

I.1.1.1. Définition [1]

Les bitumes sont des produits hydrocarbonés issus des huiles des roches, de couleur noire, visqueux et presque solides à la température ambiante. Ce sont des mélanges complexes d'hydrocarbures de poids moléculaires élevés constitués majoritairement de carbone, d'hydrogène et de quelques hétéroatomes en faible proportion tels que le soufre, l'oxygène, l'azote et en moindre quantité, de métaux lourds. Ayant des propriétés adhésives et imperméables à l'eau, ils s'utilisent dans divers domaines comme les chaussées, les étanchéités et surtout les constructions routières.

I.1.1.2. Origine [1], [w1]

Généralement, les bitumes sont des extraits lourds de bruts pétroliers, obtenus par la distillation fractionnée directe de ce dernier dans les industries de raffinerie pétrolière. Ils proviennent aussi de l'évaporation naturelle directe de brut au niveau de la roche réservoir à la surface terrestre que l'on appelle bitume naturel, comme ceux de Trinidad. Certaines roches, telles que les calcaires asphaltites sont des roches poreuses imprégnées d'une certaine quantité de bitume naturel. La plupart de ces calcaires asphaltites contiennent moins de 10% en poids de bitume.

I.1.1.3. Procédé de fabrication [w1], [w2]

Les modes de fabrication ont évolué. Il existe plusieurs techniques pour fabriquer le bitume, reposant principalement sur la distillation directe du pétrole brut. La plus grande partie de production est environ 90% issue de double distillation :

- Distillation atmosphérique : elle consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340 °C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit
- Distillation sous-vide : le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est récupéré au fond du tour, puis réchauffé aux alentours de température de 400 °C, et envoyé dans une colonne où règne à une pression réduite.

La séparation physique des constituants du pétrole brut peut aussi être effectuée sans dégradation de leur structure chimique en mettant à profit les différences de solubilité des fractions lubrifiantes et bitumineuses vis-à-vis de certains solvants, c'est le désasphaltage au solvant. Il est employé comme un complément dans le raffinage des "bruts à huile " et est pratiqué sur le fond de distillation sous-vide, opérant sur des bruts peu denses.

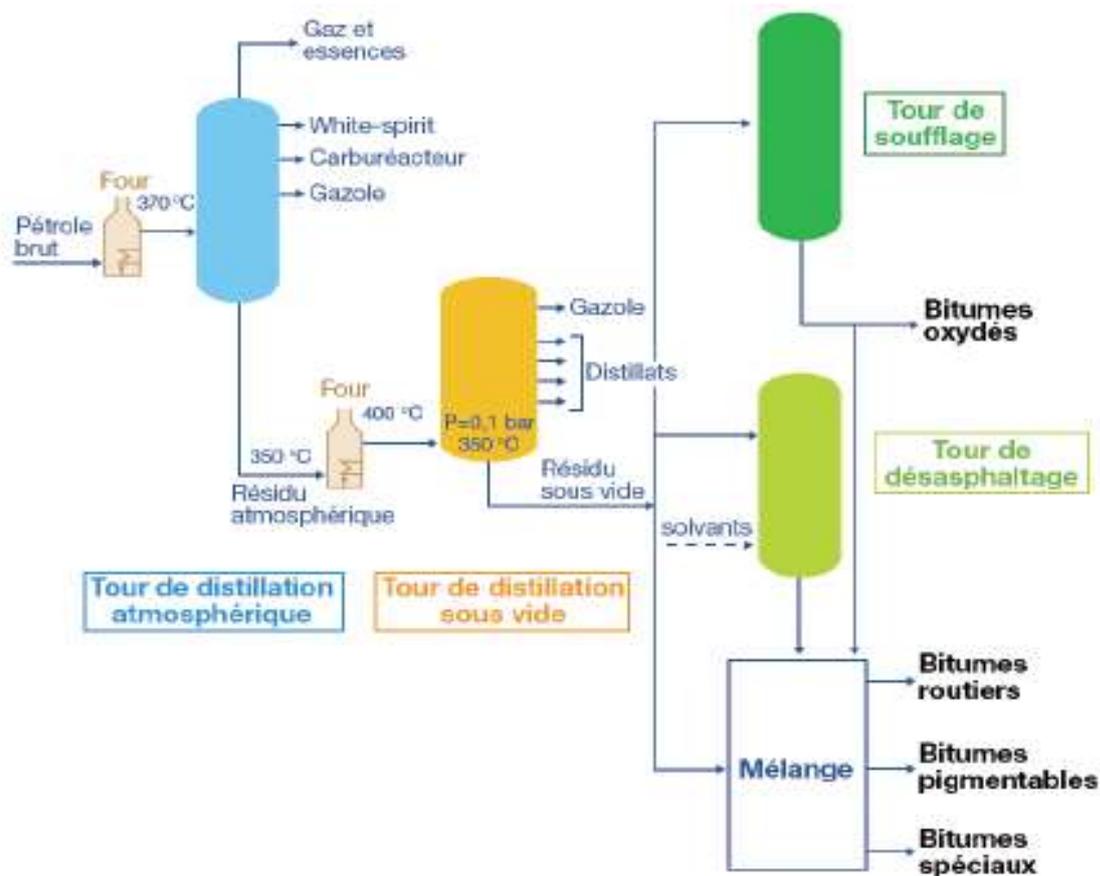


Figure 1 : Procédés de fabrication du bitume

Source : www.bitume.info/mission.jsp

I.1.1.4. Composition du bitume [w3]

A l'aide de solvants sélectifs, on peut séparer le bitume en plusieurs fractions qui appartiennent principalement à quatre familles : asphaltènes, résines, huiles naphthéno-aromatiques et huiles saturées.

- Par précipitation à l'heptane normal, on recueille les asphaltènes, insolubles. A la température ambiante, les asphaltènes se présentent sous l'aspect d'un corps solide, noir,

cassant, à point de ramollissement élevé. Le pourcentage d'asphaltènes sera d'autant plus élevé que le bitume sera plus dur.

- La fraction soluble dans l'heptane correspond aux maltènes, d'aspect huileux, que l'on peut séparer en trois phases par passage sur une colonne chromatographique.

- Une première élution à l'heptane normal permet de récupérer les huiles saturées.
- Une deuxième élution à l'aide de toluène conduit à récupérer les huiles aromatiques et naphthéno-aromatiques,
- Enfin, une troisième élution au moyen d'un mélange toluène/méthanol permet d'extraire les résines.

Il faut noter que les hydrocarbures dits "aromatiques" et "naphthéno-aromatiques" ne renferment pas de composés aromatiques purs, mais les noyaux sont toujours substitués par des chaînes aliphatiques ou des cycles saturés.

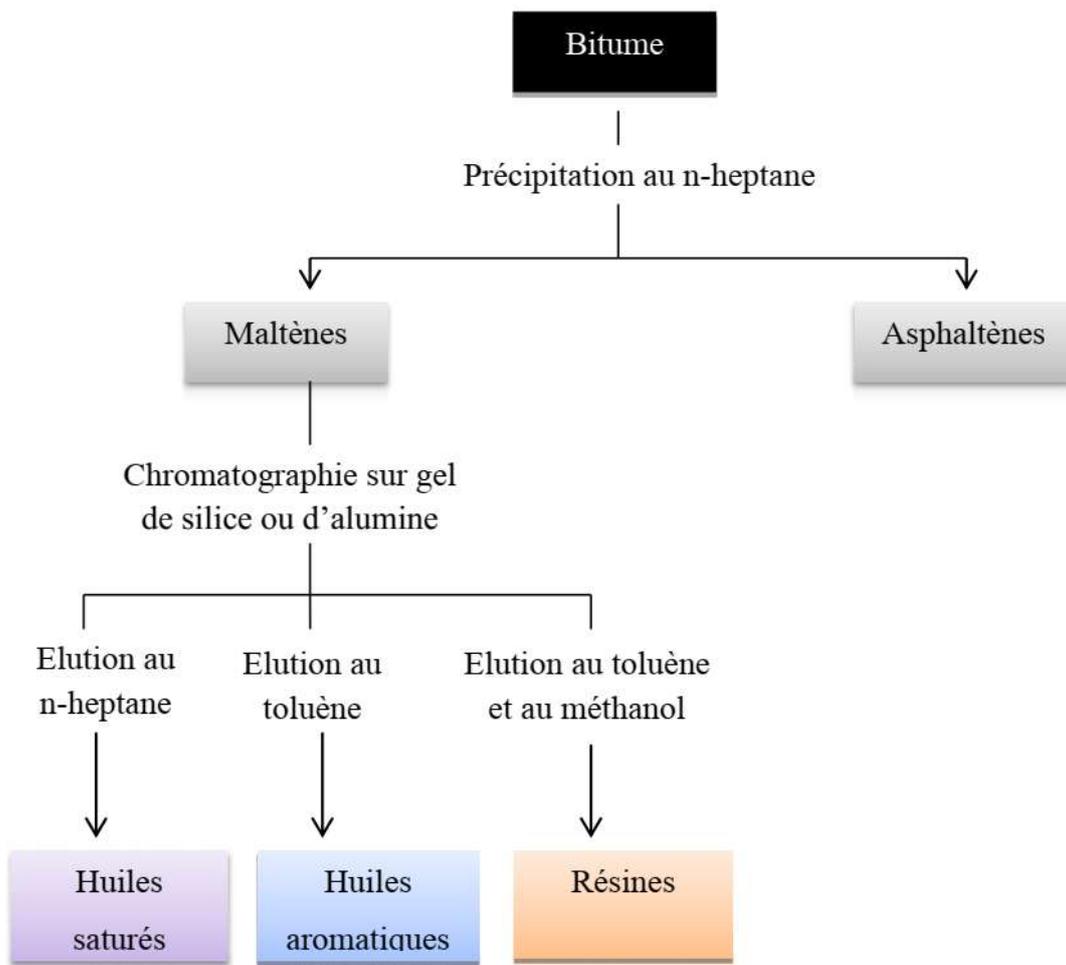


Figure 2 : schéma de la séparation des constituants des bitumes

Source : www.8-2-bitume.info

I.1.1.5. Structure du bitume [2]

Le bitume de distillation, se présente comme un système colloïdal dans lequel les asphaltènes peptisés par les résines constituent les micelles, tandis que les huiles représentent la phase inter-micellaire. Ce système peut être considéré comme un « sol » présentant les caractéristiques des liquides newtoniens. Les asphaltènes peuvent être plus ou moins floculés, ce qui explique que le bitume peut se comporter comme un « gel » et présente les caractéristiques des liquides non-newtoniens.

➤ Bitume type gel (type I)

Les micelles d'asphaltènes sont floculées. Cette structure apparaît quand la quantité de résines est trop faible pour stabiliser le système ou que leur pouvoir solvant n'est pas suffisant pour disperser ces micelles. Le bitume a alors un comportement gel, caractéristique des fluides non-newtoniens. Le caractère élastique l'emporte sur le caractère visqueux. Les bitumes oxydés ou soufflés, riches en asphaltènes présentent généralement ce type de structure « gel ».

➤ Bitume type sol (TYPE II)

La quantité de résines et d'huiles aromatiques est suffisante pour disperser les asphaltènes. La suspension asphalténique est diluée, leur enchaînement est structuré et régulier. Les bitumes « sols » ont le comportement newtonien de la matrice malténique. Le caractère visqueux l'emporte sur le caractère élastique. Ils sont ainsi très résistants aux sollicitations courtes, mais plus sensibles aux variations de température qu'un bitume gel.

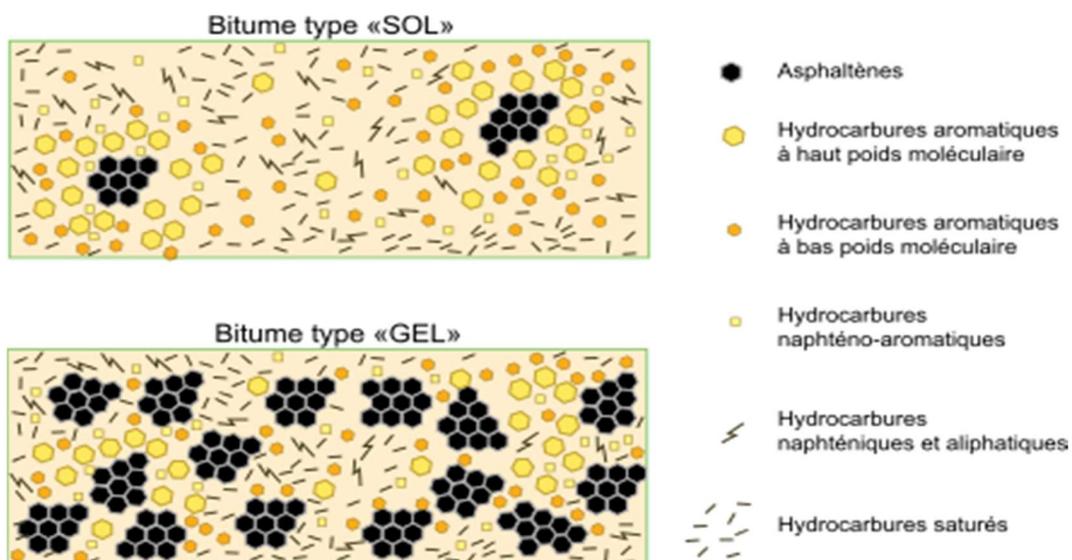


Figure 3 : Schémas des Structure colloïdale du bitume

Source : [www.8-2 Bitume.info](http://www.8-2Bitume.info)

➤ Structure intermédiaire (sol-Gel)

Les bitumes routiers ont généralement un comportement intermédiaire entre la structure sol et la structure gel. Les agrégats de micelles d'asphaltène et les autres formations structurales baignent dans un milieu dispersant. L'organisation de la structure est donc intermédiaire entre celle des milieux dispersant sol et gel.

Tableau 1 : Eléments constitutifs des types du bitume [2]

Type de bitume	% Asphaltènes	% Résines	% Huile saturé et aromatique
I: GEL	>25	24	50
II : SOL	< 18	36	48
III : SOL- GEL	21 à 23	30 à 34	45 à 49

I.1.6. Propriétés [2]

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.

I.1.6.1. Adhérence

L'adhérence du bitume à une surface dépend à la fois de la nature de cette surface et de l'état du bitume. Pour qu'un produit adhésif mouille une surface, il faut qu'il puisse humidifier la surface sur laquelle il doit adhérer. Lorsqu'il est à l'état fluide, le bitume peut humidifier les surfaces des granulats sèches et une bonne adhérence peut en résulter mais l'adhésion se fera mal s'il y a de l'eau. La température du solide ainsi que celle du bitume influent sur la qualité du joint. N'importe quelle poussière à la surface du solide et la nature même du solide peut également modifier cette qualité de mouillage. Même lorsqu'un bitume a été appliqué avec succès, l'adhérence peut être réduite ou même détruite si l'eau pénètre entre le solide et le bitume.

Il existe un certain nombre de produits que l'on peut ajouter au bitume pour le rendre plus adhésif. Ces produits ont une puissance de mouillage et d'adhérence, et lorsqu'on les ajoute en petite quantité dans le bitume ils déplacent l'eau qui se trouve à la surface du solide

et permettent une bonne adhérence. Il faut absolument que le joint entre le bitume et les granulats soit bien entretenu si l'on veut avoir des résultats satisfaisants et durables.

I.1.6.2. Résistance à l'eau

La résistance à l'eau du bitume dépend de son imperméabilité et de son pouvoir d'adsorption d'eau. Dans la pratique, le degré d'imperméabilité sera affecté par la nature des matériaux de remplissage et par la continuité du revêtement bitumineux.

I.1.6.3. Capacité d'absorption

Dans certaines conditions, l'eau peut être absorbée par le bitume lui-même ou par les petites quantités de sels inorganiques ou les éléments de remplissage qu'il contient. La solubilité normale de l'eau dans le bitume est de l'ordre de 0.001 à 0.01 du poids du bitume, donc négligeable. S'il y a des sels en quantité quelconque dans le bitume qui soient solubles dans l'eau cela donnera au bitume une grande capacité d'absorption de l'eau par osmose. Pour cette raison, les raffineries de pétrole enlèvent les sels qui se trouvent dans le pétrole brut avant de le raffiner. Les agents de remplissage peuvent également absorber certaines quantités d'eau, selon la composition et la granulométrie du matériau. Par conséquent, le bitume en contact permanent avec l'eau absorbe plus ou moins cette dernière.

I.1.6.4. Propriété d'écoulement

Les propriétés d'écoulement du bitume sont d'une certaine importance par suite des températures élevées auxquelles il est assujéti lors de leur fabrication et de leur mise en place. Les propriétés d'écoulement sont complexes particulièrement à cause des modifications qui se produisent dans la nature colloïdale des bitumes chauffés. A mesure que la température baisse, les propriétés d'écoulement sont affectées par l'élasticité et autres effets. Lorsque les bitumes sont suffisamment refroidis, ils perdent leurs propriétés visqueuses et se comportent comme des solides cassants. L'intervalle entre la température du point de ramollissement et température à laquelle des cassures sont possibles indique dans quelle mesure les bitumes sont sensibles à la température. Cette sensibilité varie selon la source du brut et selon la méthode de traitement des bitumes. Le bitume donne généralement satisfaction lorsqu'il est assujéti en service à des températures ne dépassant pas les limites fixées pour la cassure due au froid et pour le ramollissement dû à la chaleur.

I.1.6.5. Propriété émulsifiante

Pour permettre au bitume de mouiller les surfaces qu'il doit recouvrir, on l'applique souvent à chaud à l'état liquide. La température à laquelle il faut chauffer le bitume dépend à

la fois de la consistance de ce dernier et de la température de la surface sur laquelle il doit être appliqué. On ne peut pas toujours appliquer les bitumes à chaud. On a alors recours à des applications à froid, le bitume étant liquéfié avec un solvant ou émulsifiant. Une fois que la solution bitumineuse est appliquée à la surface du solide, le solvant s'évapore en laissant une couche bitumineuse. Nombreux sont les solvants suffisamment volatils qui sont des bons solvants pour le bitume mais nombreux sont ceux qui sont soit trop chers soit trop dangereux. Le bitume peut être émulsionné à l'eau. Une émulsion satisfaisante est d'apparence lisse, de couleur généralement brune ; qui peut être faite à partir de bitume de consistance très variée.

I.1.6.6. Durabilité

On a mentionné les changements que les bitumes subissent lorsqu'ils sont surchauffés. Les bitumes sont facilement oxydés lorsqu'ils sont assujettis à un rayonnement ultraviolet, un processus qui crée des produits solubles dans l'eau et qui rend le matériau plus dur et moins flexible qu'il n'était originalement. Si le rayonnement continue jusqu'à ce que le bitume ne puisse plus résister aux efforts imposés par l'effet thermique, le matériau se fissurera. La perte des substances volatiles produit des contractions qui souvent, causent des rétrécissements et des fissures. En l'absence de lumière et de chaleur, cependant, le taux d'oxydation est faible et la vie utile des matériaux peut être prolongée.

I.2. Bitume routier

Le bitume contribue la structure d'une chaussée surtout le comportement mécanique à cause de ses propriétés viscoélastiques. Il en assure également l'étanchéité du fait de son insensibilité à la plupart des agents chimiques usuels, en particulier l'eau. La couche de roulement et la couche de liaison sont aujourd'hui habituellement réalisées en matériaux bitumineux.

I.2.1.1. Caractéristiques physiques [3]

Les caractéristiques physiques des bitumes sont généralement décrites par divers paramètres dont la température de ramollissement (la méthode bille-anneau ou la méthode Kraemer Sarnow) et la dureté (méthode de la pénétration). Les deux caractéristiques fondamentales qui permettent de définir un bitume sont :

- **La pénétrabilité** : mesure de la dureté
- **Le point de ramollissement** : température de changement de l'état solide l'état liquide ou température de liquéfaction

Les bitumes routiers sont classifiés suivant la Norme NF EN 12 591, en tenant compte des caractéristiques physiques.

I.2.1.1. La pénétrabilité (NF EN 1426- T 66-004)

Cet essai détermine l'enfoncement d'une aiguille normalisée de 1 mm de diamètre sur un échantillon de bitume maintenu à 25°C sous une charge de 100 g appliquée pendant 5 secondes. Cet essai est exprimé en dixièmes de millimètre. Plus le bitume est mou plus la valeur absolue de la pénétrabilité est grande. Les bitumes sont définis par leur **classe** de pénétrabilité qui correspond à sa borne inférieure et à sa borne supérieure. (Exemple : 20/30 – 35/50 – 50/70 – 70/100 – 160/220). La pénétration est donc la profondeur à laquelle s'enfonce l'aiguille standard sous certaines conditions de chargement et de température. Elle définit ainsi la consistance et la dureté d'un bitume.

Le tableau ci-après montre la classification à partir de la pénétration suivant l'annexe de la norme EN 1426 sur le bitume pur [3].

Tableau 2 : tableau de la référence sur la pénétrabilité du bitume PUR [3]

Caractéristiques	Unité	Méthode	Désignation de classes appropriées				
			20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
BITUME PUR							
Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s	0,01 mm	EN 1426	20 à 30	35 à 50	50 à 70	70 à 100	160 à 220

Un enrobé à base de bitume 160/220 sera plus mou et résistera plus en fatigue, mais sera plus susceptible aux fortes températures et à l'orniérage (déformations permanentes produite par le passage des roues de voitures). Un tel enrobé conviendra plus à des voies de trafic faible. En revanche, le bitume 20/30 est dit dur, c'est à dire qu'il a besoin d'une plus forte température pour ramollir. Il convient, donc mieux aux régions très ensoleillées.

I.2.1.2. Point de ramollissement bille et anneau (NF EN 1427- T 66-008)

Le point de ramollissement du bitume est déterminé à partir de la méthode bille et anneau (NF EN 1427). Le point de ramollissement bille et anneau est la température à laquelle le produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans les conditions normalisées. Une bille d'acier d'une masse de 3,5g et de 9,5mm de diamètre est placée sur une surface de prise d'essai du produit contenue dans un anneau de 19mm de diamètre imprime à l'échantillon une déformation verticale. La température de la pénétration de la bille

dont le produit bitumineux devient assez mou sera la température correspondante du point de ramollissement [2]. Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur.

I.2.1.3. Catégorie de bitumes routiers (TOUTS)

Il existe 6 catégories de bitumes routiers :

- Bitume pour enrobés ;
- Bitume émulsif ;
- Bitume fluidifié ;
- Bitume modifié ;
- Asphalte ;
- Bitume oxydé ou bitume soufflé.

a. Bitume pour enrobés

Mélange de bitume (5 à 10 %) et de granulats, fabriqué et appliqué à température de 150°C. Le critère sur le choix du liant sont à la fois d'ordre technique, climatique et économique.

Il existe trois types d'enrobé bitumineux :

- L'enrobé à chaud fabriqué aux alentours de 150°C-160°C et mis en œuvre à une température aux alentours de 140°C-150°C ;
- L'enrobé tiède fabriqué aux alentours de 90 à 130°C et appliqué aux alentours de 90°C,
- L'enrobé à froid : mélange de granulats avec une émulsion de bitume mis en œuvre à température ambiante, souvent employé pour l'entretien et réparation des chaussées.

b. Bitume émulsifs

C'est une dispersion très fine du bitume dans l'eau. Il en existe deux catégories des émulsions : les émulsions anioniques et les émulsions cationiques. La stabilité de la dispersion est obtenue par l'ajout d'un tensioactif qui réduit la tension inter faciale eau/bitume et polarise les globules de bitume soit négativement (émulsion anionique), soit positivement (émulsion cationique). C'est la nature du tensioactif qui détermine la polarité de l'émulsion. Les émulsions de bitume peuvent être mises en œuvre à température modérée (< 80 °C), voire à température ambiante.

c. Bitume fluidifiés ou « cut-back » [1]

Pour faciliter la mise en œuvre des enrobés, on réduit la viscosité du liant bitumineux en ajoutant des fluidifiants (par exemple le kérosène) qui ramollissent le bitume. Certain bitume fluidifié peut être appliqué à température ambiante.

L'ajout d'un fluxant, souvent une huile, ramollit le bitume et permet sa mise en œuvre à une température légèrement supérieure à 100 °C. C'est le cas du bitume fluxé. La partie la plus légère du fluxant s'évapore tandis que la plus lourde a pour rôle de plastifier le liant en place.

On en distingue 3 types selon la fluidité et la vitesse de prise :

- Bitume à séchage lent **SC** (slow curring): composé d'un ciment bitumineux et d'huiles de volatilité lente.
- Bitume à séchage moyen **MC** (medium curring): formé d'un ciment bitumineux et d'un diluant de volatilité moyenne comme le kérosène.
- Bitume à séchage rapide **RC** (rapidcurring): constitué d'un ciment bitumineux et d'un diluant de haute volatilité comme l'huile de naphte ou la gazoline.

d. Bitume modifié

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

e. Asphalte

C'est un mélange de bitume (7 à 14 %), de granulats et de poudres minérales (filler ou fines). L'asphalte contient parfois de la poudre d'asphalte naturel (roche calcaire ou grès naturellement imprégnés de bitumes : rock asphalt). L'asphalte est fabriqué et appliqué à des températures élevées et assure une bonne étanchéité (matériau d'aspect lisse, sans aucun vide). Il est utilisé comme revêtement des trottoirs, chaussées et des ponts.

f. Bitume oxydé ou bitume soufflé

Le bitume oxydé ou soufflé est un bitume dont les propriétés rhéologiques ont été modifiées par réaction avec l'air, à des températures élevées.

L'ajout d'un fluxant, souvent une huile, réduit la viscosité et ramollit le bitume. Il permet sa mise en œuvre à une température légèrement supérieure à 100 °C. La partie la plus légère du fluxant s'évapore tandis que la plus lourde a pour rôle de plastifier le liant en place.

Chapitre II : NOTION SUR LES ENROBES BITUMINEUX

II.1. Définition [1]

On appelle enrobé bitumineux tout mélange de 93 à 96 % de granulats, des fillers et de 4 à 7% des liants hydrocarbonés appliqués en une ou plusieurs couches, pour constituer le revêtement des chaussées, des trottoirs, des zones de stationnement, etc. Le terme inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié, ou modifié). L'obtention d'un enrobé adéquat fait appel à des propriétés physico-chimiques et mécaniques bien spécifiques au liant et aux granulats, en relation avec la température, l'humidité, etc.

II.2. Différents types des enrobes bitumineux [2]

Les enrobés bitumineux peuvent être distingués soit par le procédé de fabrication soit par sa mise en œuvre. La figure suivante nous renseigne sur ces détails :

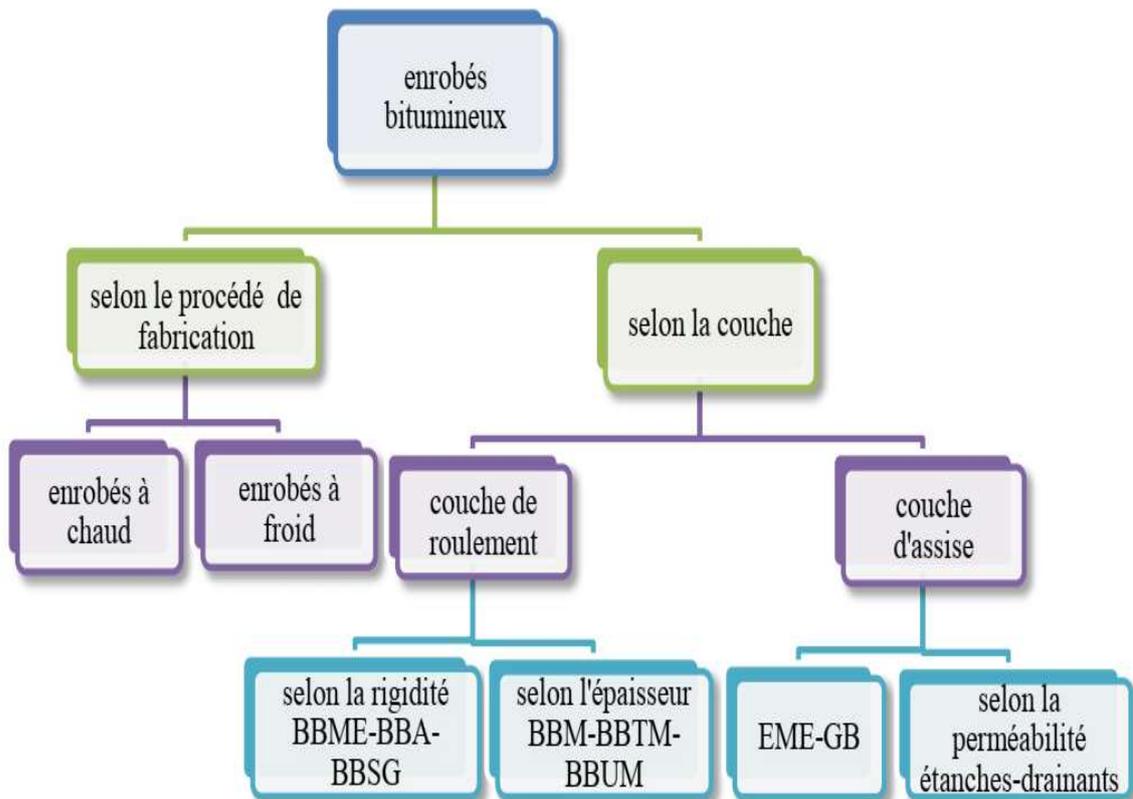


Figure 4 : Type des enrobés bitumineux

Source : RASOAMAMPIONINA Herivola

- BBME : Béton Bitumineux Module Elevé.
- BBA : Béton Bitumineux Aéronautique
- BBSG : Béton Bitumineux Semi Grenu
- BBM : Béton Bitumineux Mince
- BBTM : Béton Bitumineux Très Mince
- BBUM : Béton Bitumineux Ultra Mince
- EME: Enrobé a Module Elevé
- GB: Grave Bitume.

II.3. Famille des enrobés bitumineux [w4]

II.3.1. Enrobés à chaud [1], [2]

Les enrobés à chaud sont obtenus par le chauffage des granulats et du liant à une température proche de 160 °C ou plus. A cette température les bitumes sont presque fluides pour avoir un meilleur enrobage. Pour ce procédé il se peut que certains composés volatils puissent s'évaporer et cela augmente la teneur en asphaltènes du liant, ce qui améliore les caractéristiques rhéologiques.

L'enrobé à chaud est la technique la plus employée à Madagascar, il est fabriqué à chaud et appliqué à chaud. On distingue :

- le Béton Bitumineux: enrobé riche en bitume, utilisé pour les couches de roulement;
- le Béton Bitumineux Mince (BBM) dont l'épaisseur de couche est de 3 à 5 cm;
- le Grave Bitume : enrobé à plus faible teneur en liant destiné aux couches de fondation ou de base dont l'épaisseur est comprise entre 8 et 14cm ;
- le Béton Bitumineux à module élevé (BBME): enrobé hydrocarboné à chaud 'épaisseur moyenne de 5 cm qui possède un module de rigidité plus élevé.

II.3.2. Enrobés à Froid [2]

Ce sont des enrobés fabriqués et appliqués à froid, par adjonction d'émulsion de bitume garantissant la malléabilité du matériau. L'enrobé est caractérisé par de faible granulométrie (0/4 ou 0/6 en principe) avec une forte teneur en liant et en fines [2].

II.4. Les constituants des enrobés bitumineux [4]

Les principaux constituants des enrobés sont le bitume et les granulats. Les granulats sont formés, d'une part, par les gros grains qui vont former le squelette du matériau et d'autre

part, par les fines qui, mélangées au liant, forment un mortier de liaison du squelette granulaire. Et chacune de ces fonctions assure la rigidité du matériau. Doté d'un comportement viscoélastique, le liant bitumineux transmet ses propriétés à l'enrobé ce qui assurent l'adhésion entre les granulats [4].

II.4.1. Les Liants [4]

Les liants utilisés pour confectionner les enrobés bitumineux le plus souvent est le bitume. Le choix du bitume est de première importance. Comme souligné auparavant, le type et la teneur en liant ont une grande influence sur la rhéologie et sur le comportement à la variation de température des enrobés bitumineux. Souvent, on utilise le bitume semi dure.

II.4.2. Les granulats [1]

Pour la formulation des enrobés, le granulat est l'un des éléments de grande proportion pour assurer une qualité mécanique bien adéquates à l'utilisation attendue. En effet, le choix et la connaissance de leurs caractéristiques intrinsèques sont très importants du fait que la résistance et la vie des chaussées en dépendent.

II .4.2.1. Définition

On appelle « granulat » les matières grenues, sables, graviers ou cailloux, soient roulés (extrait du lit des rivières), soient concassés et broyés (issus de carrière), qui entrent dans la composition du béton bitumineux. Un granulat est constitué par un ensemble de grains minéraux d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé : fines, sables, gravillons, cailloux, graves ou ballasts suivant leur taille ou leur granulométrie comprise entre 0 et 80 mm. Le terme granulats, au pluriel, est utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types.

II.4.2.2. Classifications des granulats

Les granulats sont spécifiés selon leur classe granulaire avec la notation générale d/D . où d : diamètre minimal des grains et D : diamètre maximal des grains. Lorsque le granulat d/D est tel que d est inférieur à 2 mm, il porte conventionnellement l'appellation O/D .

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions d et D :

- Fillers O/D où $D < 2$ mm avec au moins 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sablons O/D où $D < 1$ mm avec moins de 70 % de passant à 0,063 mm ;
- Sables O/D où $1 < D < 6,3$ mm ; (de type 0/2, 0/4, ou 0/6)
- Graves O/D où $D > 6,3$ mm ; (du type 0/10, 0/14, 0/20, ou 0/30)

- gravillons d/D où $d > 1$ et $D < 125$ mm ; (du type 2/4, 4/6, 6/10, 10/14, ou 14/20) ;
- Ballasts d/D où $d > 25$ mm et $D < 50$ mm.

II.4.2.3. Les caractéristiques géométriques

a. Granulométrie (NF P 18 – 560)

La granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat. Elle consiste à tamiser les granulats sur une série de tamis normalisés à maille carré, de dimensions d'ouverture décroissantes. Les ouvertures carrées des tamis correspondant aux classes granulaires s'échelonnent de 0,08 à 80 mm. On appelle « tamisat » la partie des granulats qui est passée à travers le tamis, et « refus » la partie qui est restée sur le tamis.

b. Le module de finesse du granulat

C'est une grandeur qui permet d'évaluer la finesse d'un corps sous forme de poudre ou de granulat. Elle est égale à la somme des refus sur les tamis de la série normalisé en module divisé par 100.

Tableau 3 : Les modules AFNOR correspondant aux tamis de la série normalisé

Module AFNOR	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50
Tamis d [mm]	0.16	0.315	0.63	1.25	2.5	5	10	20	40	80

c. Coefficient d'aplatissement (Norme P 18 – 561)

Le coefficient d'aplatissement **CA** caractérise la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur. D'après la norme NF P 18-541, la valeur du coefficient d'aplatissement doit être $CA \leq 25\%$, granulats pour enrobés bitumineux.

II.4.2.4. Les caractéristiques physiques

a. Masse volumique (Norme P 18 – 554)

a.1. Masse volumique apparente (MRA)

C'est la masse de granulat sec occupant une unité de volume, tous vides inclus. Elle dépend du tassement des grains.

a.2. Masse spécifique γ_s

C'est la masse de granulat sec par unité de volume de matière pleine sans aucun vide entre les grains : c'est la masse volumique réelle du granulat.

a.3. Masse volumique réelle (MVR)

C'est le rapport de la masse d'un corps, au volume du mélange sans tenir compte des vides ; exprimé en gramme par centimètre cube

b. L'essai Los Angeles (LA) [13]

L'essai Los Angeles défini par la norme EN 1097-8, permet de déterminer la résistance à la fragmentation. Il consiste à mettre dans un tambour rotatif contenant 11 boules d'acier une masse sèche égale à 5 000 g de granulats. Au cours de l'essai, le tambour effectue 500 tours à une vitesse de rotation comprise entre 31 et 33 tr/mn. Son degré de fragmentation est apprécié par la proportion de l'échantillon devenue plus petite que 1,6mm.

c. L'essai Micro Deval (MDE) [w6]

La résistance à l'usure au frottement est déterminée par l'essai Micro-Deval. L'essai consiste à déterminer la résistance à l'usure par attrition des granulats à travers quatre échantillons identiques de 10/14 soumis en contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation. La proportion des éléments fins montre le degré d'usure. L'essai a le même principe que le LA mais on a besoin lors de l'opération.

II.4.2.5. Les différents types des granulats [5], [W5]

Les granulats peuvent être un produit naturel obtenu par criblage (type roulé à grains plus ou moins arrondis) ou un produit de concassage (type concassé à grains plus ou moins anguleux [5]). Le granulat est l'ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm. Les granulats sont dits

- Naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique ;
- Artificiels lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- Recyclés lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés ;
- Courants lorsque leur masse volumique réelle MVR (P 18-554, P 18-555) est supérieure ou égale à 2 mg/m^3 (ou T/m^3) ;
- Légers lorsque leur masse volumique réelle MVR est inférieure à 2 Mg/m^3 (ou T/m^3).

II.4.3. Les fines d'apports ou filler [w7]

Il s'agit des éléments inférieurs à 80 μ m (0,08mm) qui ajout dans le mélange pour remplir les vides entre les grains et bien adhérents avec le bitume. On distingue deux grandes familles de fines, les fines naturelles et les fines d'apport.

II.4.3.1. Les fines naturelles [w8]

Les fines naturelles sont une classe granulométrique d'agrégats des grains de dimension inférieure à 80 μ m (0,08 mm). Elles sont fabriquées lors du concassage des matériaux, et contenues principalement dans le sable. Elles représentent dans les formules actuelles de 5 à 6% du mélange.

II.4.3.2. Les fines d'apport [6]

On distingue le filler de récupération provenant du dépoussiérage lors de la fabrication des enrobés bitumineux et le filler d'apport obtenu par mouture ou dépoussiérage lors de la fabrication des granulats. Il est destiné à augmenter la compacité des enrobés bitumineux.

Il est ajouté à ce mélange pour combiner les vides granulométriques subsistant. Elles introduits dans le centrale d'enrobage à raison de 1 à 5 ou 7% suivant les formules.

Les principales fines d'apport sont :

- Les fines calcaires
- La chaux
- Le ciment

Les fines d'apport jouent un rôle de remplissage dans le mélange bitumineux ce qui entraîne l'augmentation de la résistance des enrobés. Elles améliorent l'adhésivité du bitume avec les granulats et accélèrent le vieillissement du bitume en le rigidifiant.

II.5. Formulation [1]

Une formulation est la recherche de la composition la plus performante vis-à-vis des conditions exigées par la mise en œuvre et lors de l'exploitation (malaxage, tenue en fatigue, durabilité, coût,...).

L'étude de formulation est le travail le plus délicat et important lors de l'étude des enrobés du fait que la résistance mécanique et la durée de vie des routes en dépendent. L'objet de l'étude de formulation est de définir les dosages des divers constituants capables d'atteindre et d'assurer, au cours de la vie de la chaussée, le maintien à un niveau satisfaisant des performances. L'étude de formulation de ces matériaux consiste en une série

de compromis, puisque le comportement de l'enrobé oscille entre la sensibilité aux déformations permanentes et à la fissuration par fatigue ou au désenrobage par arrachement des granulats.

Nous pouvons dire que la formulation est basée sur deux phases principales ; à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant.

L'action du formateur de mélanges hydrocarbonés peut donc être décomposée chronologiquement en trois phases principales :

- La section et l'identification des constituants
- La mise au point du mélange
- L'épreuve de formulation

II.5.1. La composition granulométrique [2]

Les enrobés bitumineux doivent répondre à certaines règles de composition granulométrique que l'on résume sous forme de fuseaux à l'intérieur desquels la courbe granulométrique du mélange considéré peut se déplacer. L'étude de la composition granulométrique de l'enrobé comporte deux étapes :

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

II.5.2. Le teneur en liant [6]

Par définition, on appelle teneur en liant : le rapport entre la masse de liant à la masse des granulats secs, exprimée en pour cent extérieur. La teneur en liant d'un enrobé bitumineux à retenir pour un chantier est définie à partir d'une étude de laboratoire qui consiste à choisir, à partir d'un granulat simple ou composé entrant dans le fuseau recommandé, une teneur en liant en fonction de la surface spécifique du granulat. Où Σ est la surface spécifique, exprimée en mètres carrés par kilogramme, déterminée par la relation :

$$100\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 150f$$

- G : proportion d'éléments supérieurs à 6,3 mm ;
- S : proportion d'éléments compris entre 6,3 mm et 0,315 mm
- s : proportion d'éléments compris entre 0,315 mm et 0,08 mm ;
- f : proportion des éléments inférieurs à 0,08 mm ;

La teneur en liant est donnée alors par la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = k \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

k : module de richesse qui caractérise l'épaisseur conventionnelle du film de liant hydrocarboné enrobant les granulats. K est indépendant de la masse volumique du mélange granulaire.

α : un coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats ρ_{gr}

$\alpha = 2,65/\rho_{gr}$ avec ρ_{gr} : la masse volumique des granulats en grammes par centimètre cube.

II.6. Les essais sur les enrobes bitumineux [2]

L'objectif principal est de déterminer les propriétés mécaniques des matériaux routiers qui sont importantes pour le dimensionnement. Ces propriétés mécaniques englobent les rapports qui existent entre la contrainte et la déformation élastique et la relation entre les niveaux de contrainte, ou de la déformation élastique et la rupture.

II.6.1. L'essai Marshall

L'essai Marshall a pour but de déterminer la teneur en vides ainsi que les caractéristiques mécaniques d'un enrobé bitumineux selon la méthode normalisée EN 13 108. L'essai Marshall permet d'avoir les caractéristiques suivantes :

- Masse volumique apparente
- La stabilité S [kN] qui est la résistance maximale à l'écrasement.
- Le fluage F [mm] qui est l'affaissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture (en unité de 0,25 mm).
- La compacité

II.6.2. Essai Duriez

L'essai Duriez est un essai qui permet de déterminer la résistance à la compression simple d'un enrobé bitumineux et d'évaluer l'affinité granulats-liant en présence d'eau, à une température de 18°C. On compacte les éprouvettes d'enrobé et après refroidissement, elles sont démoulées pour :

- La mesure de la masse volumique de l'enrobé par pesée hydrostatique ;
- La mesure de la résistance à la compression simple à 7 jours dans l'eau ;
- La mesure de la résistance à la compression simple à 7 jours dans l'air.

Après ce laps de temps, les éprouvettes sont écrasées dans une presse statique. La résistance à la compression simple avec ou sans immersion préalable est le rapport de la charge nécessaire à l'écrasement sur la section circulaire de l'éprouvette. En faisant des

moyennes, on obtient deux résistances différentes selon le mode de conservation. Soient $R'c$ pour les éprouvettes stockées en immersion et Rc pour les éprouvettes stockées dans l'air. Le résultat de ce test est le rapport $R'c / Rc$ qui doit entrer dans une fourchette déterminée par des normes.

Chapitre III : GEOLOGIE DES GRANITES, BASALTES ET POUZZOLANES

III.1. Le granite [7]

Le granite est les roches qui lui sont associées constituent la majeure partie de la croûte continentale de la terre. Les roches granitiques représentent près de 75 % de la surface des roches exposées.

III.1.1. Définition et origine

Le granite, se définit comme étant une roche plutonique magmatique à texture grenue. Le mot granite vient d'ailleurs du latin **granum**, qui signifie grain. Le granite résulte du refroidissement lent, en profondeur, de grandes masses de magma intrusif qui formeront le plus souvent des plutons. Ces plutons, grâce à l'action de l'érosion qui a décapé les roches sus-jacentes, affleurent en surface.

Le granite est donc une roche magmatique qui se positionne dans les zones profondes de chaînes de montagnes lors de leur formation. Le granite n'est ainsi visible à la surface terrestre que parce qu'au fil du temps, les roches supérieures qui l'ont recouvert se sont érodées.

III.1.2. Processus de formation des granites

Comme il a été énoncé précédemment, les granites sont d'origine plutonique, par opposition aux roches effusives d'origine volcanique comme le basalte. C'est une roche d'origine profonde, il découle du refroidissement très lent du magma liquide, mélangé à d'autres roches, qui, en remontant à la surface de l'écorce terrestre, subit un processus de cristallisation et de solidification. Les minéraux cristallisent alors dans un certain ordre: d'abord les micas, puis les feldspaths, enfin les quarts.

Le granite fait ainsi son apparition avec le soulèvement des montagnes. Lorsque l'érosion agit, le granite se rapproche de la surface et finit par apparaître. C'est pour cela que le granite se trouve plus dans les massifs anciens usés que dans les jeunes.

Toutefois, certains granites sont issus de la fusion de la croûte continentale lors d'une collision entre deux plaques tectoniques. Lorsque les plaques continentales entrent en collision, cela engendre la formation de grandes zones de déformation, mais aussi la production de granites, laquelle constitue un des moyens les plus efficaces d'évacuer l'énergie

de la collision, soit thermiquement par la fusion de la croûte, soit mécaniquement par les cisaillements verticaux ou horizontaux. Par ailleurs, les granites constituent le principal moyen de transfert des éléments, notamment ceux qui produisent de la chaleur de la croûte inférieure à la croûte supérieure.

III.1.4. Les constituants des granites

Le granite est une roche acide, c'est-à-dire riche en silice, formée de minéraux en grains ou cristaux tous visibles à l'œil nu. Elle est composée principalement de quartz, de feldspaths potassiques, et de micas.

- Le Quartz (SiO_2) : caractéristique de la richesse en silice, les grains sont de formes irrégulières et d'un gris vitreux et ont un aspect translucide.
- Le Feldspaths (Ba, Ca, Na, K, NH_4) $(\text{Al B Si})_4 \text{O}_8$: cristaux réguliers quelquefois de grande taille et de couleur variable (blanche, grisâtre ou rosée) qui donnent la couleur au granit
- Le Micas $[(\text{SiAl})_2 \text{O}_5]_n$: paillettes brillantes de couleur noire (biotite) ou argentée (muscovite).

Par ailleurs, ils peuvent contenir également de la hornblende, de la magnétite, du grenat, du zircon et de l'apatite. En tout, il existe aujourd'hui plus de 500 couleurs de granites différentes.

La densité moyenne du granite est de 2.7 et sa composition chimique moyenne est de:

- 74,5 % de SiO_2
- 14 % d' Al_2O_3
- 9,5 % de (Na_2O , K_2O)
- 2 % d'oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca).

III.1.5. Les propriétés de granite

Pour pouvoir déterminer les propriétés du granite, nous verrons dans un premier temps sa typologie, ensuite nous étudierons ses principales caractéristiques.

III.1.5.1. Typologie et caractéristique

a. Type de granite

Il existe plusieurs types de granite, voici les cinq principaux.

- **Les granites calco-alkalins** : d'origine mixte, c'est-à-dire mantellique et cristal. Ils sont en majorité dans les zones de subduction où ils participent à la formation et au recyclage de la croûte continentale. Ce sont les granites de type I. Les granites calco-alkalins sont présents dans la croûte continentale proche de la discontinuité de Mohorovičić. Ils ont la particularité d'être certes grenus, mais surtout, la présence de microlites prouve l'activité des enveloppes internes de la Terre.
- **Les granites tholéitiques ou plagiogranites** : Associés à la croûte océanique, ils résultent d'une différenciation poussée d'un magma à l'origine basaltique. Les plagiogranites sont très riches en feldspaths plagioclases, d'où leur teinte claire. Des plagiogranites peuvent être observées dans les ophiolites du Chenaillet.
- **Les granites alcalins** : issus d'un magmatisme alcalin typique d'un contexte distensif. D'origine mantellique ce sont les granites de type M, ils ont un rôle essentiel dans la formation de la proto-croûte. Ils sont surtout constitués de minéraux appelés feldspaths alcalins. Ils sont reconnaissables par leur pâleur. On y trouve peu de pyroxène, mais plus de quartz. Ils sont rares et nécessitent des forages quasi-rivaux.
- **Les leucogranites** : Les leucogranites du grec « leucos » qui signifie « blanc » sont relativement riches en alumine et sont caractérisés par la présence de muscovite, c'est-à-dire du mica blanc à côté de la biotite.
- **Le granite d'anatexie**, du grec « ana » qui signifie « en haut » et « taxis » qui veut dire « fusion », a un aspect différent des autres granites. Il a souvent des hétérogénéités, avec des minéraux orientés. Il est issu de la fusion partielle de la croûte continentale. Cette fusion opère selon deux contextes géodynamiques différents. Dans les zones de subduction, cette fusion a lieu suite à l'hydratation des roches de la croûte continentale par l'eau provenant de la déshydratation de la croûte océanique subducte. Dans les zones post-collision, la fusion est rendue possible par l'augmentation de la température grâce à la désintégration radioactive des éléments de la croûte continentale. Le liquide peut alors rester sur place et constituer des batholites ou bien migrer via des accidents tectoniques. Dans les deux cas il est dit concordant et ne digère pas l'encaissant. Le granite obtenu peut former des mylonites ou des gneiss mis à jour par l'érosion. Ces granites sont de type S c'est-à-dire qu'ils sont originaires de la croûte continentale sédimentaire riche en aluminium.

b. Caractéristique du granite

Les granites sont des roches dures, non calcaires, d'aspect cristallin et de couleur foncée. Voici les principales caractéristiques du granite :

- Plus dur que l'acier et aussi léger que l'aluminium.
- résistance à la compression du granite supérieure à celle des bétons haute performance et très résistant aux chocs
- Incombustible.
- Les minéraux silicatés tels le quartz et le feldspath étant pratiquement inaltérables, le granite résiste bien aux ambiances agressives sans changement de teinte. Les acides, sauf l'acide fluorhydrique, n'ont que très peu d'action sur le granite
- Inusable : Sa dureté lui confère dans le temps une parfaite tenue de son état de surface. Sa résistance à l'usure le destine particulièrement aux revêtements de sols.
- Il est non conducteur et amagnétique.

Les données suivantes résument les caractéristiques physiques des roches granitiques :

- Masse volumique réelle : 2 660 kg/m³
- Porosité : 0,41%
- Coefficient d'absorption d'eau : 0,9%
- Usure au disque métallique : 24,1 mm
- Compression uniaxiale : 171,7 MPa
- Flexion : 16 MPa
- Gélivité directe (48 cycles) : Non gélif 240 cycles avant altérations visibles
- Module d'élasticité dynamique : 49,788 MPa

III.1.5.2. Utilisation du granite

Le granite constitue l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le domaine du bâtiment et des travaux publics. Son usage est ainsi multiple et varié. En voici une liste non exhaustive de son utilisation :

- Construction, les maisons à l'aide de blocs granitiques ;
- Empierrement ;
- Sculpture ;
- Comptoir ;
- Fabrication de monuments funéraires ;
- Dallage ;

- Bordure de trottoir ;
- Pavés pour la voirie ;
- Ornement de cuisines.
- Ornement de salles de bain ;

III .2. Les basaltes [w9]

III.2.1. Définition

Le basalte est une roche magmatique effusive à texture microlithique. De couleur sombre, il est donc issu du refroidissement du magma au contact de l'eau ou de l'air. Le basalte est le constituant de la croûte océanique. Le basalte est emprunté aux latins *basaltes*, terme dont on dit souvent qu'il est dérivé d'un terme éthiopien signifiant « roche noire ».

III.2.2. Formation du basalte [w10]

Le basalte est d'origine volcanique, quand les coulées de lave refroidissent. Quand le volcan se trouve sous lamer, les basaltes ont une forme particulière, aplatis. Cette forme est causée par le refroidissement rapide de la lave dans l'eau. Le basalte est la plus courante des roches magmatiques volcaniques, et également la roche la plus répandue à la surface de la terre. La formation du basalte la fusion partielle du manteau supérieur. Le basalte constitué quasi-totalité des roches continentales et océaniques ; autrement dit, il constitue l'essentiel de la croûte terrestre, qui s'étend sur une profondeur moyenne.

Les roches basaltiques constituent les plus grands partis du plancher océanique. En effet le basalte est principalement formé par la remonte de la lave le long des dorsales océaniques, la zone d'expansion des fonds océaniques ou production constate de croûte compense les pertes par subduction.

III.2 3. Constituants du basalte

Le basalte est caractérisé par une faible teneur en silice. Les laves basaltiques se refroidissent rapidement, ce qui ne permet pas à la roche basaltique de cristalliser entièrement. Ainsi, le basalte est le plus souvent de texture microlithique, avec une matrice de verre renfermant de silicates à grain fin.

Du point de vue géochimique, la composition du basalte est assez constatée : elle est caractérisée par des teneurs élevées en fer, magnésium et calcium.

Les principaux constituants sont :

- 50% de plagioclases

- 25 à 40% de pyroxènes
- 0 à 25% d'olivine
- 2 à 3% de magnétite

III.2.4. Propriétés du basalte

III.2.4.1. Typologie du basalte

Il existe trois types des basaltes :

- Les basaltes tholéitiques proviennent d'une faible profondeur du manteau, énormément de fusion partielle jusqu'à 30%. Ce type de basalte est fortement saturé en silice.
- Les basaltes alcalins sont caractérisés par un très faible taux de fusion partielle. Ils sont donc trop sous-saturés en silice, mais plus riche en sodium et potassium. Leur origine est plus profonde dans le manteau.
- Enfin, les basaltes orogéniques ou calco-alcalin sont très spécifiques, car ils se forment à partir de phénomène volcanisme de subduction.

III.2.4.2. Caractéristiques du basalte [w11]

- Le basalte est formé principalement de silicates de fer et magnésium, plagioclase calcique et pyroxène ;
- La température de fusion de basalte est très élevée, de l'ordre de 1 200°C. Le basalte est une roche lourde, d'une densité de l'ordre de 3.
- Le basalte présente des caractéristiques techniques non sujettes à altération, un degré élevé de compacité avec excellentes résistances aux sollicitations mécaniques et aux chocs, une faible gélivité et une résistance élevée au glissement ;
- Résistance mécanique élevée
- Dur et peu poreux
- Masse volumique : 2,7 g/cm³
- Couleur noir ou sombre

III.2.5. Utilisations du basalte

Les basaltes sont utilisés :

- Comme matériau de construction et statuaire

- Pour réaliser le ballast des voies ferrées
- Valoriser comme de granulats

III.3. La pouzzolane [8]

III.3.1. Définition

La pouzzolane est une roche naturelle produite lors d'une éruption volcanique. Elle est généralement constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche et présente une structure alvéolaire. Sa couleur peut être rouge (rouge brique), noire et même grise. Ce sont des matériaux légers de densité inférieure à 1, poreux, abrasifs, réfractaires et isolants [8].

Le terme pouzzolane désigne tout matériau tant naturel qu'artificiel riche en silice et alumine apte à réagir en température ambiante avec la chaux en solution aqueuse afin de donner naissance à des produits ayant de propriétés liantes, principalement des silicates et aluminates de calcium [9]

III.3.2. Formation de la pouzzolane [9]

La pouzzolane appartient à la famille des roches éruptives, provenant de la consolidation du magma émanant des profondeurs de l'écorce terrestre. Dans la pouzzolane on trouve des scories qui indiquent la profondeur du magma.

- Magma de surface : Grès carbonifère... autres roches de surface ;
- Magma intermédiaire : Roches métamorphiques ;
- Magma profond : Péridotite.

En général, on distingue deux types de roches éruptives : les roches plutoniques et les roches volcaniques. Les roches volcaniques se divisent en deux groupes tels que les laves et les projections, et les pouzzolanes appartiennent à ce dernier groupe. Les volcans caractérisés par des explosions violentes projettent des débris de tout calibre. Les matériaux les plus fins, constitués de cendres, peuvent être transportés par le vent et tomber en pluie loin du centre d'émission, c'est le cas des pouzzolanes.

III.3.3. Différents types de pouzzolane [10]

On distingue deux groupes :

- Les pouzzolanes naturelles
- Et les pouzzolanes artificielles.

III.3.3.1. Pouzzolane naturelle

Les pouzzolanes naturelles sont constituées par des matériaux possédant des propriétés pouzzolaniques à l'état naturel qui peuvent être améliorées par un traitement approprié d'activation. Après, calcination dans un four ou transformation, puis broyage, on peut en obtenir une fine poudre.

Exemples : les tufs volcaniques, lapillis, ponces, scories et bombes, etc.

III.3.3.2. Pouzzolanes artificielles

Les pouzzolanes artificielles sont des matières essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des différentes industries. On en distingue différents types :

- Soit des résidus de combustion industrielle tel que : la cendre volante, cendre de bois ou d'houille,
- Soit des débris de brique et de tuile fabriquée avec des argiles pures à des températures modérées,
- Le schiste cuit, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite.

III.3.4. Constituants des pouzzolanes [11]

En général, la portion active des pouzzolanes est constituée par les phases amorphes ou vitreuses. L'activité pouzzolanique des phases amorphes ou vitreuses ne résulte pas directement de leur composition chimique, elle provient d'une altération des minéraux originaux subséquente à une exposition prolongée à l'eau contenant du CO₂ et à la vapeur d'eau surchauffée.

L'activité pouzzolanique des pouzzolanes naturelles peut être aussi due au caractère zéolithique de leurs constituants tels que l'analcime Na₂OAl₂O₃4SiO₂2H₂O. Pour les tufs volcaniques dont la teneur en eau est élevée, l'activité pouzzolanique provient des composés zéolithiques, tandis que pour ceux dont la teneur en eau d'hydratation est faible et dont la solubilité dans les acides et bases est plus élevée, la phase vitreuse jouerait le rôle prédominant.

Pour les roches sédimentaires, l'activité pouzzolanique repose sur la teneur élevée en silice hydraté possédant une structure poreuse et une grande surface interne. Elle résulte en outre d'une certaine quantité de cristobalite et d'impuretés argileuses.

III.3.5. Caractéristiques des pouzzolanes [12]

III.3.5.1. Couleur

La pouzzolane a une couleur qui varie généralement du noir au rouge, marron à gris, exceptionnellement jaune. Cette couleur est liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques, soit :

$$f = \frac{FeO}{Fe_2O_3}$$

- Si $f < 0,02$: la coloration est uniformément rouge pour les matériaux réduits en fines ;
- Si f voisine de $0,10$: la coloration vire au brun
- Si f atteint $0,27$: les produits sont uniformément noirs

III.3.5.2. Compositions chimiques

Les compositions chimiques des pouzzolanes peuvent être variées selon le gisement mais leur caractère inerte fait que ce n'est pas un problème.

Tableau 4 : Compositions chimiques moyennes de la pouzzolane

Eléments majeurs	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Teneurs maximales	40-42%	15-30%	10-15%

Le tableau 4 montre que les éléments majeurs constituant les pouzzolanes sont le Silice, l'Aluminium et le Fer. La silice est en plus grande quantité par rapport aux autres éléments comme le fer et l'aluminium.

Les pouzzolanes sont des substances incapables de faire prise par elle-même. L'addition de 1% d'alcalis améliore la capacité de fixation de la chaux par les pouzzolanes. Les pouzzolanes additionnées au ciment Portland avant broyage améliorent les résistances à long terme, la résistance chimique et diminuent le retrait. La présence synchronique de chaux et d'une base alcaline est susceptible d'activer le durcissement du produit gâché surtout si le mélange contient outre la pouzzolane, du laitier granulé.

La pouzzolane qui a un pouvoir pouzzolanique très faible en présence de la chaux, peut acquérir un pouvoir pouzzolanique élevé dès qu'elle est mise en présence de solution de soude ou de potasse.

III.3.5.3. Caractéristiques mécaniques

- Masse volumique apparente : $1,067 \text{ T/m}^3$
- Masse spécifique : $2,010 \text{ T/m}^3$

- La densité varie en fonction de la granulométrie (les éléments les plus fins sont les plus denses). A l'état brut, ces matériaux présentent une densité supérieure à 1, exception faite des granulométries grossières (au-delà de 10 à 20 mm) ;
- La structure alvéolaire des pouzzolanes et leur porosité confèrent à ces matériaux une capacité d'absorption d'eau (20 à 30% de leur poids sec) et d'isolation thermique et /ou phonique ;
- En ce qui concerne leur comportement thermique, la pouzzolane a une température moyenne de fusion 1140°C et présente une mauvaise conductibilité thermique ;
- Les pouzzolanes sont riches en silice et alumine capable de réagir avec la chaux en présence d'eau et de former par cette réaction des produits aux propriétés liantes ;
- Les pouzzolanes améliorent l'ouvrabilité, la plasticité, la rétention d'eau et une bonne homogénéité couplées à une réduction de la tendance au ressuage. Elles réduisent la chaleur d'hydratation, cet effet se traduit par une réduction sensible de la fissuration ;
- Les pouzzolanes peuvent améliorer la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables ;
- Les pouzzolanes peuvent améliorer la cohésion interne ainsi qu'une augmentation de compacité de la pâte de ciment. La réduction de porosité qui en découle pour toute la matrice ciment se traduit par une série d'effets très favorables :
 - Accroître la résistance finale
 - Diminuer légèrement le retrait et le fluage
 - Réduire la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité
 - Améliorer la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques

III.3.5.4. Structure et texture

Les caractéristiques structurales des pouzzolanes peuvent être résumées par leur morphologie vacuolaire, et leur forme déchiquetée. Les vésicules de dimensions variables sont dues aux gaz emprisonnés dans la lave : plus celle-ci est fluide, moins elle est vacuolaire.

Les pouzzolanes peuvent présenter une structure intacte, ou plus ou moins modifiée

chimiquement, selon l'âge du volcanisme auquel elles appartiennent et selon leurs conditions de conservation.

Les explosions volcaniques façonnent la forme extérieure des grains provoquant des éjections des lambeaux des laves constitutifs des pouzzolanes naturelles à la suite du refroidissement. Cette structure donne aux granulats une porosité distincte, et un haut pouvoir d'isolation thermique.

III.3.5.4. Utilisations

Les pouzzolanes ont des domaines d'utilisation tels que :

➤ **Utilisation pour la cimenterie :**

La pouzzolane est à la base de la fabrication de certains ciments. Elle est l'un des principaux constituants de la fabrication. Son pouvoir pouzzolanique permet de fixer d'une part la chaux libre insoluble et de l'empêcher de se dissoudre et de réagir après la prise du ciment et d'autre part de fixer la portlandite (Ca(OH)_2) produite lors de l'hydratation du ciment.

➤ **Utilisation pour les bétons légers :**

La pouzzolane est définie par le centre scientifique et technique du bâtiment. Ce matériau est considéré comme un agrégat répondant à la définition suivante : la pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories volcaniques, elle possède une structure scoriacée ou alvéolaire, elle est essentiellement composée de silice, d'alumine, et d'oxyde de fer. Elle doit renfermer de 0,5% de soufre et de moins de 1% de SO_3 . Les pouzzolanes qui sont des granulats légers se prêtent bien à la confection de bétons légers.

➤ **Utilisation pour les travaux publics :**

Les pouzzolanes sont utilisées comme matériaux de remblais légers pour la réalisation de terrains de sport : piste d'athlétisme, amendement des terrains gazonnés (pouzzolane, très poreuse, permet à l'eau de s'écouler et d'évacuer très rapidement la pelouse), carrière à chevaux... D'une manière générale, ce matériau est plus léger que d'autres, type silicocalcaire, ce qui permet de mettre en œuvre certains remblais allégés : terrain trop faible pour recevoir une route, remblaiement sur ouvrage souterrains. La densité moyenne de la pouzzolane une fois en place tourne autour de $1,5 \text{ T/m}^3$ au lieu de $1,9 \text{ T/m}^3$ pour les matériaux classiques.

➤ **Utilisation dans l'industrie :**

Additionnées de ciment, les pouzzolanes permettent la confection des matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées, de parpaings, de bétons légers pour la

construction des bâtiments. Elles interviennent aussi dans la fabrication d'argiles à tuiles. Entre autre, elles ont des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique.

➤ **Utilisation dans l'agriculture**

Les pouzzolanes servent pour le drainage des sols argileux, et elles sont des constituants pour l'amendement de ces derniers. Elles sont utilisées dans la fabrication des terreaux, dans la fixation des plantes en conteneurs et les cultures en hors sol. En outre, les pouzzolanes sont utilisées comme filtres d'eau potable pour les stations d'épuration.

PARTIE II :
ETUDES
EXPERIMENTALES

La qualité des enrobés bitumineux dépend des bitumes utilisés, des granulats, de fine d'ajout et la cohésion entre le bitume et les granulats. Il est indispensable de caractériser ces différents constituants afin d'avoir des données scientifiques nécessaires à la formulation du béton bitumineux. La quasi-totalité de nos essais ont été effectuée dans le Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment qui est un grand laboratoire de Madagascar.

Ainsi, dans cette partie, nous allons montrer les méthodes de caractérisation et les caractéristiques des matériaux qu'avons utilisés dans l'amélioration des caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux. Puis, nous présentons les différents essais de formulation des enrobés que nous avons adoptés et ainsi que les caractéristiques des enrobés de chaque formulation.

Chapitre IV : PRESENTATION ET CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES

IV.1. Les matières premières

Nous avons utilisé des granulats en provenance de Wandan Comores, qui étaient disponible au LNTPB, en raison de leurs faibles teneurs en fine. Ces granulats sont respectivement de classe 0/4, 4/6 et 6/10 ;

Les minerais d'ajout comme filler d'amélioration que nous avons utilisés sont extrait dans différentes carrières :

➤ Le filler de pouzzolane provient de la carrière de Marontampona Betafo sur les coordonnées Laborde suivantes :

- X : 451 200 m
- Y : 686 000 m

➤ Le filler de granite provient de la carrière de Bebozaka PK 86 + 895 RN 43 sur les coordonnées Laborde suivantes :

- X : 708 390,77 m
- Y : 78 486 20,23 m

➤ Le filler de basalte provient de la carrière d'Antsofombato Ambohibary sur les coordonnées Laborde suivantes :

- X : 471 280 26 m
- Y : 719 766 80 m

IV.2. Méthodes des caractérisations

IV.2.1. Les granulats

IV.2.1.1. Détermination des caractéristiques physiques

a. Masse volumique apparente ρ

Les protocoles de mesure des masses volumiques (apparente et absolue) sont régis par les normes NF P 18-554 et NF P 18-555. L'essai consiste à remplir d'échantillon un moule, de volume $V = 1000$ ml à l'aide d'un densitomètre.

a.1. Appareillage

- Un densitomètre et un moule ;
- Une règle à araser ;
- Une balance de précision

a.2. Mode opératoire

- Placer l'entonnoir au-dessus du centre du moule et fermer son ouverture ;
- Verser une quantité de l'échantillon dans l'entonnoir ;
- Faire passer l'échantillon dans le moule en ouvrant l'ouverture de l'entonnoir ;
- Refermer l'ouverture de l'entonnoir lorsque l'échantillon déborde ; araser à la règle et peser le contenu.

$$\gamma_d \text{ (T/m}^3\text{)} = \frac{ms}{V}$$

b. Masse spécifique γ_s

L'essai consiste à mettre un échantillon de masse m dans un pycnomètre, à peu près 2/3 du volume, et on y verse de l'eau distillé.

b.1. Appareillage

- Pycnomètres ;
- Balance de précision.

b.2. Mode opératoire

Dans notre essai, la méthode utilisée est la méthode au pycnomètre.

- Prélever une prise du matériau ;
- Séparer les agglomérats des particules par pilonnage ;
- Dessécher totalement l'échantillon à 105°C ;
- Quarter l'échantillon ;
- Peser le pycnomètre vide ;
- Remplir à moitié le pycnomètre avec de l'eau distillé et peser l'ensemble ;
- Verser ensuite l'échantillon dans le pycnomètre à 1/3 de son volume ;
- Agiter soigneusement pour enlever les vides ;
- On le laisse se décanter pendant quelques heures ;
- Remplir totalement le pycnomètre ;
- Peser l'ensemble.

$$\gamma_s \text{ (T/m}^3\text{)} = \frac{ms}{V_s}$$

c. Equivalent de sable

L'essai consiste à verser un échantillon de sable de volume V (volume du godet) dans une éprouvette contenant une solution lavante afin de déterminer sa propreté.

c.1. Appareillage

- Eprouvette à double trait de jauge ;
- Tube laveur, entonnoir, piston, règle, bouchon ;
- Solution lavante composée de glycérine, formol, et du NaCl ;
- Agitateur électrique ;
- Balance de précision ;
- Un godet et Chronomètres.

c.2. Mode opératoire

- Remplir une éprouvette avec la solution lavant jusqu'au premier trait de jauge ;
- Verser du sable dans l'éprouvette contenant la solution, et on commence le chronomètre ;
- Boucher l'éprouvette et Laisser reposer pendant 10min ;
- Fixer sur une machina d'agitation automatique puis agiter à l'éprouvette 90 cycles pendant 30s ;
- Remplir l'éprouvette avec une solution lavante jusqu'au deuxième trait de jauge pour enlever le vide ;
- Laisser décanter pendant 20min ;
- Faire baisser le piston dans le liquide pour séparer le floculat de l'eau ;
- Mesurer les hauteurs des sables et des floculant visuellement et au piston ;
- L'équivalent de sable est donné par la formule ;

$$ES = \frac{h2}{h1} * 100$$

- h1 : hauteur totale (sable + fine) ;
- h2 : hauteur des sédiments (sable).

Interprétation

D'après la norme NF EN 933-8, on a :

- un sable propre si $ES > 61$;
- un sable sale si $ES \leq 61$.

IV.2.1.2. Détermination des caractéristiques géométriques**a. Analyse granulométrique**

Elle consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis à mailles carrés, les granulats en plusieurs classes granulaires de taille décroissante ;

a.1. Appareillage

- Série de tamis ;
- Cuvette ;
- Balance de précision ;

a.2. Mode opératoire

Soit M la prise d'essai nécessaire pour l'analyse granulométrique par tamisage. La prise d'essai est en fonction de la dimension de plus gros grain observé visuellement notée D. M est défini par la marge suivante : $300 \cdot D \text{ (mm)} < M \text{ (g)} < 500 \cdot D \text{ (mm)}$

- Peser une quantité de masse M de l'échantillon ;
- Former la série de tamis et introduire la masse M d'échantillon puis tamiser. Chaque tamis va retenir des grains de diamètre supérieur à celui de ses mailles ;
- Peser et noter le refus de chaque tamis ;
- Calculer le pourcentage de refus cumulés correspondant à chaque tamis ;

b. Module de finesse des sables

C'est une grandeur qui permet d'évaluer la finesse d'un corps sous forme de poudre ou de granulat. Elle est égale à la somme des refus sur les tamis de la série normalisé divisé par 100. Le module de finesse est une grandeur très importante, en particulier pour les sables.

$$Mf = \frac{\sum (\text{Refus cumulés des tamis (5,2.5,1.25,0.63,0.315 et 0.16)})}{100}$$

c. Coefficient d'aplatissement CA

L'essai consiste à tamiser le refus de la maille carré par une grille à fente correspondant afin de déterminer la forme de l'échantillon.

c.1. Appareillage

- Grille en fente ;
- Balance

c.2. Mode opératoire

Le coefficient d'Aplatissement et l'analyse granulométrie se fait en même temps, le diamètre de tamis correspond à l'écartement des grilles.

- Tamiser le refus sur le tamis à l'aide d'une grille et récupérer le passant sur la grille puis peser, soit Me ;
- En plus, peser le refus sur la grille soit Mg ;

La valeur du coefficient d'Aplatissement CA est calculée suivant la formule ci-dessous :

$$CA = \frac{\sum P}{\sum M}$$

$\sum P$: somme de la masse Me et $\sum M$: somme de la masse Mg

IV.2.1.3. Détermination des caractéristiques mécaniques

a. Essai Los Angeles

L'essai consiste à tamiser une masse m dans des tamis d'ouverture D et d (suivant l'essai) et passer les refus de tamis d'ouverture d de masse 5000g dans l'appareil Los Angeles pendant 500 tr. C'est à dire introduire dans un cylindre horizontal une certaine quantité du granulat à étudier avec un certain nombre de boules d'acier et de vérifier la quantité de fine produite après un temps de rotation défini. Il permet de déterminer la résistance à la fragmentation de l'échantillon.

a.1. Appareillage

- Appareil Los Angeles ;
- Tamis d'ouverture de 10 à 14mm ;
- Balance de précision ;
- Etuve.



Photo 1 : Etuve



photo 2 : Appareil Los-Angeles

Source : Auteur

a.2. Mode opératoire

- Introduire les boulets correspondants à la classe granulaire choisie et 5000g d'échantillons de prise (le tamisât à 14mm et le refus de 10mm) dans l'appareil ;
- Mettre en marche la machine avec 500tr ;

- Recueillir l'échantillon à l'aide du bac placé sous la machine et tamiser à 1,6 mm d'ouverture ;
- Laver le refus du tamis à 1,6 mm et étuver à 105°C, peser et noter m' sa masse.

La valeur de Los Angeles est donnée par la formule ci-après :

$$LA = 100 * \frac{m'}{M}$$

- M : masse totale de l'échantillon
- m' : masse sèche de l'échantillon passant au tamis 1,6 mm

b. Essai Micro Deval

L'essai a le même principe que l'essai LA, il permet de déterminer la résistance à l'usure par frottement de l'échantillon, c'est-à-dire il consiste à mesurer l'usure des granulats produite par frottements réciproques dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies.

La masse de la prise est de 500g et l'appareil Micro-Deval est réglé à 12 000tr. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires 4/6,3 mm ; 6,3/10mm ; 10/14mm et 25/50mm. Il est préférable d'utiliser des charges abrasives lors des essais sur les gravillons entre 4 et 14 mm

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1,6mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité $100 * \frac{m}{M}$. Par définition, cette quantité sans dimension, est appelée, suivant la méthode employée :

- Coefficient micro-Deval Sec du granulat (MDS).
- Coefficient Micro-Deval en Présence d'Eau du granulat (MDE)

b.1. Appareillage

- Appareil Micro-Deval muni d'un cylindre en acier inoxydable contenant des petites billes ;
- Tamis d'ouverture 10 et 14mm ;



Photo 3 : Appareil Micro-Deval

Source : Auteur

b.2. Mode opératoire

- Introduire dans le cylindre 500g de prise d'essai et ajouter 2,5L d'eau ;
- Mettre le couvercle du cylindre ;
- Régler la vitesse de rotation du cylindre à 12 000tr ;
- Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat ;
- Laver soigneusement les granulats à l'intérieur du cylindre, recueillir l'eau et les parties minérales entraînées ;
- Passé le tout au tamis à 1,6mm d'ouverture ;
- Sécher le refus à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante, puis peser (soit m').

Le coefficient MDE est obtenu par la formule suivante :

$$\text{MDE} = \frac{M-m'}{M} * 100$$

- M : masse de prise d'échantillon
- m' : masse sèche de la fraction du matériau passant au tamis 1,6mm

IV.2.2. Le bitume

IV.2.2.1. Mesure de la pénétration DOW ou pénétrabilité à l'aiguille

Cet essai consiste à déterminer la classe du bitume à utiliser. Elle permet de mesurer l'enfoncement d'une aiguille type, soumise à une charge donnée dans la prise d'essai, dans des conditions normalisées.

Tableau 5 : Classification du bitume suivant l'indice de pénétrabilité

Classe	20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité (1/10 mm)	20 à 30 Très dur	35 à 50 Dur	50 à 70 Moins dur	70 à 100 Mou	160 à 220 Mou

a. Principe

L'essai consiste à faire fondre la prise d'essai à T 100°C, puis la refroidir et mesurer la profondeur à laquelle pénètre l'aiguille d'un pénétromètre.

b. Appareillage et description

- Gobelets : c'est un cylindre à fond plat en métal ou en verre ;
- Pénétromètre à l'aiguille : c'est une aiguille en acier conforme aux dimensions indiquées suivant :
 - o Diamètre : 0,14mm
 - o Longueur en acier poli : 50mm ;
- Bain thermostatique : capacité supérieur à 10L, avec une température réglable ;

c. Mode opératoire

c.1. Préparation de la prise d'essai

- Chauffer l'échantillon dans l'étuve à 100°C ;
- Agiter pour l'homogénéiser, puis verser dans le jusqu'à $\frac{3}{4}$ de son hauteur ;
- Placer dans un local entre 20 et 30°C pendant 1h à 1h 30mm ;
- Laisser refroidir puis placer dans un bain thermostatique à 25°C pendant 30mm.

c.2. Exécution de l'essai

- Placer la prise d'essai dans le récipient rempli d'eau suffisante provenant du bain pour recevoir complètement le gobelet ;
- Placer le récipient sur le plateau du pénétromètre ;
- Déplacer l'aiguille chargée de 100g pour qu'elle affleure en surface de la prise d'essai ;
- Ramener à zéro l'aiguille, et libérer l'aiguille pendant 5s ;
- La bloquer ensuite et mesurer la profondeur d'enfoncement en dixième de millimètre.

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.



Photo 4 : Bain thermostatique à 25°C



Photo 5 : Pénétration à DOW

Source : Auteur

IV.2.2.2. Mesure de la température bille-anneau ou point de ramollissement

Ce paramètre permet de déterminer la susceptibilité du liant aux variations de température. Le point de ramollissement Bille-Anneau est la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées.

a. Appareillage

- Anneau à épaulement en laiton ;
- Bille, Guide, Pince, Spatule ;
- Vase cylindre en verre ;
- Thermomètre.

b. Principe

Une bille d'acier d'une masse déterminée est placée sur une surface de prise d'essai du produit contenue dans un anneau. L'ensemble est chauffé dans l'étuve. La température de la pénétration de la bille dont le produit bitumineux devient assez mou sera la température correspondante du point de ramollissement.

c. Mode opératoire

c.1. Préparation de l'essai

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit assez fluide, puis verser l'échantillon dans deux anneaux placés sur une plaque rigide. Laisser refroidir pendant 30 min ;
- Après refroidissement, araser l'échantillon à l'aide d'une spatule pour enlever les excès ;

c.2. Exécution de l'essai

- Assembler l'appareillage : anneaux, thermomètre et guides en position correcte ;
- Remplir le vide avec de l'eau distillée à 5°C sur une hauteur comprise entre 102 et 108 mm ;
- Maintenir la température de 5°C pendant 15 min, en plaçant si nécessaire le vise cylindrique dans de la glace fondante ;
- Placer une bille à l'aide d'une pince au centre de chaque guide ;
- Chauffer l'ensemble en augmentant de façon uniforme la température de 5°C par minute. Noter la température indiquée par le thermomètre pour chaque ensemble anneau-bille.



Photo 6 : Appareils de mesure de la température bill-anneau

Source : Auteur

IV.2.2.3. Mesure de la Perte à la chaleur

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

a. Principe

Une prise d'essai est pesée puis chauffée à 163°C pendant cinq heures dans une étuve ventilée. Elle est à nouveau pesée pour déterminer sa perte en masse.

b. Mode opératoire

- Avant d'exécuter l'essai, homogénéiser l'échantillon et chauffer à la température minimale nécessaire pour éviter la formation des bulles d'air ;
- Prélever une prise d'essai de 50 g et introduire dans un gobet sec puis étuver à 165°C pendant 5h, et refroidir l'échantillon et après peser à 0,01 g près.

c. Calcul de la perte de la chaleur à 163°C

Si l'on note :

p1 – le poids du godet ;

p2 – le poids du godet + bitume avant l'étuvage;

p3 – le poids du godet + bitume après l'étuvage ;

Le poids de bitume avant l'étuvage Pb est donc : $P_b = P_1 - P_2$

Et la perte à la chaleur P4 correspond à : $P_4 = P_3 - P_2$

Le pourcentage de cette perte à la chaleur s'exprime par :

$$\% \text{ de la perte de la chaleur} = \frac{P_4}{P_b} \times 100$$

Pour trouver un résultat plus fiable, deux essais ont été effectués. La perte à la chaleur finale correspond à la moyenne des valeurs trouvées pendant ces deux essais.

IV.2.2.4. Mesure de densité

Elle consiste à déterminer le poids du bitume par mètre cube de liant à 25°C.

a. Appareillage

- Godet et son couvercle en plaque de verre ;
- Balance de précision.

b. Mode opératoire

La densité d'un matériau est le rapport entre sa masse volumique par la masse volumique de l'eau.

$$d = \frac{\rho}{\rho_w}$$

Puisque la masse volumique de l'eau est égale à 1g/cm³, la valeur de la densité d'un matériau est la même que la valeur de sa masse volumique.

b1. Détermination de la masse du bitume

Les valeurs suivantes sont notées pendant l'exécution de l'essai:

P0 – le poids du godet [g];

P1 – le poids du godet + Verre [g];

P3 – le poids du godet + Verre + bitume [g];

La masse P4 de bitume seul est donc :

$$P_4 = P_3 - P_1 \text{ (g)}$$

b2. Détermination du volume du bitume

Soient les valeurs suivantes :

- P2 – le poids du godet + Verre +Eau_1 [g];
- P5 – le poids du godet + Verre + bitume + Eau_2 [g];
- Eau_1 correspond à la valeur du volume V1 du godet seul tandis que Eau_2 correspond à V la valeur du poids P6 d'eau restant ;
- Le Poids P6 d'eau restant est donné par : $P6 = P5 - P3$ [cm³]

Etant donnée la masse volumique de l'eau est égale à 1g/cm³, nous pouvons directement trouver :

- la valeur V1 volume du godet seul par : $V1 = P2 - P1$ [cm³]
- D'où, le volume du bitume donné par : $V2 = V1 - P6$ [cm³]

IV.2.2.5. Indice de pénétrabilité

L'indice de pénétrabilité est une caractéristique très importante du bitume. Il sert en particulier à choisir le type de bitume approprié pour une application donnée. Le facteur le plus commodément employé pour exprimer la relation consistance-température est l'indice de pénétrabilité ou IP. Il peut se calculer de deux façons :

a. Par la mesure des pénétrabilités à deux températures différentes

C'est la méthode la plus précise et la plus universelle. Dans cette première méthode, IP est obtenue à partir de la formule suivante :

$$IP = \frac{\log P1 - \log P2}{T1 - T2} = \frac{1}{50} \times \frac{20 - IP}{10 + IP}$$

P1, la pénétrabilité du bitume à la température T1

et P2, la pénétrabilité du bitume à la température T2

b. Par la mesure du point de ramollissement et d'une pénétrabilité

La pénétrabilité d'un bitume à la température du point de ramollissement correspond en moyenne pour la plupart des bitumes à une valeur de 800. On obtient ainsi la valeur de l'Indice de pénétrabilité IP par la formule suivante :

$$IP = \frac{\log 800 - \log P25}{T^{\circ}BA - 25} = \frac{1}{50} \times \frac{20 - IP}{10 + IP}$$

P25 la pénétrabilité à 25°C

et T°BA la température Bille-Anneau

Le bitume est d'autant moins susceptible que l'IP est plus élevé en valeur algébrique :

- Le bitume très susceptible possède un $IP < 0$;
- Le bitume susceptible (bitume routeur) correspond à un IP au voisinage de 0 ;
- Le bitume peu susceptible possède un $IP > 0$ (en général entre 2 et 8)

Dans notre cas, nous avons utilisé la deuxième formule :

$$IP = \frac{\log 800 - \log P25}{T^{\circ}BA - 25} = \frac{1}{50} \times \times \frac{20 - IP}{10 + IP}$$

IV.2.2.6. Test d'Adhésivité (NF EN 13614)

a. Principe

Cet essai permet d'apprécier l'affinité du liant-granulat. L'essai d'adhésivité consiste à mélanger 5 g de liant avec 100 g de granulat dans un récipient contenant de l'eau distillée et porter à la température de 60°C pendant 16 h. On calcule le pourcentage de surface recouverte de liant.

b. Appareillage

- Etuve, Spatule, Capsules métalliques ;
- Bêchers de 400ml ;
- Verres remonte éprouvette en verre de 250 à 500 ml.

c. Mode opératoire

- Peser 100 g de granulat lavés et séchés puis verser dans un bôcher ;
- Peser encore 5g de bitume puis verser dans autre bêchers ;
- Etuver le bêcher contenant le bitume à 105°C jusqu'à ce que le bitume se ramollisse ;
- Verser les granulats puis agiter pendant quelques minutes pour couvrir les surfaces des granulats avec le liant ;
- Ajouter 300 ml d'eau distillée à température ambiante ;
- Recouvrir le bêcher par un verre de montre et placer à 60°C pendant 16h ;
- Observer les surfaces recouvertes d'un film de liant.

ADHESIVITE =(%) pourcentage de surface de granulat recouverte d'un film de bitume. (Si le granulat est entièrement recouvert, l'adhésivité =100. Si le bitume est séparé du granulat, l'adhésivité =0)

Les températures de chauffage utiles sont données dans le tableau 6 suivant

Tableau 6 : Température de chauffage du liant et des granulats

Liant/ classe	Température de chauffage du liant (°C)	Température de chauffage du granulat (°C)
Bitume pur 50/70	100	140

**Photo 7 : Test d'adhésivité**

Source : Auteur

IV.2.3. Les Poudres - Surface spécifique

La surface spécifique est une méthode de mesure de la finesse des matériaux fins (ciment, filler, etc) utilisés comme additif dans un béton. Elle est basée sur une propriété de fractale, qui s'exprime en cm^2/g .

IV.2.3.1. Appareillage

- Cellule, Papier filtre ;
- Perméabilité de Blaine.

IV.2.3.2. Principe

Cette méthode consiste à mesurer le temps mis par volume d'air donné pour traverser un échantillon. En calculant la durée que met un gaz sous pression à traverser un volume donné de granules, on peut déduire la surface des granules.

IV.2.3.3. Mode opératoire

- Mettre la prise d'échantillons dans la cellule contenant du papier filtre ;
- Poser la cellule dans le perméabilimètre de Blaine ;
- Composer le liquide de mesure le temps de descente du liquide traversant le poudre d'échantillon jusqu'au niveau le plus bas.

IV.2.3.4. Mis au net

On a comme prise de l'échantillon $P = \gamma_s * 0,9496$

La surface spécifique Blaine est trouvée par la formule suivante :

$$ssb = 16,26 * \frac{\sqrt{t}}{\gamma_s \sqrt{n}}, \quad t : \text{température prise pendant l'essai}$$

CHAPITRE V : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX et ESSAI DE FORMULATION

V.1. Caractéristiques des granulats

V.1.1. Caractéristiques physiques

V.1.1.1. Sable 0/4

- Masse volumique apparente : **1,579 T/m³**
- Masse volumique réelle : **2,757 T/m³**
- Equivalent de sable : **82%**

V.1.1.2. Gravillons 4/6 et 6/10

Tableau 7 : masses volumiques des gravillons

Caractéristiques	G 4/6	G 6/10
Masse volumique apparente T/m ³	1, 374	1, 408
Masse volumique spécifique T/m ³	2,809	2,805

V.1.2. Caractéristiques géométriques

V.1.2.1. Analyses granulométriques

Les résultats des analyses granulométriques des granulats sont donnés par les tableaux et les figures ci-dessous :

Tableau 8 : Granulométrie des granulats sable : 0/4

d (mm)	0,080	0,125	0,200	0,315	0,500	2,00	2,50	4,00	5,00
Module AFNOR	20	22	24	26	28	31	35	37	38
Passant cumulé (%)	9	12	16	21	24	45	72	97	100

Tableau 9 : Granulométrie des granulats 4/6

d (mm)	2,50	4,00	5,00	8,00
Module AFNOR	35	37	38	40
Passant cumulé (%)	0	7	41	100

Tableau 10 : Granulométrie des granulats 6/10

d (mm)	4,00	5,00	8,00	10,0	12,5
Module AFNOR	37	38	40	41	42
Passant cumulé (%)	0	2	40	90	100

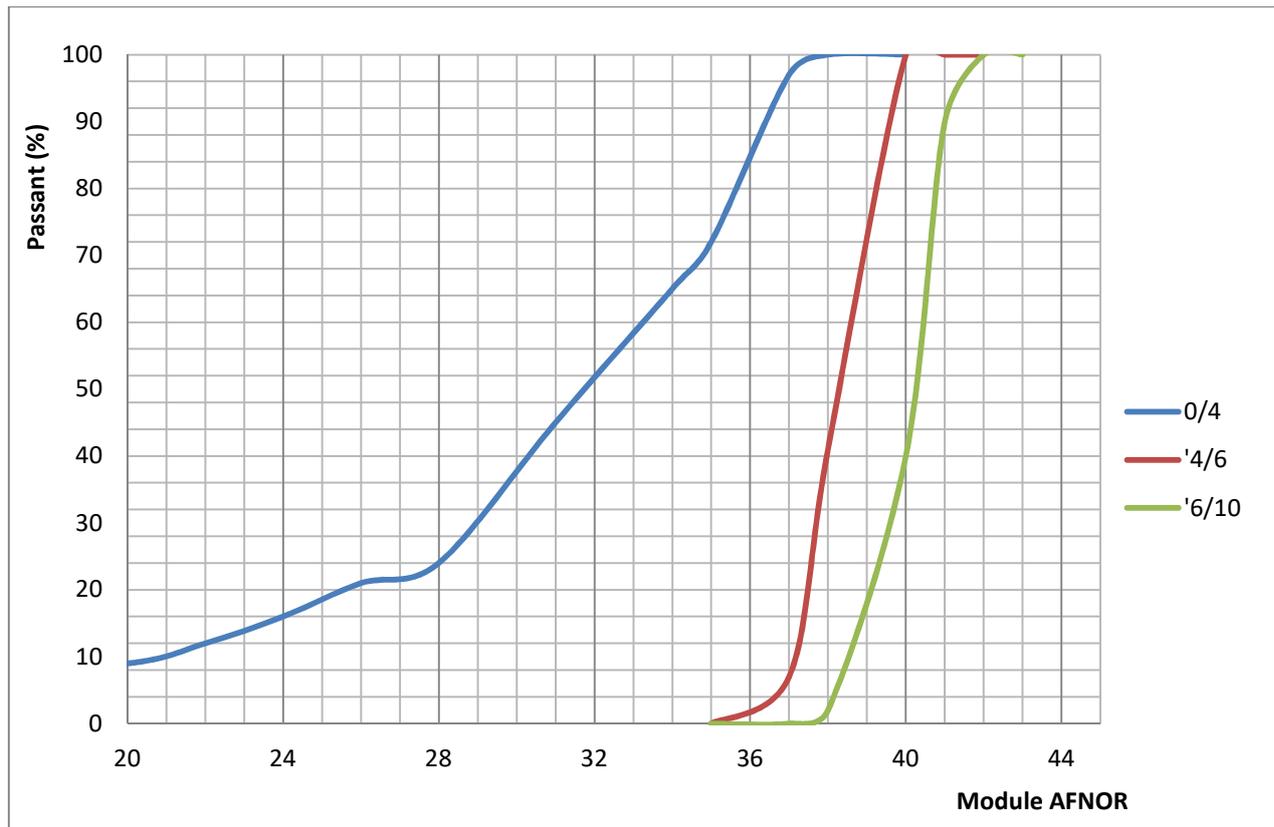


Figure 5 : Courbes granulométriques des granulats

Source : Auteur

D'après les courbes granulométriques, on détermine le coefficient d'uniformité des granulats C_u et le coefficient de courbure C_c pour caractériser la répartition en taille des éléments qui composent dans le matériau.

En appliquant la formule suivante :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{D^2_{30}}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

Tableau 11 : résultats de la coefficient d'uniformité et coefficient de courbure de la courbe

Désignations	C_u	C_c	Observations
0/4	20	3,2	Granulométrie étalée et mâle gradués
4/6	1,6	1,0	Granulométrie serrée et mâle gradués
6/10	1,3	0,8	Granulométrie serrée et mâle gradués

On observe que :

- Les granulats sont bien respectivement de classe 0/4, 4/6 et 6/10 ;
- Le sable S 0/4 présente une granulométrie étalée et pourra renfermer une teneur en éléments fins élevée et sable mâle gradué ;
- Les granulats 4/6 et 6/10 présentent une granulométrie très serrée et gravier mâle gradués.

V.1.2.2. Module de finesse

Le module de finesse M_f est une caractéristique importante surtout en ce qui concerne les sables. Un bon sable à béton doit avoir un module de finesse M_f compris entre 2,2 et 2,8 ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau ; au-dessus, le sable manque de fines et le béton y perd en ouvrabilité.

- Pour $1,8 < M_f < 2,2$, le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance ;
- Pour $2,2 < M_f < 2,8$, le sable est à utiliser si l'on recherche une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités ;
- Pour $2,8 < M_f < 3,2$, le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité et avec des risques de ségrégation ;
- Pour $M_f > 3,2$, le sable est à rejeter.

$M_f = \sum (\text{Refus cumulés}) / 100$ des tamis d'ouverture 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315 et 0.16mm. Soient des modules 23, 26, 29, 32, 35, 38.

$$M_f = \frac{\sum(78 + 74 + 65 + 62)}{100} = 2,8\%$$

$$M_f = 2,8\%$$

Le Module de finesse M_f qui est égal à 2,8%, montre que le sable est grossier et utilisable pour chercher la performance des résistances des bétons.

V.1.3. Caractéristiques mécaniques des granulats

Nous montrons dans le tableau suivant les caractéristiques mécaniques des granulats 4/6 et 6/10, entre autres les valeurs des coefficients d'aplatissement, les Los Angeles et les Micro Deval

Tableau 12 : Caractéristiques mécaniques des granulats 4/6 et 6/10

Granulat	CA(%)	LA(%)	MDE(%)
4/6	9	38,3	31,1
6/10	2	37,9	30,5
Spécifications	< 20 %	< 35 %	< 30 %

Les caractéristiques mécaniques des granulats répondent bien à la spécification de la fabrication des enrobés bitumineux.

V.2. Caractéristiques du bitume

V.2.1. Pénétration DOW à 25°C

La valeur de la pénétration DOW à 25°C avant perte à la chaleur sur la prise d'essai est égale à **52,25 1/10 de mm**. Ce résultat est obtenu en prenant la valeur moyenne de quelques mesures sur différents points de l'échantillon.

Ainsi, ce bitume est de classe **50/70**. Nous avons un bitume semi dur, qui convient bien pour un revêtement routier.

V.2.2. Point de ramollissement

Les essais ont donné le bitume se ramollit à la température **50,75 °C**. C'est la température de bille-anneau ou point de ramollissement du bitume.

V.2.3. Perte à la chaleur

Tableau 13 : Mesure de la perte à la chaleur

	Essai 1	Essai 2	Moyenne
Masse du godet P1	58,45	55,64	
Masse du godet + bitume avant étuvage P2	95,65	89,57	
Masse du godet + bitume après étuvage P3	95,61	89,55	
Masse du bitume avant étuvage Pb	37,20	33,93	
Perte à la chaleur P4	0,04	0,02	0,02
Pourcentage perte à la chaleur (%)	0,11	0,07	0,09

D'après l'essai, on voit que la valeur moyenne de la perte à la chaleur à 163°C est 0,09%, nous pouvons dire que le bitume étudié ne contient pas des matières organiques volatiles.

V.2.4. Densité

Le tableau suivant montre la moyenne sur deux essais.

Tableau 14 : Mesure de la densité du bitume

	Essai 1	Essai 2	Moyenne
Masse godet P0 (g)	53,90	54,96	
Masse godet + verre P1 (g)	113,59	114,63	
Masse godet + verre + eau (g)	199,12	200,04	
volume godet seul V1 (cm3)	85,53	85,41	
Masse godet + verre + bitume P3 (g)	165,32	186,12	
Masse du bitume P4 (cm3)	51,73	71,49	
Masse godet + verre + bitume + eau P5 (g)	200,13	200,75	
Masse eau restant P6	34,81	14,63	
Volume bitume V2 (cm3)	50,72	70,78	
Densité du bitume (-)	1,02	1,01	1,02

A la température 25°C, le bitume a en moyenne une densité de **1,02**.

V.2.5. Indice de pénétrabilité

L'indice de pénétrabilité est calculé suivant la formule :

$$\frac{\log 800 - \log P_{25}}{T^{\circ}BA - 25} = \frac{1}{50} \times \frac{20 - IP}{10 + IP}$$

Avec : $P^{\circ} 25 = 52,25$ et $T^{\circ}BA = 50,75$

$$\frac{\log 800 - \log P_{25}}{T^{\circ}BA - 25} = \frac{\log 800 - \log 52,25}{50,75 - 25} = 0,046$$

$$\frac{50(\log 800 - \log P_{25})}{T^{\circ}BA - 25} = \frac{20 - IP}{10 + IP}$$

Alors la valeur de IP est :

$$IP = \frac{20 - 10 \cdot 50 \cdot 0,046}{1 + 50 \cdot 0,046} = 0,911$$

Ainsi, l'indice de pénétrabilité du bitume utilisé est de : **IP = 0,911**

V.2.6. Adhésivité

Elle consiste à observer les surfaces recouvertes du film de liant. Le résultat est généralement exprimé en pourcentage. Dans notre étude, nous avons la valeur d'adhésivité 90 car plus de 90% environ des surfaces sont recouvertes.

- 100 : aucune surface découverte
- 90 : plus de 90% environ des surfaces sont recouvertes

- 75 : plus de 75% environ des surfaces sont recouvertes
- 50 : 50 à 75% environ des surfaces sont recouvertes
- < 50 : moins de 50% environ des surfaces sont recouvertes
- 0 : tout le liant est séparé des granulats

Les caractéristiques du bitume utilisé sont récapitulées sur le tableau ci-dessous :

Tableau 15 : Tableau de la caractéristique du bitume utilisé

CARACTERISTIQUES	RESULTATS	Spécifications
Densité (T/m ³)	1,02	-
Pénétration à DOW à 25°C	52,25	-
Point de ramollissement Bille et Anneau (°C)	50,75	-
Pourcentage de pénétration après perte à la chaleur (%)	73,6	-
Perte à la chaleur à 163°C (%)	0,09	-
Indice de pénétrabilité IP	- 0,911	-
Adhésivité (%)	90	+ 90 % sont recouvertes

V.3. Caractéristiques de la poudre

Les valeurs des surfaces spécifiques Blaine des fillers sont montrées dans le tableau 15 :

Tableau 16 : Résultats de la surface spécifique Blaine des poudres

Poudre	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)
Pouzzolane	2840
Basalte	2664
Granite	2802

Interprétations :

- Plus la surface spécifique d'un corps est grand, plus sa capacité d'absorption augmente ;
- Plus le broyage n'est fin, plus la surface spécifique Blaine croit.

V. 4. Etudes de formulation

V.4.1. Dosage

Les études de formulation ont été adoptées à partir de la détermination des caractéristiques MARSHALL et DURIEZ sur des teneurs en liant différentes et des granulats de différentes granulométries. Le type d'enrobé que nous avons utilisé est le Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG) de type 0/10. Nous avons effectué trois (03) types de formulations, en faisant varier uniquement les pourcentages en fine d'apport à 3 puis 4 et 5%, et nous avons tenu constant les pourcentages en d'autres constituants : la teneur en liant est fixée à 5,43% en masse par rapport aux gravillons, les pourcentages en granulats sont maintenus fixes dans toutes les formulations : 50% de 0/4, 10% de 4/6 et 40% de 6/10.

Le tableau ci-dessous représente la proportion correspondant à chaque granulats :

Tableau 17 : Proportion du mélange de l'enrobés bitumineux

Composition granulaire	FORMULATION		
	F _A	F _B	F _C
0/4 (%)	50	50	50
4/6 (%)	10	10	10
6/10 (%)	40	40	40
Teneur en liant (%)	5,43	5,43	5,43
Fine d'apport (%)	3	4	5

L'étude consiste en la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques de des enrobés à l'aide des essais Marshall et Duriez en utilisant comme fine d'apport les poudres : pouzzolane, granite et basalte.

V.4.1. Confection des éprouvettes

V.4.1.1. Préparations des moules

Le moule que nous avons utilisé comprend deux éléments : la partie supérieure se présente comme une dame de compactage manuel, formée par un marteau de 4,536 kg et la partie inférieure est constituée d'un cylindre métallique de 101,6 mm de diamètre.



Photo 8 : Moule et Dame de compactage

Source : Auteur

V.4.1.2. Mélange et malaxage

Pour avoir de la bonne pâte, il faut chauffer puis malaxer le mélange des granulats et de bitume et de la poudre dans une plaque chauffante.



Photo 9 : Malaxage

Source : Auteur

V.4.1.3. Moulage et démoulage

Le moulage est réalisé à l'aide d'une presse avec une force de compactage 60 KN pour les deux essais, essai Marshal et essai Duriez.

Après démoulage, des éprouvettes sont conservées à l'air libre pour l'essai Marshal et à la température ambiante pendant 24h et l'essai Duriez. D'autres sont immergées dans l'eau pendant 4 jours puis conserver à l'air libre pendant 07 jours.



Photo 10 : Moulage



Photo 11 : Démoulage des éprouvette

Source : Auteur

V.5. Caractérisations des enrobés

V.5.1. Caractéristiques Marshal

L'essai Marshall consiste à compacter des éprouvettes à l'aide des dames selon un processus déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions définies. Il permet de déterminer le « **pourcentage des vides** », la « **stabilité** » et le « **fluage** » d'un mélange hydrocarboné à chaud pour une température et une énergie de compactage données. Ces caractéristiques reflètent le comportement mécanique de l'enrobé. Les essais sont faits en laboratoire à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire, suivant la norme NF EN 12697 - 10.

La stabilité est la résistance maximale à la rupture tandis que le fluage c'est l'affaissement du diamètre de l'éprouvette au moment de cette rupture.

V.5.1.1. Appareillage

➤ Pour la confection des éprouvettes

- Balance pouvant convenir aux pesées hydrostatiques ;

- Récipient de chauffage ;
 - Thermomètre gradué de 10 à 200°C ;
 - moule cylindrique en métal de 101,60 mm de diamètre intérieur et 87,3 mm de hauteur (élancement 1,16) ;
 - dame de compactage à base circulaire de 98,4 mm de diamètre équipé d'un mouton cylindrique creux et symétrique par rapport à l'axe de la dame de masse égale à 4535 ± 15 g et dont la hauteur de chute est de 457 ± 3 mm ;
 - Papier antiadhésif de 100 mm de diamètre ;
 - Dispositif de démoulage ;
 - Étuves pouvant atteindre des températures allant jusqu'à 200°C.
- **Pour la caractérisation des éprouvettes**
- Bain thermostatique à température constante ;
 - Presse mécanique équipée d'un système d'entraînement permettant de maintenir, lors de l'essai, une vitesse de déformation constante de $(0,85 \pm 0,02)$ mm/s ;
 - Mâchoire d'écrasement ;
 - Fluage mètre ;
 - Chronomètre.

V.5.1.2. Stabilité et fluage

La stabilité et le fluage sont donnés directement au moyen d'une « Presse » mais avant de mesurer ces paramètres, il faut immerger d'abord l'éprouvette dans un bain thermostatique à 60°C pendant 30 minutes. L'éprouvette est placée dans les mâchoires. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression et d'écrasement. La vitesse est réglée à 0,85mm/s.

- La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette ;
- Le fluage est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette au moment de cette rupture.

Pour obtenir la valeur du fluage, nous devons mesurer sa valeur avant et après l'écrasement puis prendre la moyenne :

Mesure du fluage avant écrasement :

- A l'extrême gauche de l'éprouvette on note le fluage F_{g1} ;

- A l'extrême droite de l'éprouvette on note le fluage Fd_1 ;

Mesure du fluage après écrasement :

- A l'extrême gauche de l'éprouvette on note le fluage Fg_2 ;
- A l'extrême droite de l'éprouvette on note le fluage Fd_2 ;

Le fluage final correspond à la moyenne des ces valeurs.

V.5.1.3. La compacité

Elle se traduit par le pourcentage des vides ou volume d'air libre contenu dans l'enrobé bitumineux. Un compactage régulier et un mélange homogène permet de minimiser la présence de vide. Une faible compacité est significatif d'un excès de vide, le béton bitumineux devient perméable à l'eau d'infiltration qui rend fragile l'affinité bitume/granulats.

La compacité s'exprime par :

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_s} * 100$$

- γ_d : la densité apparente des éprouvettes
- γ_s : son poids spécifiques



Photo 12 : Pesage



Photo 13 : immersion dans un bain thermostatique



Photo 14 : Ecrasement de l'éprouvette

Source : Auteur

V.5.2. Essai Duriez

L'objet de l'essai Duriez est de caractériser les qualités de résistance mécanique (statique) et la résistance au désenrobage par l'eau des matériaux enrobés. La tenue à l'eau d'un enrobé bitumineux est mesurée au moyen de l'essai Duriez, suivant la norme NF EN 12697 - 12. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température (18°C) et hygrométrie contrôlées, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvette est écrasé en compression simple.

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange.

V.5.2.1. Appareillage

Les appareils pour la confection des éprouvettes Duriez de l'essai Marshall sur les dimensions des moules :

- Balance hydrostatiques ;
- Récipient de chauffe ;
- Thermomètre gradué de 10 à 200°C ;
- Moule cylindrique en métal d'éclatement 1,87 (hauteur 150mm et diamètre intérieur 80 mm) ;
- Dispositif de démoulage ;
- Étuve à 200°C.

Le mode opératoire pour la confection Duriez est semblable à celui de l'essai Marshall. L'éprouvette Duriez est confectionnée de manière statique en lui imposant une charge fixe,

par contre l'éprouvette Marshall se confectionne par un compactage dynamique au moyen d'une dame spécifique.

V.5.2.3. Absorption

C'est l'augmentation relative du poids de l'éprouvette après immersion dans l'eau après 7 jours. Elle est déterminée à partir de la formule :

$$\text{Abs} = \frac{P_{im} - P_{air}}{P_{im}} * 100$$

Avec : P_{im} : Poids après immersion

P_{air} : Poids à l'air avant l'écrasement

V.5.2.4. Ecrasement des éprouvettes

Il a pour but de déterminer la résistance au désenrobage ou la tenue à l'eau de l'enrobé par le rapport immersion/compression. L'écrasement se fait à l'aide d'une presse réglée à la vitesse de **1 mm/s** avec un avancement contrôlé.



Photo 15 : Moulage



Photo 16 : conservation à l'air



Photo 17 : Immersion dans l'eau



Photo 18 : Ecrasement des éprouvettes

Source : Auteur

a. Résistance à la compression

La presse donne la charge maximale F de l'éprouvette et on en déduit la résistance à la compression R de l'éprouvette par :

$$R = \frac{F}{S}$$

Avec : S est la surface de la base des éprouvettes

$$S = \frac{\pi\phi^2}{4} \quad \phi : \text{le diamètre de l'éprouvette}$$

b. Tenue en eau

C'est le rapport de la résistance à la compression après immersion par celle conservée à l'air.

Il est obtenu à la formule suivant :

$$\text{Tenue en eau} = \frac{R'_c}{R_c}$$

Avec : R_c : la résistance à la compression à l'air

R'_c : la résistance à la compression après immersion dans l'eau

V.5.4.3. Indice de l'affaissement

C'est la diminution relative de la hauteur de l'éprouvette provoquée par la charge d'écrasement égale à 60KN. On note l'écrasement au moment de la rupture et on détermine l'indice d'affaissement par :

$$\Delta h = \left(\frac{h_i - h_f}{h_i} \right) * 100$$

Avec, h_i est la hauteur de l'éprouvette avant l'écrasement

h_f est la hauteur de l'éprouvette après l'écrasement

Chapitre VI : CARACTÉRISTIQUES DES ENROBÉS BITUMINEUX

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus sur différents essais qui reflètent les caractéristiques des enrobés que nous avons confectionnés avec différents types de formulations : essai Marshall, essai Duriez, essai de compression, la tenue à l'eau, l'essai d'absorption d'eau et l'indice d'affaissement. Et nous allons essayer de donner des interprétations sur chaque paramètre afin de déterminer la bonne formulation.

VI.1. Essai Marshall

VI.1.1 Résultats de l'essai Marshall

Les valeurs obtenues sont récapitulées dans le tableau 20 suivant :

Tableau 18 : Caractéristiques Marshall

Formulation	Essai	Densité	Poids spécifiques	Fluage	Compacité	Stabilité
Témoin		2,37	2,63	28	90,1	830
FA	P_p	2,35	2,58	33	91	900
	P_b	2,37	2,56	34	91	920
	P_g	2,36	2,59	32	92,6	980
FB	P_p	2,36	2,61	35	91,5	840
	P_b	2,37	2,62	34	92,4	860
	P_g	2,38	2,57	33	92,6	880
FC	P_p	2,42	2,72	36	92,7	700
	P_b	2,43	2,63	38	92,4	780
	P_g	2,43	2,60	36	93,5	780
Spécifications	-	-	-	$< 40 \frac{1}{10} mm$	$\geq 92\%$	$\geq 900 daN$

VI.1.2. Interprétations

○ Sur la densité et les masses spécifiques

Les modes de calculs sur la détermination des masses spécifiques de chaque formulation sont montrés dans l'annexe 1 dans la page VI de cet ouvrage.

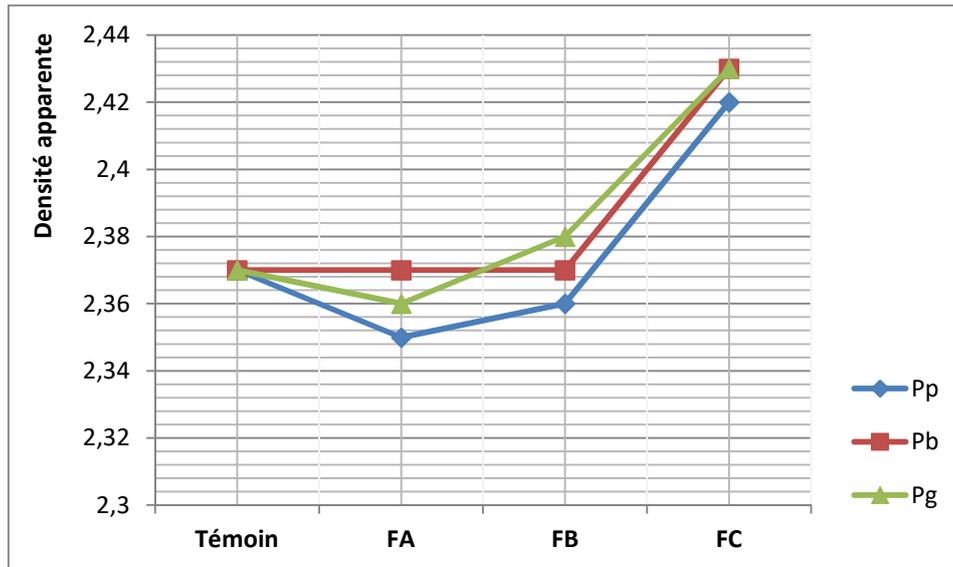


Figure 6 : Variation de la densité apparente Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine

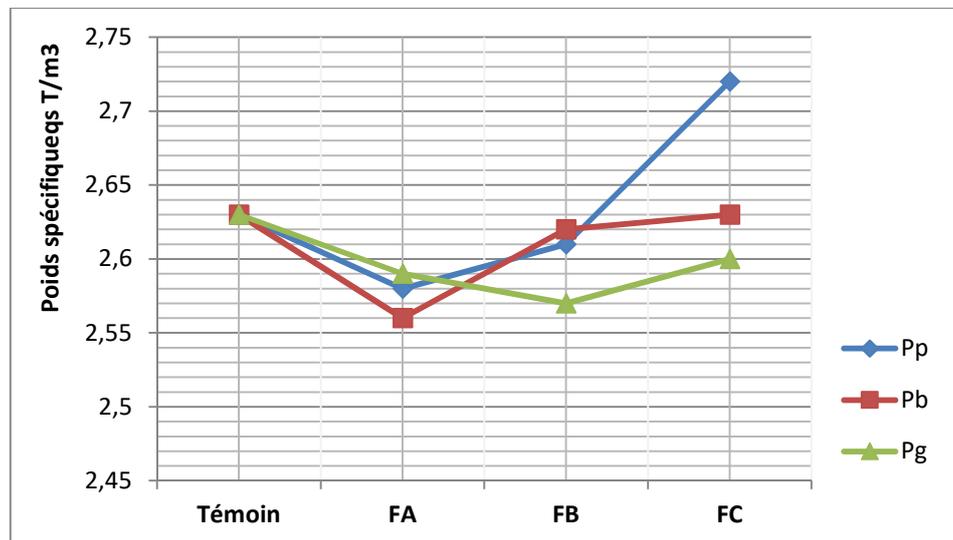


Figure 7 : Variation des masses spécifiques Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Nous constatons que les densités des éprouvettes pour chaque formulation ne connaissent pas beaucoup de variation par rapport aux éprouvettes témoins, sauf à l'exception de la formulation FC, avec ajout de 5% de filler. L'ajout des fillers dans le mélange fait augmenter la densité de l'enrobé.

Dans les cas généraux, la figure 8 ci-dessus montre que les masses spécifiques des varient peu en ajoutant des fines dans le mélange, sauf à l'exception de la formulation FC, avec ajout de 5% de poudre fine de pouzzolane qui atteint une valeur de masses spécifique égale à $2,72T/m^3$.

○ **Sur la stabilité**

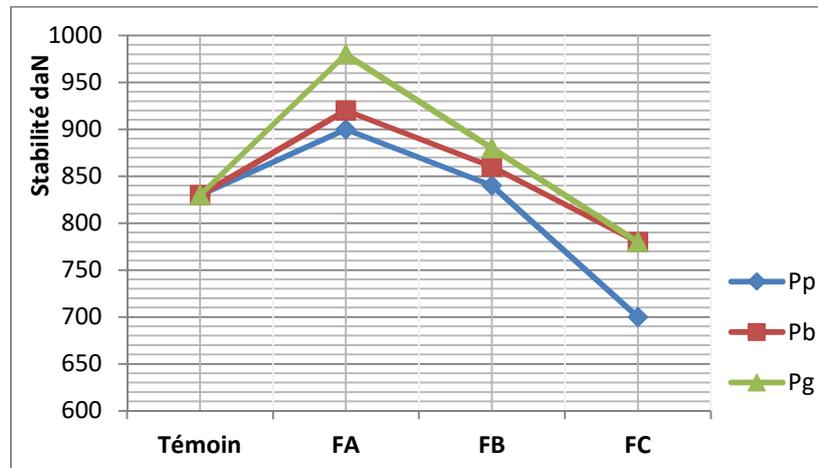


Figure 8 : Variation de la Stabilité Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Les trois types de poudre étudiées influent directement sur la stabilité des enrobés. Si on se réfère à la valeur de la stabilité de l'enrobé témoin, nous constatons que la stabilité s'améliore lorsque l'on ajoute des poudres dans les mélanges, puis diminue lorsque le pourcentage en poudre augmente : la plus grande valeur de la stabilité est donnée par la formulation FA avec 3% de poudre. Au-delà de 3%, la stabilité diminue.

La **formulation FA** avec ajout de **3% poudre de granite** qui donne la meilleure valeur de stabilité de **980daN**.

○ **Influence sur la compacité**

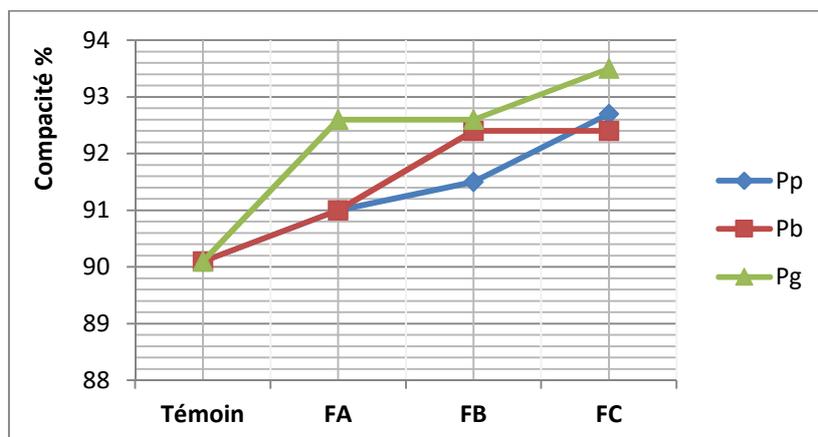


Figure 9 : Variation de la compacité Marshall en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Nous avons constaté que tous les poudres influent sur la compacité des enrobés. La compacité augmente lorsque l'on augmente le pourcentage en filler. En comparant les trois poudres, nous pouvons dire alors que l'utilisation de la **poudre de granite à 5%** améliore la valeur de la compacité qui est de **93,5%**.

- **Influence sur le fluage**

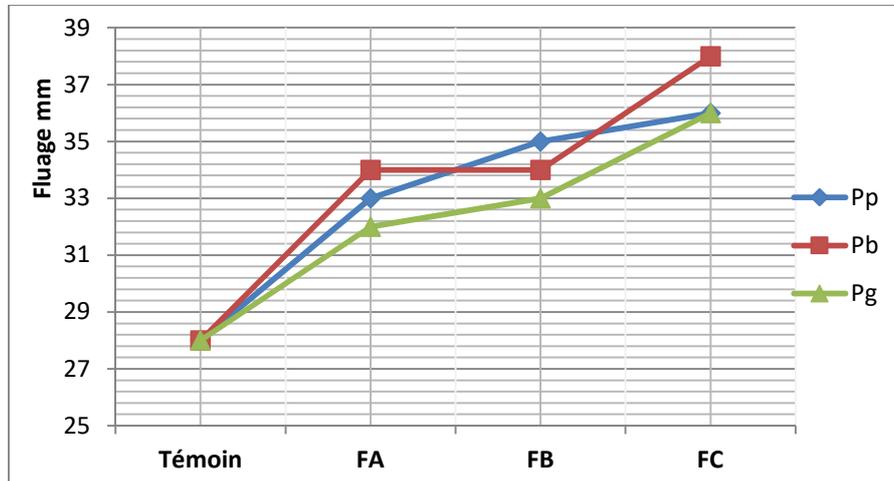


Figure 10 : Influence de la poudre sur le fluage en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Dans ces essais la valeur du fluage varie d'une formulation à l'autre et selon les types de poudre utilisés. La figure montre que l'utilisation des **poudres de granite et des poudres de basaltes à 5%** améliore les caractéristiques au fluage des enrobés dense à chaud. La plus grande valeur **38 mm** a été obtenue en utilisant **5% de poudre de basalte**.

VI.2. Essai Duriez

VI.2.1. Résultats

Tableau 19 : Caractéristiques Duriez

		CARACTERISTIQUES								
Formulation		γ_d (T/m ³)	γ_s (T/m ³)	C (%)	Abs (%)	Rc (bar)	R'c (bar)	T.E	Δh air (%)	Δh eau (%)
Témoin		2,32	2,61	88,8	2,65	42,6	37,0	0,87	1,63	1,92
FA	Pp	2,35	2,60	90	2,86	43,4	38,6	0,89	1,04	1,62
	Pb	2,39	2,65	90	2,66	47,0	42,6	0,76	1,07	2,23
	Pg	2,36	2,56	92	2,60	56,9	43,0	0,91	1,06	1,66
FB	Pp	2,39	2,61	91,6	2,76	44,6	42,0	0,94	1,65	1,11
	Pb	2,41	2,60	92,7	2,69	48,1	42,6	0,88	1,26	1,07
	Pg	2,41	2,59	93	2,79	56,8	43,1	0,76	1,67	1,27
FC	Pp	2,40	2,57	93,4	3,00	43,4	40,7	0,94	1,24	1,25
	Pb	2,42	2,59	93,4	2,52	46,7	41,3	0,88	1,57	1,04
	Pg	2,41	2,56	94,1	2,86	56,7	43,5	0,77	1,13	1,26
Spécification		-	-	≥ 91	< 3%	≥ 20	-	≥ 0,7	-	-

VI.2.1. Interprétations

- Sur la densité apparente et le masses spécifiques

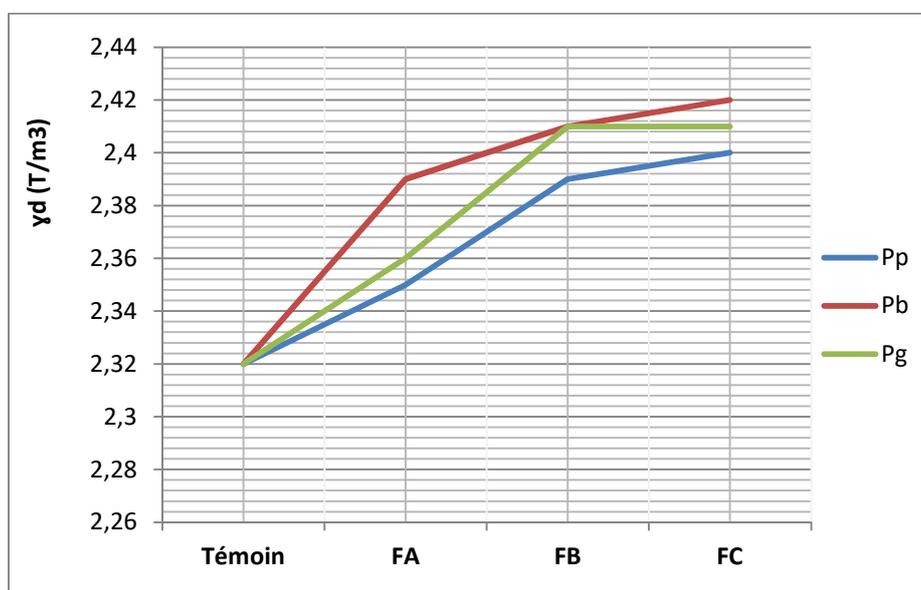


Figure 11 : Variation de la densité apparente Duriez en fonction de la nature et du pourcentage de fine

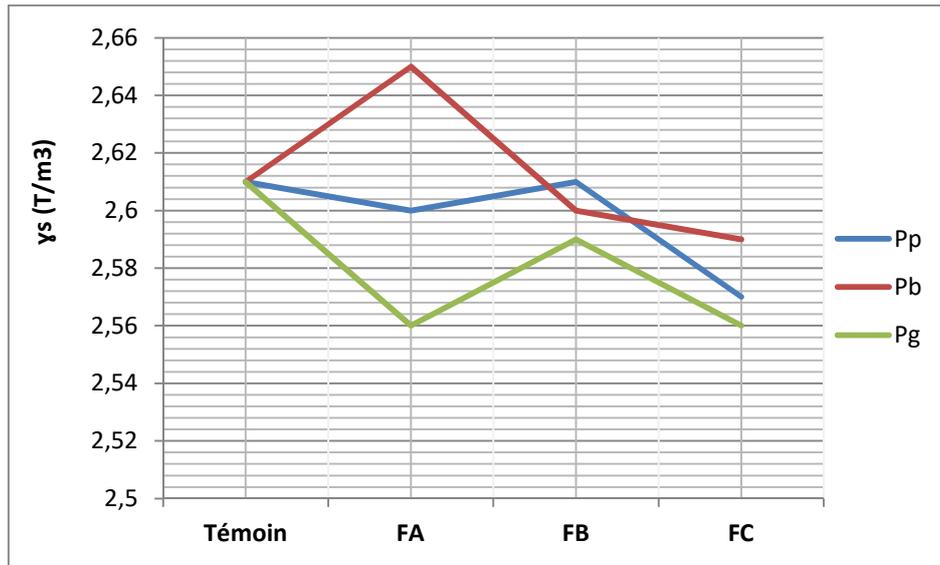


Figure 12 : Variation de la masse spécifique Duriez en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Les deux figures 12 et 13 montrent des résultats différents sur la variation de la densité et le masses spécifiques des enrobés lorsque l'on a ajouté des poudres fillers dans le mélange. Toutefois, en règle générale, la densité et le masses spécifique devraient augmentés avec l'ajout des poudres comme l'on a constaté lors des essais Marshall.

○ **Sur la compacité**

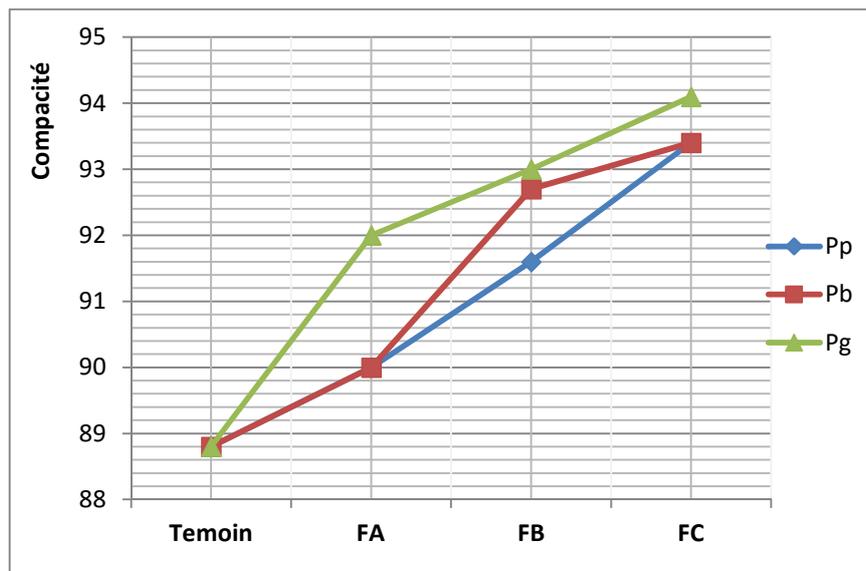


Figure 13 : Variation de la compacité Duriez en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Les mêmes observations lors des essais Marshall sont aussi constatées lors des essais Duriez sur la variation de compacité des enrobés avec l'ajout des poudres minérales dans les mélanges.

La figure 14 ci-dessus montre que l'utilisation des poudres fait augmenter la compacité des éprouvettes par rapport à l'éprouvette témoin. Pour toutes les formulations proposées, c'est la formulation FC avec 5% d'ajout qui donne les meilleures valeurs de compacité. La compacité augmente avec l'augmentation du pourcentage en poudre.

La plus grande valeur est obtenue avec de la poudre de granite de la **formulation FC** qui est de **93,4%** qui vérifie l'adéquation de la formulation selon la norme **NF P 98-251-1** (Compacité Duriez : $CD \geq 92\%$)

○ **Sur l'absorption d'eau et tenue à l'eau**

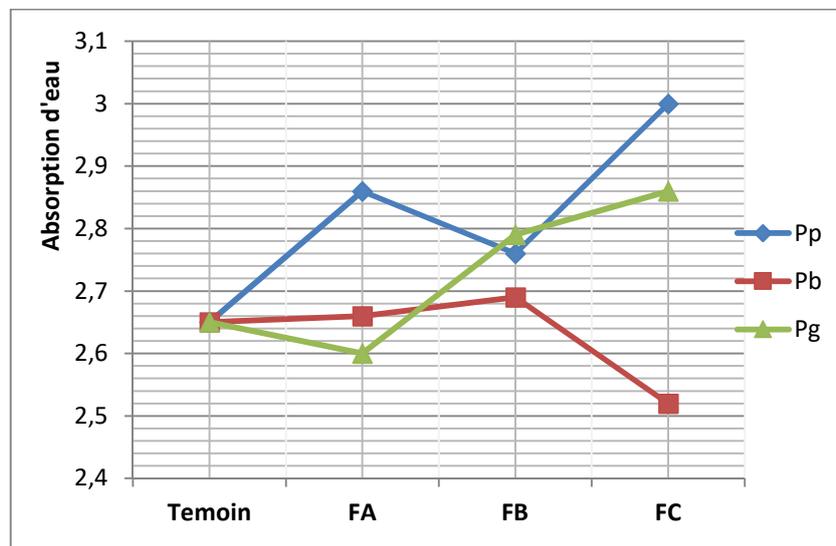


Figure 14 : Variation de l'absorption d'eau en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Les éprouvettes confectionnées avec de la poudre de pouzzolane qui absorbe beaucoup d'eau. Et celles confectionnées avec de la poudre de basalte qui absorbe le moins. Nous pouvons constater aussi que l'absorption d'eau ou porosité des éprouvettes diminue en fonction de la teneur en poudre minérale.

○ **Sur les résistances à l'écrasement**

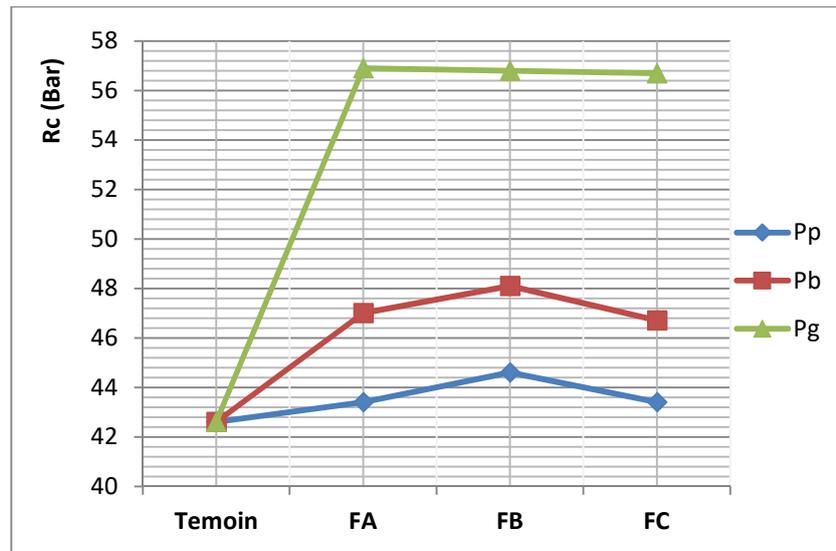


Figure 15 : Variation des résistances à l'écrasement sèches en fonction de la nature et du pourcentage de fine

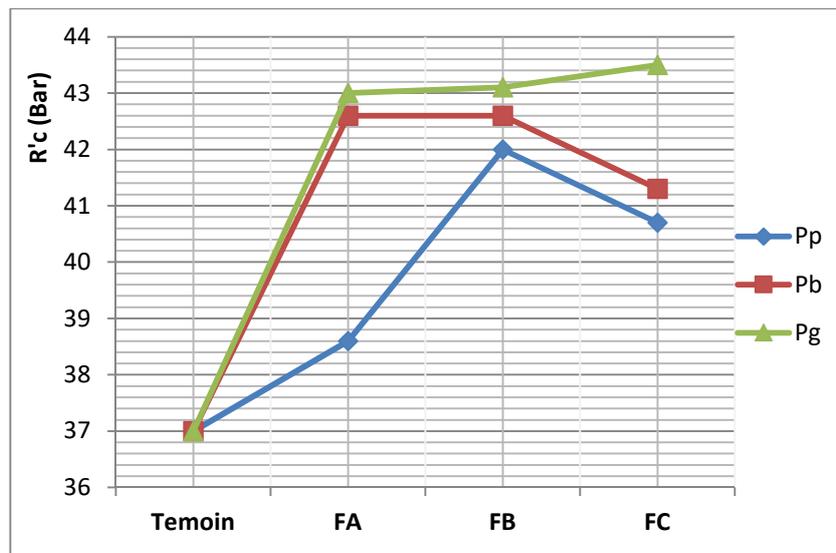


Figure 16 : Variation des résistances à l'écrasement après immersion dans l'eau en fonction de la nature et du pourcentage de fine

Les éprouvettes résistent bien à l'eau après des tests d'immersion de 24 heures.

Ce sont les éprouvettes confectionnées avec les poudres de granites qui présentent les meilleurs résultats. A 3% de poudre de granite, la résistance sèche atteint 56,9Bar et la résistance après immersion donne une valeur de 43Bar. Ces valeurs restent quasiment constantes quel que soit le pourcentage en poudre ajoutée. Ces valeurs sont classées «

Excellent » sur la norme **NF P 98-251-1** sur la résistance à la compression recommandée (**Rc >20 bars**).

Le comportement à l'état humide (après immersion) des éprouvettes peut être expliqué du fait que les poudres de granites peuvent diminuer l'absorption et l'adsorption de l'eau. Nous devons noter que cette résistance à la compression humide est aussi classée « Excellent » dans la norme **NF P 98-251-1**.

○ **Sur l'Indice de l'affaissement à l'air et à l'eau**

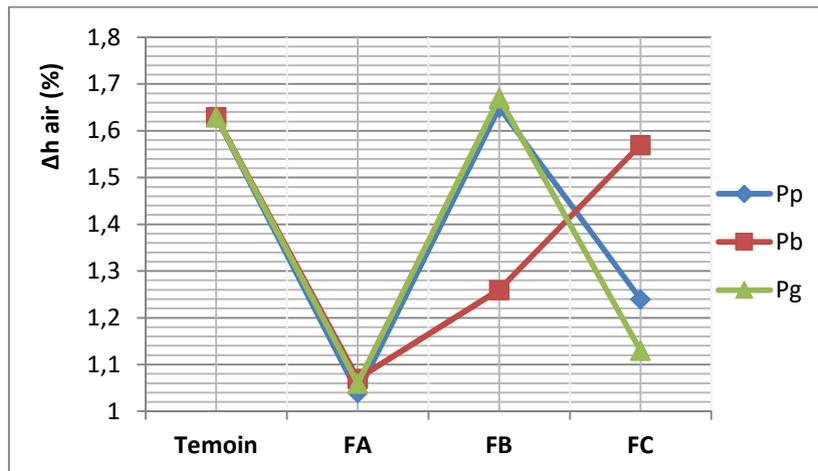


Figure : Variation des indices d'affaissement à l'air en fonction de la nature et du pourcentage de fine

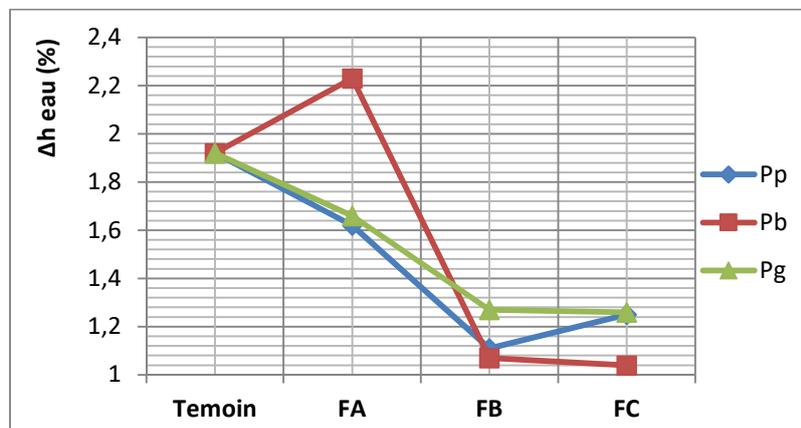


Figure : Variation des indices d'affaissement à l'eau en fonction de la nature et du pourcentage de fine

L'allure générale des courbes montre une amélioration sur l'affaissement des éprouvettes à l'air et à l'eau : l'affaissement devient de plus en plus petit lorsque l'on ajoute des poudres minérales dans le mélange. Ceci confirme la bonne compacité et la bonne résistance à la compression des éprouvettes.

PARTIE III :
EVALUATION DE L'ETUDE

Chapitre VII : INTERETS ECONOMIQUES

La récupération du sous-produit présente un avantage économique pour la société d'exploitation de la carrière. En effet, puisque tout ce qui est extrait de la carrière est exploité, la société peut tirer profit de la commercialisation de ses produits, certes, mais également de ses déchets.

L'emploi en béton bitumineux des poudres minérales constitue un débouché important pour ces sous-produits. Il permet d'économiser les matières premières et minimiser le coût de fabrication des bétons bitumineux. Ce qui nous conduit à évaluer le coût total des matériaux nécessaires pour la mise en œuvre d'un béton bitumineux utilisant la poudre comme fine d'ajout sur un tronçon de route déterminée en sachant que le coût d'un revêtement bitumineux est de 15€/m², avancé par l'Autorité Routière de Madagascar en 2008.

VII.1. Hypothèses

Dans le calcul, on considère l'hypothèse ci-après :

- **Masse volumique de l'enrobé : 2350kg/m³**
- **Longueur de la chaussée : 1km**
- **Largeur de la chaussée : 7m**
- **Epaisseur : 5cm**
- **Teneur en liant : 5,43%**
- **Prix du bitume : 150\$/Fût l'équivalent à 345.000Ar/fût**

Le tableau ci-dessous présente le prix unitaire de chaque matériau

Tableau 20 : Prix unitaire de chaque constituant

Désignation	Unité	Prix (Ar)
Granulat	m ³	36 000
Bitume	Fût	345 000
Poudre	Kg	20

VII.1.1. Détermination de la quantité de chaque matériau

Tout d'abord, nous avons calculé le volume de l'enrobé utilisé avant d'obtenir la quantité de chaque constituant,

VII.1.1.1. Volume de l'enrobé

Le volume de l'enrobé est donné par le formule suivants :

$$V_{\text{enr}} = L \times l \times e$$

Applications numériques : $L = 1\,000\text{ m}$ $l = 7\text{ m}$ $e = 0,05\text{ m}$

Alors le volume de l'enrobé est : $V_{\text{enr}} = 350\text{ m}^3$

VII.1.1.2. Masse de l'enrobé

On sait que, la masse volumique de l'enrobé est 2350 Kg/m^3 donc la masse est exprimé en volume et la masse volumique

Alors, $M_{\text{enr}} = \rho_{\text{enr}} * V_{\text{enr}}$

D'où, $M_{\text{enr}} = 2350 * 350$

$$M_{\text{enr}} = 822\,500\text{ Kg}$$

VII.1.1.3. Masse de bitume

La masse du bitume est 5,43% de la masse de l'enrobé :

$$M_{\text{bit}} = M_{\text{enr}} * 5,43\%$$

$$\text{Donc, } M_{\text{bit}} = 822\,500 * 5,43\%$$

$$M_{\text{bit}} = 44\,661,75\text{ Kg}$$

VII.1.1.4. Masse des granulats

La masse des granulats est la différence entre la masse totale de l'enrobé bitumineux et la masse du bitume, elle est donnée par la relation suivante :

$$M_{\text{gr}} = M_{\text{enr}} - M_{\text{bit}}$$

Alors , $M_{\text{gr}} = 822\,500 - 44\,661,75$

$$M_{\text{gr}} = 777\,838,25\text{ Kg}$$

VII.1.1.5. Masse de la poudre

La proportion de la masse de la poudre est 3% en masse des granulats :

$$M_{\text{p}} = M_{\text{gr}} * 3\%$$

$$M_{\text{p}} = 777\,838,25 * 3\%$$

$$M_{\text{p}} = 23\,335,1475\text{ Kg}$$

VII.1.2. Calcul de prix

VII.1.2.1. Calcul de prix de chaque constituant

Pour pouvoir calculer le coût total, nous devons calculer le volume du liant et celui des granulats.

a. Volume de liant

Nous savons que la masse volumique du bitume est de 1.02T/m³.

On a:

$$V_{\text{bit}} = \frac{M_{\text{bit}}}{\rho_{\text{bit}}}$$

$$\text{Alors, } V_{\text{bit}} = \frac{44\,661,75}{1020}$$

$$V_{\text{bit}} = 43,786 \text{ m}^3$$

b. Volume des granulats

La masse volumique du granite est de 2.7g/cm³

Son volume s'écrit : $V_{\text{gr}} = \frac{M_{\text{gr}}}{\rho_{\text{gr}}}$

$$V_{\text{gr}} = \frac{777\,838,25}{2700}$$

$$V_{\text{gr}} = 288,09 \text{ m}^3$$

VII.1.2.2. Calcul de prix de chaque matériau

➤ Prix du bitume

Puisque le baril de bitume est 166 litres alors :

$$P_{\text{bit}} = \frac{150 * 2400 * 43,786}{0,166}$$

$$P_{\text{bit}} = 94\,957\,590 \text{ Ar}$$

➤ Prix des granulats

Les prix des granulats est :

$$P_{\text{gr}} = 288,09 * 36\,000$$

$$P_{\text{gr}} = 10\,371\,240 \text{ Ar}$$

➤ Prix des poudres

Pour la poudre : pouzzolane, granite et basalte, on considère de même prix par kilogramme :

$$P_{\text{p}} = 20 * 23\,335,1475$$

$$P_{\text{p}} = 466\,702 \text{ Ar}$$

VII.1.2.3. Coût total de l'enrobé

$$CT = P_{bit} + P_{gr} + P_p$$

$$CT = 94\,957\,590 + 10\,371\,240 + 466\,702$$

$$CT = 105\,795\,532 \text{ Ar}$$

Le coût total pour un kilomètre de béton bitumineux par l'ajout de la poudre avec le mélange est récapitulé dans le tableau ci-dessous :

Tableau 21 : Tableau cout total des matériaux

Désignation	Unité	Prix unitaire (Ar)	Quantité	Sous total (Ar)
Granulat	m ³	36.000	288,09	10.371.240
Bitume	Baril	345.000	264	94.957.590
Poudre	Kg	20	23335,15	466.703
TOTAL				105.795.532

En comparant le coût total d'un mètre carré du béton bitumineux, on voit qu'il y a un différentiel de prix entre les deux, le coût des bétons bitumineux avec ajout de fine d'apport est moins cher par rapport au revêtement standard. Avec la poudre, le montant des matériaux indispensables pour la mise en œuvre d'un kilomètre d'un béton bitumineux atteint la somme de cent un million neuf cent dix-sept mille neuf cent quarante-trois Ariary, soit environ soixante-dix millions Ariary.

Avec la même épaisseur (5cm), le coût par mètre carré d'un revêtement bitumineux standard est de 15 € (Source : ARM ou Autorité Routière de Madagascar, Mai 2008) équivalent à quarante-cinq mille Ariary (45.000 Ar). Alors que pour notre cas, celui-ci vaut quatorze mille cinq cent soixante Ariary (15.113 Ar), ce qui signifie que l'emploi de sous-produit comme fine d'apport serait plus rentable.

Chapitre VIII : INTERETS ENVIRONNEMENTAUX

VIII.1. Impacts environnementaux

VIII.1.1. Emission de CO₂

Les liants hydrauliques comme les ciments sont habituellement utilisés dans la fabrication des bétons bitumineux. L'émission de CO₂, gaz à effet de serre, lors de la production de ces liants constitue l'un des problèmes majeurs dans la destruction de la couche de l'ozone de l'atmosphère. L'utilisation des poudres minérales comme ajout dans la production des bétons bitumineux pourra contribuer à la réduction de l'émission de CO₂ dans l'atmosphère car l'utilisation des liants sera diminuée.

VIII.1.2. Gestion de l'espace et des déchets

Dans les carrières et dans les Madagascar possède encore une grande quantité des roches surtout à Vakinankaratra, la production des granulats conduit à une production massive des poudres minérales après concassage et taillerie des pierres. Les poudres obtenues sont constituées de deux catégories : les sables de carrières et les poudres fines minérales. Elles occupent beaucoup d'espace dans les carrières, et aussi les poussières emportées par le vent pourront provoquer des suffocations et des maladies respiratoires. La valorisation de ces sous-produits dans la construction contribue alors à une bonne gestion de l'espace et des déchets, et surtout à l'obtention des nouveaux matériaux de construction.

VII.1.3. Impacts engendrés de l'utilisation des poudres minérales

VII.1.3.1. Impacts positifs

➤ Dans la construction routière

Nous pouvons citer quelques avantages sur l'utilisation des poudres minérales dans la construction routière :

- L'ajout de la poudre de granite, pouzzolane et basalte améliore les caractéristiques de fatigue et réduit la fissuration (amélioration des caractéristiques Duriez et Marshall) qui peut être causée par d'autres facteurs que le vieillissement du revêtement ;
- la dispersion des minuscules particules de la poudre à travers tout le mélange le rend plus résistant et plus dur ;
- l'ajout de la poudre réduit la probabilité que le lien entre le liant et le granulat se brise mécaniquement ;

- La poudre améliore la résistance et réduit la formation d'ornières (une déformation permanente de l'enrobé bitumineux qui se produit lorsque la limite d'élasticité est dépassée)
- La pouzzolane, le granite et le basalte sont utilisés comme des matériaux de remblai.

➤ **Dans d'autres domaines**

- Dans le domaine agriculture, la pouzzolane est utilisée pour l'amendement du sol argileux. Elle est aussi nécessaire pour drainant le sol argileux ;
- La pouzzolane est utilisée pour divers traitements : le traitement de l'eau (filtration des eaux de consommation, industrielles ou usées)
- Les poudres issues des roches magmatiques (basalte, granite), peuvent être utilisées dans la stabilisation des matériaux en terre crue, dans la production des liants en tant qu'ajout minéral.

VII.1.3.2. Impacts négatifs

En dépit des plusieurs avantages, elle présente aussi des impacts négatifs sur l'environnement que ce soit sur le site d'extraction de la matière première et sur sa manipulation :

- Sur le site d'extraction, la pollution de l'air notamment par les poussières constitue la principale nuisance de la qualité d'air ;
- Risque de destruction de tombeaux et d'habitations due à l'abattage à l'explosif (dynamitage)
- Risque de perturbation ou disparition des sites historiques et traditionnels
- Modification de la qualité des eaux de surface et de la nappe phréatique (contamination et pollution)
- Perturbation de la vie quotidienne de la population par le bruit que font l'explosif et le concasseur
- Dégradation, érosion et pollution du sol

VII.1.3.3. Mesure d'atténuation des impacts négatifs

Les mesures d'atténuation se définissent comme l'ensemble des moyens envisagés pour éviter, réduire les impacts négatifs sur l'environnement.

- Maintenir les véhicules de transport et la machinerie en bon état de fonctionnement afin de minimiser les émissions gazeuses et le bruit ;

- Utiliser des abat-poussières et des unités de récupération de poussières ;
- Contrôler la circulation pour éviter les fuites et les déversements de matières dangereuses (produits chimiques, hydrocarbure, ...) ;
- Interdire le ravitaillement de la machinerie à proximité des cours d'eau ;
- Limiter les interventions sur les sols érodables. Choisir des véhicules adaptés à la nature du sol ;
- A la fin des travaux, niveler les sols remaniés et procéder rapidement à l'engazonnement et à la plantation d'arbres ou d'arbustes afin de contrôler l'érosion des sols ;

VIII.2. INTERETS TECHNIQUES

L'intérêt technique des substitutions de filler par l'ajout des poudres réside en premier lieu dans le fait qu'ils permettent l'obtention de béton bitumineux dont les performances sont bonnes et comparables à celles des bétons bitumineux sans ajout des poudres.

En second lieu, ils présentent l'avantage d'une meilleure résistance aux agressions chimiques, donc durabilité augmentée.

Enfin, ils accroissent la stabilité et la compacité du mélange, et ils améliorent le fluage du béton bitumineux.

CONCLUSION

L'objectif de notre travail est d'améliorer la performance des enrobés bitumineux, du point de vue mécanique, par valorisation des poudres minérales extraites dans la région Vakinankaratra. Nous avons utilisé les ressources minérales qui y sont abondantes : granite, basalte et pouzzolane. Ces ressources sont réduites en poudres fines et ont été utilisées comme fines d'ajout dans les enrobés bitumineux.

Lors de l'expérimentation, nous avons pu conclure que l'ajout de la poudre améliore les comportements mécaniques des enrobés. La poudre joue un rôle de fine d'apport, colmater les vides et augmente la compacité des éprouvettes, elles peuvent être mise en œuvre pour la fabrication des enrobés.

Nous avons caractérisé d'abord des matières premières pour déterminer leurs caractéristiques. Puis, nous avons réalisés plusieurs essais de formulation en utilisant séparément les poudres minérales pour déterminer laquelle donne un enrobé de bon comportement du point de vue mécanique. Nous avons fait varier le pourcentage des poudres dans chaque formulation : 3%, 4% et 5%. Nous avons déterminé les caractéristiques des enrobés par des essais Duriez et essais Marshall. Nous avons trouvé que c'est la formulation avec 3% de poudre de granite donne les meilleurs résultats :

- Essai Marshall :

- Densité apparente : 2,37 T/m³
- Poids spécifiques : 2,59 T/m³
- Fluage : 32 1/10 mm
- Compacité : 92,6 %
- Stabilité : 980 daN

Ces valeurs sont acceptables et conformes aux recommandations selon les normes NFP 98-251 sur les enrobés bitumineux : Compacité $\geq 92\%$, Fluage $< 40 \frac{1}{10} mm$, et Stabilité $\geq 900 daN$.

- Essai Duriez :

- Densité apparente : 2,39 T/m³
- Poids spécifiques : 2,56 T/m³
- Compacité : 92 %
- Absorption : 2,60 T/m³
- Résistance à la compression à l'air : 56,9 bar
- Résistance à la compression sous l'eau : 43,0 bar

- Tenue à l'eau : 0,91

Ces valeurs sont acceptables et conformes aux recommandations selon les normes NF P 98-251 sur les enrobés bitumineux : Compacité Duriez ≥ 91 , absorption d'eau : $< 3\%$ tenue à l'eau $\geq 0,7$, Rc : 56,7 bar $\geq 20 \text{ bar}$, Rci : 43,5 bar.

L'utilisation des poudres minérales issues de concassage des granulats et de taillerie des pierres trouve beaucoup d'avantages dans la vie courante et dans la protection de l'environnement : obtention des nouveaux matériaux de construction, gestion de l'espace, diminution de l'émission des gaz à effet de serre, réduction des risques maladies respiratoires par suffocation causée par les poudres éparpillées dans l'air etc.

REFERENCES BOBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. MENAGIANA Jean Grigaut, 2016 : « Contribution à l'étude de l'amélioration du comportement rhéologique de l'huile lourde de TSIMIRORO par ajout d'élastomère dans la fabrication du béton bitumineux semi-grenu ». Mémoire de fin d'études, MASTER en Science et Technologies, Université d'Antananarivo.
- [2]. RASOAMAMPIONONA Herivola : « Recherche de nouveaux dopes pour un revêtement routier bitumineux ». Mémoire de fin d'études, Master en pour l'obtention Science et Ingénierie des matériaux, Ecole Supérieur Polytechniques Antananarivo.
- [3]. RAKOTOARISON Pierre Donat « Contribution à la valorisation de l'huile lourde brute de Madagascar (TSIMIRORO) en vue de l'obtention d'un enrobé pour revêtement routier en substitution des enrobes avec des bitumes purs d'importation ; étude comparative des performances mécaniques des revetement routiers en enrobés avec huiles lourdes et les enrobés avec des bitumes purs d'importation ». Mémoire de fin d'Etudes, Docteur en Chimie, Université d'Antananarivo.
- [4]. RALAIVAONIRINA TOLOJANAHARY Sedra Santatra « Automatisation des calculs pour formulation d'enrobés à chaud par FOREBIC 1.0 suivant les NF EN ». Mémoire de fin d'études, MASTER en Bâtiment et travaux Publics, Université d'Antananarivo.
- [5]. FIFINY Anna Carole « Contribution à l'étude de valorisation des cendres volantes d'une centrale thermique de Toamasina comme fine d'ajout minéral dans les bétons hautes performances ». Mémoire de fin d'études, MASTER en Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieur Polytechniques Antananarivo.
- [6]. RANDRIANIRINA Haja Niaina « La sensibilité à l'eau des enrobés, validité de l'essai DURIEZ à Madagascar ». Mémoire de fin d'études, MASTER en Bâtiment et Travaux Publics, Ecole Supérieur Polytechniques Antananarivo.
- [7]. LAHATRA RAZAFINDRAMISA Harizo « Valorisation de la poudre de granite comme fine d'ajout dans le béton ordinaire ». Mémoire de fin d'études, MASTER en sciences des matériaux.
- [8]. A Kerbouche, M.Mouli, L.Laoufi, Y.Senhadji, S.Benosmane « Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des mortiers ».

- [9]. ANDRIANANJA Herimasinavale « Etude de l'efficacité du traitement biologique des eaux usées avec de la pouzzolane ». Mémoire de fin d'Etudes, LICENCE en en Génie des procédés chimiques et industriels.
- [10]. RASOLOARISOA Stephanie Domoina « Valorisation des pouzzolanes de TRITRIVA, région VAKINANKARATRA en vue de fabrication de bétons légers (béton ordinaire, microbéton et béton caverneux) ». Mémoire de fin d'études, MASTER II en géotechnique, ESPA.
- [11]. MOUSSA Abdul Karim « Contribution à l'étude de valorisation de la pouzzolane quelques applications ». Mémoire de fin d'études, MASTER en chimie appliqué à l'industrie et à l'environnement, ESPA.
- [12] RASAMOELINA Mamitiana Felaniaina « Caractéristiques géotechnique et chimique des pouzzolanes dans la région de Betafo ». Mémoire de fin d'études, en MASTE en Géologue, ESPA.
- [13] RAVELOSON Tanjoniaina Angelo ; « Production des granulats pour bétons bitumineux et enrobés à froid stockables utilisables dans le couche de roulements ». Mémoire de fin d'études, MASTER en Sciences et Technique Minière, ESPA.

Webographie

- [W1] : www.bitume.info/mission.jsp consulté en Avril 2020
- [W2] : <https://fr.m.wikipedia.org/wiki/bitumen> consulté en mars 2020
- [W3] : [www.8_2 Bitume.info](http://www.8_2Bitume.info) consulté en Avril 2020
- [W4] : www.yvelines.gouv.fr consulté en décembre 2020
- [W5] : www.coursgeniecivil.com Contrôle Qualité en Construction routière XP P18-545 – 2004
- [W6]: Norme EN 1097-1, AFNOR, Essai sur les propriétés mécaniques et physiques des granulats, Micro-Deval, 2012 consulté en mars 2021
- [W7] : Etude de formulation des enrobés bitumineux consulté en mars 2021
- [W8] : www.proz.com consulté en janvier 2021
- [W9]: <https://fr.m.wikipedia.org> consulté en décembre 2020
- [W10] : www.thomasta.com consulté en février 2021
- [W11] : www.fr.com.wikipedia.org consulté en avril 2021

ANNEXES

Annexes 1 : Tableau de calcul du poids spécifiques Marshall

	Pouzzolane		Basalte		Granite	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai1	Essai 2
REFERENCE PYCNOMETRE	7	4	4	4	4	4
Masse du pycnomètre (P1)	102	92,5	96	96	96	96
Volume du pycnomètre	105	106,5	109	109	109	109
Masse échantillon +pycnomètre (P2)	262,38	254,96	186	184	168	186,5
Masse échantillon + pycnomètre + solvant (P3)	302,44	295,66	250	249	238	250
Masse échantillon (P4)	160,38	158,4	90	88	72	90,5
Masse du solvant (P5)	40,06	40,7	64	65	70	63,5
Volume du solvant (V2)	46,58	47,33	74,4	75,6	81,4	73,84
Volume échantillon (V3)	58,42	59,17	34,6	33,4	27,6	35,16
Masse spécifique (T/m³)	2,75	2,68	2,60	2,63	2,59	2,54
Moyenne	2,72		2,62		2,57	

Annexes 2 : Tableau de calcul de la densité apparente Marshall

	Témoin	Pouzzolane		Basalte		Granite	
		Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai2	Essai1	Essai2
Poids sec (P1)	1062	1060		1080		1058	
Masse paraffiné à l'air (P2)	1044	1142		1060		1040	
Masse paraffine (P3) : P2-P1	18	18		20		18	
Masse paraffiné dans l'eau (P4)	584	584		596		583	
Volume paraffine (V1)	20	20		22		20	
Volume paraffiné (V2)	460	458		464		459	
Volume d'éprouvette (V3)	442	438		444		436	
Densité apparente	2,40	2,42		2,43		2,43	
Moyenne	2,40	2,42		2,43		2,43	

Annexes 3 : Tableau de calcul du poids spécifiques duriez

	Pouzzolane		Basalte		Granite	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai1	Essai 2
REFERENCE PYCNOMETRE	7	4	4	4	4	4
Masse du pycnomètre (P1)	102	92,5	96	96	96	96
Volume du pycnomètre	105	106,5	109	109	109	109
Masse échantillon +pycnomètre (P2)	262,38	254,96	186	184	168	186,5
Masse échantillon + pycnomètre + solvant (P3)	302,44	295,66	250	249	238	250
Masse échantillon (P4)	160,38	158,4	90	88	72	90,5
Masse du solvant (P5)	40,06	40,7	64	65	70	63,5
Volume du solvant (V2)	46,58	47,33	74,4	75,6	81,4	73,84
Volume échantillon (V3)	58,42	59,17	34,6	33,4	27,6	35,16
Masse spécifique (T/m³)	2,75	2,68	2,60	2,63	2,59	2,54
Moyenne	2,72		2,62		2,56	

Annexes 4 : Méthode de calcul de la densité apparente duriez des éprouvettes témoins

	Témoin	Pouzzolane		Basalte		Granite	
		Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai2	Essai1	Essai2
Masse sèche (P1)	1106	1090		1112		1095	
Masse paraffiné à l'air (P2)	1088	1108		1090		1075	
Masse paraffine (P3) : P2-P1	18	18		22		20	
Masse paraffiné dans l'eau (P4)	591	624		600		591	
Volume paraffine (V1) : P3/d avec d = 0,9	20	20		24,5		22	
Volume paraffiné (V2) : P2-P4	497	484		489,5		484	
Volume d'éprouvette (V3) : V2- V1	477	464		465		462	
Densité apparente P1/V3	2,32	2,35		2,39		2,36	
Moyenne	2,32	2,35		2,39		2,36	

Annexes 5 : Méthode de calcul du poids spécifiques duriez des éprouvettes témoins

	Pouzzolane		Basalte		Granite	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2	Essai1	Essai 2
REFERENCE PYCNOMETRE	7	4	4	4	4	4
Masse du pycnomètre (P1)	102	92,5	96	96	96	96
Volume du pycnomètre	105	106,5	109	109	109	109
Masse échantillon +pycnomètre (P2)	262,38	254,96	215	192,5	196,5	197
Masse échantillon + pycnomètre + solvant (P3)	302,44	295,66	270	255	258	256
Masse échantillon (P4)= P2-P1	160,38	158,4	119	96,5	100,5	101
Masse du solvant (P5) =P3-P2	40,06	40,7	55	62,5	61,5	59
Volume du solvant (V2) = P5/0,86	46,58	47,33	63,95	72,67	71,51	68,60
Volume échantillon (V3) =V1-V2	58,42	59,17	45,05	36,33	37,49	40,39
Masse spécifique = P4/V3	2,59	2,61	2,64	2,66	2,68	2,50
Moyenne	2,60		2,65		2,59	

TABLE DES MATIERES

TENY FISAORANA	i
REMERCIEMENTS	ii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS et NOTATIONS	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES PHOTOS.....	viii
LISTE DES ANNEXES.....	viii
PARTIE I :	1
ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	1
Chapitre I : GENERALITES SUR LE BITUME.....	2
I.1. Le bitume.....	2
I.1.1.1. Définition [1].....	2
I.1.1.2. Origine [1], [w1]	2
I.1.1.3. Procédé de fabrication [w1], [w2].....	2
I.1.1.4. Composition du bitume [w3].....	3
I.1.1.5. Structure du bitume [2]	5
I.1.6. Propriétés [2].....	6
I.2. Bitume routier.....	8
I.2.1.1. Caractéristiques physiques [3]	8
Chapitre II : NOTION SUR LES ENROBES BITUMINEUX.....	12
II.1. Définition [1]	12
II.2. Différents types des enrobes bitumineux [2]	12
II.3. Famille des enrobes bitumineux [w4].....	13
II.3.1. Enrobés à chaud [1], [2]	13

II.3.2. Enrobés à Froid [2].....	13
II.4. Les constituants des enrobés bitumineux [4]	13
II.4.1. Les Liants [4]	14
II.4.2. Les granulats [1]	14
II.4.2.1. Définition	14
II.4.2.2. Classifications des granulats	14
II.4.2.3. Les caractéristiques géométriques.....	15
II.4.2.4. Les caractéristiques physiques	15
II.4.3. Les fines d'apports ou filler [w7].....	17
II.5. Formulation [1]	17
II.6. Les essais sur les enrobés bitumineux [2]	19
Chapitre III : GEOLOGIE DES GRANITES, BASALTES ET POUZZOLANES.....	21
III.1. Le granite [7]	21
III.1.1. Définition et origine	21
III.1.2. Processus de formation des granites	21
III.1.4. Les constituants des granites.....	22
III.1.5. Les propriétés de granite	22
III.2. Les basaltes [w9]	25
III.2.1. Définition	25
III.2.2. Formation du basalte [w10]	25
III.2.3. Constituants du basalte	25
III.2.4. Propriétés du basalte	26
III.2.5. Utilisations du basalte	26
III.3. La pouzzolane [8]	27
III.3.1. Définition	27
III.3.2. Formation de la pouzzolane [9]	27
III.3.3. Différents types de pouzzolane [10]	27

III.3.4. Constituants des pouzzolanes [11].....	28
III.3.5. Caractéristiques des pouzzolanes [12].....	29
Chapitre IV : PRESENTATION ET CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES	34
IV.1. Les matières premières.....	34
IV.2. Méthodes des caractérisations.....	34
IV.2.1. Les granulats.....	34
IV.2.2. Le bitume.....	40
IV.2.3. Les Poudres - Surface spécifique.....	47
CHAPITRE V : CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX et ESSAI DE FORMULATION.....	49
V.1. Caractéristiques des granulats.....	49
V.1.1. Caractéristiques physiques.....	49
V.1.2. Caractéristiques géométriques.....	49
V.1.3. Caractéristiques mécaniques des granulats.....	51
V.2. Caractéristiques du bitume.....	52
V.2.1. Pénétration DOW à 25°C.....	52
V.2.2. Point de ramollissement.....	52
V.2.3. Perte à la chaleur.....	52
V.2.4. Densité.....	53
V.2.5. Indice de pénétrabilité.....	53
V.2.6. Adhésivité.....	53
V.3. Caractéristiques de la poudre.....	54
V. 4. Etudes de formulation.....	55
V.4.1. Dosage.....	55
V.4.1. Confection des éprouvettes.....	55
V.5. Caractérisations des enrobés.....	57

V.5.1. Caractéristiques Marshal.....	57
V.5.1.1. Appareillage	57
V.5.1.2. Stabilité et fluage	58
V.5.1.3. La compacité	59
V.5.2. Essai Duriez	60
V.5.2.1. Appareillage	60
Chapitre VI : CARACTÉRISTIQUES DES ENROBÉS BITUMINEUX.....	63
VI.1. Essai Marshall	63
VI.1.1 Résultats de l’essai Marshall.....	63
VI.1.2. Interprétations	63
VI.2. Essai Duriez.....	67
VI.2.1. Résultats.....	67
VI.2.1. Interprétations	67
PARTIE III :	33
EVALUATION DE L’ETUDE.....	33
Chapitre VII : INTERETS ECONOMIQUES	71
VII.1. Hypothèses	71
VII.1.1. Détermination de la quantité de chaque matériau	71
VII.1.2. Calcul de prix	73
Chapitre VIII : INTERETS ENVIRONNEMENTAUX.....	75
VIII.1. Impacts environnementaux	75
VIII.1.1. Emission de CO ₂	75
VIII.1.2. Gestion de l’espace et des déchets	75
VIII.1.3. Impacts engendrés de l’utilisation des poudres minérales	75
VIII.2. INTERETS TECHNIQUES	77
CONCLUSION	78
REFERENCES BOBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES.....	I

ANNEXES i

Annexes 1 : Tableau de calcul du poids spécifiques Marshall..... III

Annexes 2 : Tableau de calcul de la densité apparente Marshall.....IV

Annexes 3 : Tableau de calcul du poids spécifiques duriez V

Annexes 4 : Méthode de calcul de la densité apparente duriez des éprouvettes témoins VI

Annexes 5 : Méthode de calcul du poids spécifiques duriez des éprouvettes témoinsVII

TABLE DES MATIERES VIII

Auteur : HANTANIRINA Dolie Nilsene

Titre : « AMELIORATION DES CARACTERISTIQUES
MECANIQUES DES ENROBES BITUMINEUX PAR DES FILLERS
MINERAUX DE LA REGION VAKINANKARATRA »

Nombre de page : 78

Nombre de tableaux : 32

Nombre des figures : 17

Nombre des photos : 19

Nombre des annexes : 05



RESUME

Notre étude au sein du laboratoire LNTPB consiste à déterminer une meilleure formulation d'enrobé bitumineux par la valorisation des poudres minérales issues des trois carrières dans la région du Vakinankaratra : poudre de basalte, poudre de granite et poudre de pouzzolane. L'objectif principal est d'améliorer le comportement mécanique de l'enrobé bitumineux pour la construction routière. Des essais ont été réalisés sur différents pourcentages en poudres minérales. C'est la formulation avec ajout de 3% en masse de poudre de granite qui donne les meilleurs résultats du point de vue mécanique et résistance : $R_c = 56,9$ bar ; $R_{ci} = 43,0$ bar ; Fluage 32 1/10 mm ; Compacité = 92,6 %, Stabilité ≥ 980 daN.

Mots clés : enrobés bitumineux, poudre fine minérale, granite, basalte, pouzzolane, comportement mécanique.

ABSTRACT

Our study in the Laboratory LNTBP consists in determining a better asphalt mix formulation by upgrading mineral powders from the three (03) quarries from the region Vakinankaratra: basalt powder, granite powder and pozzolan powder. The main objective is to improve the mechanical behavior of asphalt for road construction. Tests were carried out on different percentages of powders. The formulation with the addition of 3% by mass of granite powder which gives the best results from a mechanical and resistance point of view: $R_c = 56.9$ bar; $R_{ci} = 43.0$ bar; Creep = 32 1/10 mm; Compacity $c = 92.6\%$; Stability ≥ 980 daN.

Keyword: asphalt, power, granit, basalt, pouzzolan, mechanical behaveor

Directeur de Mémoire : Docteur RAKOTOMALALA Zolimboahangy

Encadreur Professionnel : Docteur RANDRIAMALALA Richard

Contact de l'auteur :

- Email: dolienilsenehantanirina@gmail.com
- Telephone: 034 04 508 71 / 033 03 020 51
- Adresse: 0906 B 290 Est Volavita