

9/03

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil

Laboratoire Construction et Environnement

Mémoire de fin d'études

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Civil

Thème: LIANTS ET ENROBES COLORES



Etudié par : M. Laid ROUASKI

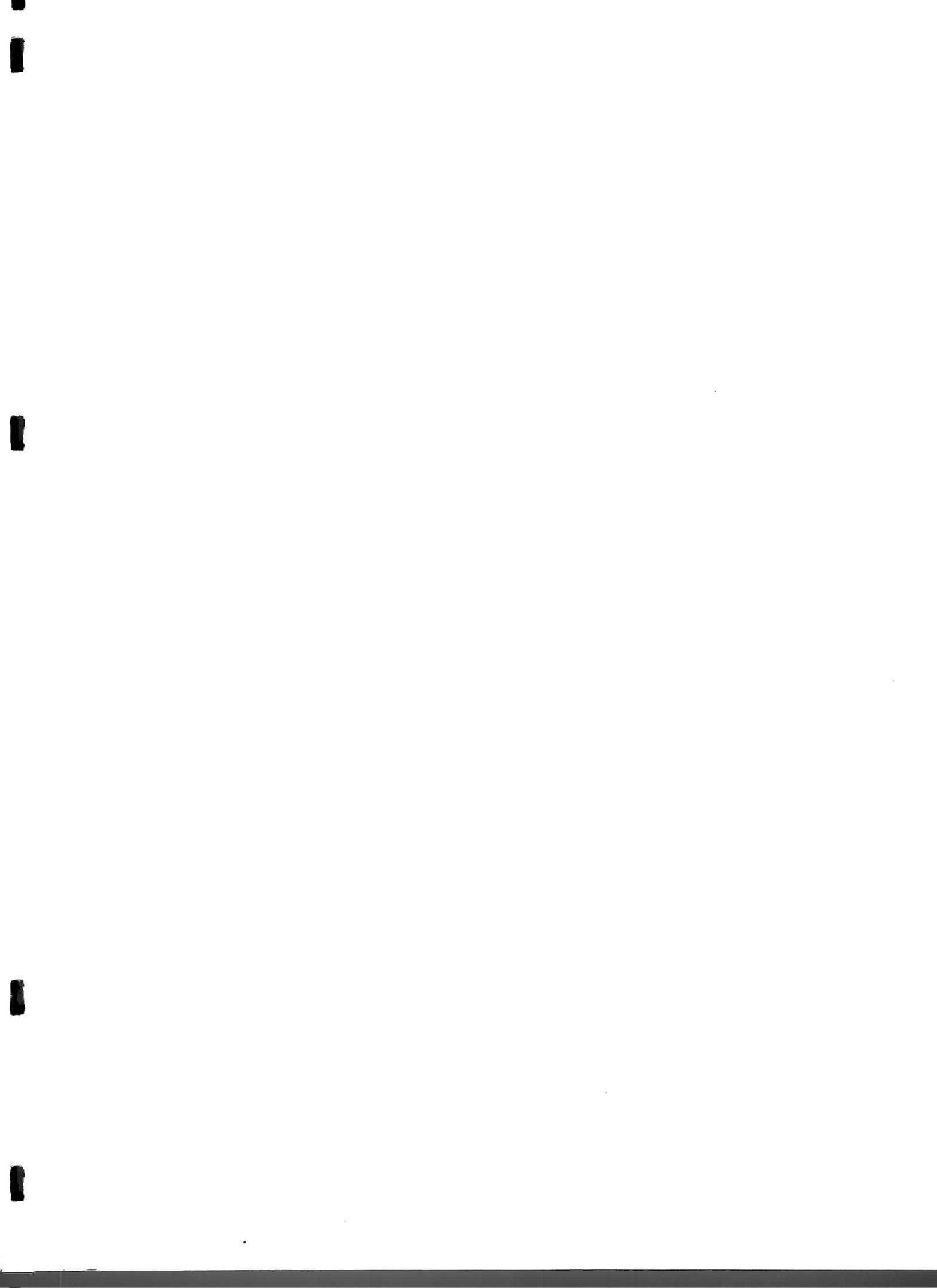
Proposé et Dirigé par:

M^{me}. N. BAUCHE chargée de cours ENP

M. A. BOUKEROU chef de département bitume, chimie et environnement CTTP

M^{me} D. MEDDED chef de service chimie et environnement CTTP

Promotion 2003



ملخص:

الهدف من هذا العمل هو الحصول على خرسانة زفتية ملونة و دراسة الخصائص التكنولوجية للزفت و/أو المستحلب المكون لهذه الخرسانة.

ثلاثة ملونات تم استعمالها: أكسيد الحديد أحمر و أصفر، و ثاني أكسيد التيتان بنسب متفاوتة.
الخرسانة الإزفلتية الملونة التي تحتوي على 1% من الملون لها قدرات ميكانيكية قريبة من الخرسانة الإزفلتية بدون ملون.

كلمات مفتاحية:

خرسانة زفتية، زفت، مستحلب، ملون، الروابط الهيدروكربونية، الأغلفة الملونة .

Résumé:

Le but de notre travail consiste à l'élaboration d'un enrobé coloré et l'étude des propriétés technologiques des liants hydrocarbonés modifiés par des pigments. Les performances mécaniques ont été étudiées.

Trois pigments sont utilisés ; l'oxyde de fer rouge et jaune, le Dioxyde De Titane sont incorporés dans le liant avec différents pourcentages.

Les bétons bitumineux colorés renferment 1% de pigment présentent des performances proches de celles de béton témoin.

Mots clés:

Béton bitumineux, bitume, émulsion, pigment, liant coloré, enrobés colorés.

Summary:

The objectif of our work consists in studying colored bituminous mix and technological properties of the bitumen binders modified by pigments. The mechanical performances have been studied.

Three pigments are used; the red and yellow iron oxide, the Dioxide of Titanium is built-in in the binder with various percentages.

The colored Bituminous concretes contain 1% of pigment present performances close to those of pilot concrete.

Key words:

Bituminous concrete, bitumen, emulsion, pigment, colored binder, colored bituminous mix.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier et en premier lieu mon Dieu le tout puissant et miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour achever ce travail.

Je voudrai en deuxième lieu, saisir cette occasion pour remercier chaleureusement et profondément de mon cœur, ma co-promotrice **M^{me} MEDDED**, pour son dévouement, ses conseils, son soutien **moral** et matériel durant les moments difficiles et surtout pour sa disponibilité le long de l'élaboration de ce travail.

Il m'est particulièrement agréable d'exprimer mes vifs remerciements à ma promotrice **M^{me} BAUCHE** et co-promoteur **M. BOUKEROU** qu'ils m'ont proposé ce sujet et pour toute l'aide et le soutien durant le travail, sans oublier **M^{me} HAMIDI** de DBA –CHEBLI qui m'a fabriqué l'émulsion

J'adresse mes vifs remerciements, à tous les ingénieurs de département bitume, chimie et environnement de CTPP et en particulier **M. DOUKALI** pour ses critiques constrictives, et l'intérêt qu'il a apporté à mon travail

Sans oublier (**FAOUZI, ADEL, M^{me} BOULMALY**) les techniciens qui m'ont beaucoup aidé pour l'achèvement de mes essais, trouvant mes profonds respects et remerciements.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury d'avoir accepté d'examiner et évaluer mon travail.

Finalement, je remercie tous les enseignants qui ont participé à notre formation, à toute la promotion 2003 et tous qui m'ont aidé de près ou de loin.

DEDICACES :

**Je dédie ce modeste travail à mes très chers
parents**

Je le dédie également à

**-Mes frères et surtout ZIANE qui sans lui ce
travail n'aurait jamais pu voir la lumière**

- Mes sœurs ;

- Toute ma famille ;

- Tous mes amis ;

SOMMAIRE

Liste des tableaux	
Listes des figures	
Synthèse bibliographique	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1..... constituants des enrobes colorés	
1.1-introduction :.....	4
1.2-les granulats	4
1.2.1-les qualités exigées.....	4
1.2.2-les principaux essais sur les granulats.....	5
1.2.2.1-la granulométrie.....	5
1.2.2.2-l'angularité.....	5
1.2.2.3-la forme.....	6
1.2.2.4-Essai Micro-Deval-humide	6
1.2.2.5-Essai los Angeles.....	6
1.2.2.6-Résistances au polissage.....	7
1.2.2.7-Catégorie de gravillons.....	7
1.2.2.8-Essai de friabilité.....	8
1.2.2.9-propreté.....	8
1.2.2.10-Catégorie de sables.....	8
1.3- liants hydrocarbonés	8
1.3.1-type de bitume.....	8
1.3.1.1-bitume naturel.....	8
1.3.1.2-asphalte naturel.....	9
1.3.1.3-bitume de pétrole	9
1.3.1.4-les procédés de fabrication des bitumes	10
1.3.1.5-les principaux essais sur les bitumes	10
1.3.1.6-classification des bitumes purs.....	13
1.3.2-bitumes fluidifiés, fluxés et émulsion de bitume.....	13
1.3.2.1-bitumes fluidifiés	14
1.3.2.2-bitumes fluxés.....	14
1.3.2.3-émulsion de bitume	14
Chapitre 2..... formulation du béton bitumineux	
2.1-introduction.....	30
2.2-les propriétés fondamentales des mélanges bitumes –granulats.....	30
2.3-mélanges bitumineux.....	30
2.4- formulation des enrobés bitumineux	31
2.5-classification des chaussées d'après leur compacité	33
2.6-principaux essais sur enrobés	33
2.7-spécification relative au granulats pour béton bitumineux -couche de roulement-....	37
2.8-la méthode LCPC pour l'étude des mélanges	37
2.9- calcul de la compacité des éprouvettes.....	37
Chapitre 3..... la couleur et la lumière	
3.1- introduction.....	39
3.2-la lumière	40
3.2.1-réflexion de la lumière.....	40
3.2.2-réfraction de la lumière	40
3.2.3-diffraction de la lumière.....	40
3.3- la couleur	40
3.4- la vision et perception des couleurs	41

3.5-Lumière coloré et matière colorées.....	41
3.6.-terminologie des couleurs.....	41
3.7-analyse colorimétrique.....	42
3.8-pigment et colorant.....	42
3.9-principaux types de pigment minéraux	43
Chapitre4.....présentation des enrobés colorés	
4.1-introduction.....	46
4.2-description des revêtements colorés	46
4.2.1-les constituants.....	46
4.2.1.1-les granulats.....	46
4.2.1.2-les liants.....	46
- les liants à base de bitume.....	47
-les liants à base de résine	48
4.2.1.3-les colorants.....	50
4.3-Quelques notions de prix.....	50
4.4-les techniques bitumineuses pour couche de roulement.....	51
4.4.1-enduit superficiel d'usure.....	51
4.4.2-enrobés coulés à froid ou coulis bitumineux.....	52
4.4.3-enrobés colorés.....	52
4.4.4-les asphaltes colorés.....	53
4.5-domaine d'emploi des différentes techniques et restrictions d'usage.....	54
4.5.1-choix des revêtements colorés.....	54
4.5.2-réstriction d'usage.....	54
4.5.3-choix des différentes techniques bitumineuses colorés.....	55
4.6-propriétés particulières.....	56
4.6.1-protection thermique et réduisent l'orniérage.....	56
4.6.2-perception la nuit.....	57
4.6.3-propriétés photométriques et évolutions -économie.....	57
4.6.4-Amélioration de la sécurité.....	58
4.6.5-comprotement dans le temps des revêtements colorés.....	58
4.7-code des couleurs.....	59
4.8-conclusion.....	60
Partie expérimentale	
Chapitre1.....caractéristiques des constituants et composition du mélange	
1.1-introduction	62
1.2-Etude de laboratoire	62
1.2.1-provenance des matériaux	62
1.2.2-carctéristiques des constituants	62
1.2.2.1-Identification des granulats	62
1.2.2.2-Identification de l'émulsion	68
1.2.2.3-Identification de bitume	71
1.2.2.4-Formulation de l'enrobe à froid.....	75
1.2.2.5-Formulation de l'enrobés à chaud.....	85
Chapitre2..... les enrobés colorés à froids	
2.1-Introduction	87
2.2-caratéristiques technologiques et nuance de couleur de l'émulsion avec l'oxyde de fer rouge.....	87
2.2.1-avec 0,25% d'oxyde de fer rouge.....	87
2.2.2-avec 0,5% d'oxyde de fer rouge.....	88

2.2.3-avec 0,75% d'oxyde de fer rouge.....	88
2.2.4-avec 1% d'oxyde de fer rouge.....	88
2.3-Interprétation	90
2.4-temps de mûrissement et performances mécaniques des éprouvettes avec différents pourcentages de pigment	91
A- avec l'oxyde de fer rouge.....	91
B- avec l'oxyde de fer jaune	95
C- avec le Dioxyde de Titane	97
2.5- Interprétation	97
2.6-performance mécanique.....	98
2.7-Interprétaion.....	100
2.8-Résultats de la coloration.....	101
Chapitre3.....les enrobés colorés à chauds	
3.1-Introduction:.....	102
3.2-caractérisriques technologiques et couleur de bitume avec l'oxyde de fer rouge.....	102
3.3-Interprétation.....	104
3.4-performences mécaniques.....	105
Conclusion et recommandations.....	109
Référence bibliographique	
Annexe 1	
Annexe 2	
Annexe 3	

Liste des tableaux

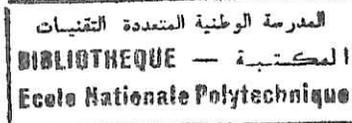
N°	Titres	Pages
PARITE THEORIQUE		
(1-1)	Classement des granulats selon la norme P18-101.....	6
(1-2)	Interprétation de l'essai de polissage accélérer des granulats	7
(1-3)	Catégorie de gravillons.....	7
(1-4)	Catégories de sables.....	8
(1-5)	Classification des bitumes purs.....	13
(1-6)	Plage de viscosité et domaine d'emploi des émulsions.....	24
(1-7)	Classification des émulsions cationiques selon la norme NFT65-011.....	28
(2-1)	Spécification aux granulats pour couches de roulement.....	37
(3-1)	Influences de la finesse des particules sur les nuances de teinte.....	43
(4-1)	Caractéristiques de différents liants de synthèse commercialisés en FRANCE.....	48
(4-2)	caractéristiques des résines époxydes.....	49
(4-3)	Aide aux choix des techniques par un bilan comparatif : avantages et inconvénients.....	56
(4-4)	Caractéristiques de surface sur de revêtement clairs.....	58
(4-5)	Estimation des durées de service en années des revêtements colorés.....	
(4-6)	Couleur sur chaussée : recommandations interministérielles du 15 mai 1996	60
PARTIE EXPERIMENTALE		
(1-1)	Analyse chimique sommaire.....	62
(1-2)	Analyse granulométrique.....	66
(1-3)	Caractéristiques des granulats de la carrière BOUABRA	68
(1-4)	Caractéristiques de l'émulsion	71
(1-5)	Caractéristiques du bitume pur.....	74
(1-6)	Fuseau de référence 2/14.....	75
(1-7)	Analyse granulométrique du mélange.....	76
(1-8)	Choix des teneurs en liants.....	78
(1-9)	Test d'enrobage sur béton bitumineux 2/14.....	80
(1-10)	Temps de mûrissement d'éprouvette avec K=3,3.....	80
(1-11)	Temps de mûrissement d'éprouvette avec K=3,5.....	81
(1-12)	Temps de mûrissement d'éprouvette avec K=3,7.....	81
(1-13)	Temps de mûrissement d'éprouvette avec K=3,9.....	81
(1-14)	Résultats de l'essai DURIEZ.....	83
(2-1)	Caractéristique de l'émulsion avec 0,25% d'oxyde de fer rouge.....	87
(2-2)	Caractéristique de l'émulsion avec 0,5% d'oxyde de fer rouge.....	88
(2-3)	Caractéristique de l'émulsion avec 0,75% d'oxyde de fer rouge.....	88
(2-4)	Caractéristique de l'émulsion avec 1% d'oxyde de fer rouge.....	88
(2-5)	Temps de mûrissement avec 0,2% d'oxyde de fer rouge	91
(2-6)	Caractéristique de l'émulsion avec 0.4% ,0.6% et 0.8% d'oxyde de fer rouge.....	91
(2-7)	Temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer rouge	92
(2-8)	Temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer rouge (mélange physique)...	94
(2-9)	Temps de mûrissement avec 0.4% et 1% d'oxyde de fer jaune.....	94
(2-10)	Temps de mûrissement avec 1% de Dioxyde de Titane.....	96
(2-11)	Résultats de l'essai Duriez pour les éprouvettes avec l'oxyde de fer rouge...	97
(2-12)	Résultats de l'essai Duriez pour les éprouvettes avec l'oxyde de fer jaune et le Dioxyde de Titane.....	97

(2-13) La nuance de couleur.....	100
(3-1) Caractéristiques technologiques des bitumes modifiés avec l'oxyde de fer rouge.....	102
(3-2) Résultats de l'essai DURIEZ.....	105
(3-3) Résultats de l'essai MARSHALL.....	105
(3-4) Résultats de l'essai de module de rigidité avec 0,2% de fer rouge.....	106
(3-5) Résultats de l'essai de module de rigidité avec 0,5% de fer rouge.....	106
(3-6) Résultats de l'essai de module de rigidité avec 1% de fer rouge.....	106

Liste des figures

N°	Titres	pages
PARITE THEORIQUE		
(1-1)	Emulsion directe.....	14
(1-2)	Emulsion inverse	14
(1-3)	Globule de bitume (cas des émulsions anionique)	15
(1-4)	Globule de bitume (cas des émulsions cationique)	15
(1-5)	Schématisation du déroulement d'une étude de formulation	17
(1-6)	Préparation directe de la phase aqueuse.....	19
(1-7)	Préparation de la phase aqueuse par solution mère.....	19
(1-8)	Schéma théorique de fabrication d'une émulsion.....	20
(1-9)	Processus de rupture et processus de décantation.....	21
(1-10)	Processus de rupture et processus de mûrissement.....	22
(1-11)	Rupture et adhésion d'une émulsion cationique sur une roche acide.....	25
(1-12)	Rupture et adhésion d'une émulsion cationique sur une roche calcaire.....	25
(2-1)	Effet de contrainte.....	31
(2-2)	déformation permanente.....	32
(2-3)	phénomène de fatigue.....	35
(2-4)	Principe de l'essai de traction indirecte.....	36
(3-1)	Réflexion de la lumière.....	39
(3-2)	Diffraction de la lumière.....	40
(3-3)	Vision et perception des couleurs.....	41
PARTIE EXPERIMENTALE		
(1-1)	Courbe granulométriques des fractions 8/15, 3/8, sable.....	67
(1-2)	Courbe de mélange pour béton bitumineux 2/14.....	77
(1-3)	Courbe du temps de mûrissement avec $K=3,3$	81
(1-4)	Courbe du temps de mûrissement avec $K=3,5$	81
(1-5)	Courbe du temps de mûrissement avec $K=3,7$	82
(1-6)	Courbe du temps de mûrissement avec $K=3,9$	82
(1-7)	Compacité en du module de richesse.....	83
(1-8)	Résistance à sec en fonction du module de richesse.....	84
(2-1)	Teneur en liant en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	89
(2-2)	Pseudo-viscosité en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	89
(2-3)	L'indice de rupture en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	89
(2-4)	L'adhésivité en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	90
(2-5)	Courbe du temps de mûrissement avec 0.2% d'oxyde de fer rouge.....	92
(2-6)	Courbe du temps de mûrissement avec 0.4% d'oxyde de fer rouge.....	92
(2-7)	Courbe du temps de mûrissement avec 0.6% d'oxyde de fer rouge.....	93
(2-8)	Courbe du temps de mûrissement avec 0.8% d'oxyde de fer rouge.....	93
(2-9)	Courbe du temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer rouge.....	93
(2-10)	Courbe du temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer rouge (mélange physique).....	94
(2-11)	Courbe du temps de mûrissement avec 0.4% d'oxyde de fer jaune.....	95
(2-12)	Courbe du temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer jaune.....	95
(2-13)	Courbe du temps de mûrissement avec 1% de Dioxyde de Titane.....	96
(2-14)	Compacité en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	98

(2-15)	Résistance à sec en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge	98
(2-16)	Résistance à l'immersion en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge..	99
(2-17)	Le rapport r/R en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	99
(3-1)	Pénétrabilité en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	102
(3-2)	TBA en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	103
(3-3)	Ductilité en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	103
(3-4)	Point d'éclair et point de flamme en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	103
(3-5)	Susceptibilité thermique en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	104
(3-6)	L'adhésivité en fonction du pourcentage d'oxyde de fer rouge.....	104



Synthèse bibliographique

Cette synthèse bibliographique nous a permis de recenser les principales recherches antérieures

et de définir certaines notions de base utilisées pour la suite de ce travail. elle comporte quatre

Grands chapitres et qui sont :

- Les différents constituants des enrobés bitumineux
- Les propriétés fondamentales des mélanges bitumineux
- Les phénomènes physiques et chimiques liés à la couleur
- La présentation des enrobés colorés

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Pendant plusieurs années, les aménagements de la voirie urbains ont été adaptés à un accroissement continu de la circulation automobile avec l'élargissement des emprises roulables et la prédominance du noir des revêtements hydrocarbonés. Or les concepteurs routiers visent maintenant un meilleur équilibre des divers modes de déplacement et un meilleur partage de l'espace public au bénéfice de la vie locale et des usagers.

La demande de couleur sur les revêtements répond à des motivations et des objectifs variés

a- la sécurité et la signalisation

La couleur permet de différencier la fonctionnalité des éléments de voirie (pistes cyclables, voies piétonnes, voies de bus, entrées d'agglomérations, bandes d'arrêt d'urgence, parkings...) et de renforcer la signalisation (passages piétons, ralentisseurs, carrefours, tunnels ou passages souterrains, tourne à gauche, tourne à droite, etc....).

Le rôle de la couleur dans ces différents exemples est de créer un contraste qui permet de « tenir éveillé » ou « réveiller » l'attention de l'automobiliste, du cycliste ou du piéton.

L'objectif général est de modifier les champs de vision de l'utilisateur pour l'amener à réagir positivement. Les revêtements colorés, associés à certains aménagements (panneaux, rétrécissements de chaussée, ...) ont d'ailleurs remplacé dans certains cas les obstacles physiques type gendarmes en place pour traiter les points dangereux en recherchant à faire ralentir les automobilistes. L'avantage de la couleur est d'être moins agressive, plus conviviale.

b- l'esthétique

La couleur permet de fondre la voirie et ses annexes dans leur environnement : architecture des bâtiments, des espaces verts, cours d'école, aires de jeux, sols sportifs, parvis, places, allées piétonnes, trottoirs, îlots, etc....

c- l'éclairage

Les revêtements colorés permettent d'améliorer l'efficacité des systèmes d'éclairages publics, ainsi le facteur de réflexion diffuse de la lumière peut être multiplié par trois par rapport à un enrobé noir par utilisation d'un revêtement coloré.

L'utilisation de revêtement coloré en milieu urbain et dans les tunnels permet la réalisation d'économies car il favorise une réduction de l'éclairage.

Ainsi, les revêtements colorés sont utilisés pour créer des ambiances urbaines, renforcer l'identité d'une ville, faciliter la lecture des espaces, favoriser la cohabitation des différents usagers et identifier les lieux. Parmi les techniques utilisées pour la coloration des revêtements routiers, il y a les enduits superficiels d'usure avec granulats colorés de fine dimension (4/6) qui sont utilisés dans les zones peu circulées ; les coulis bitumineux utilisés dans les zones piétonnes ; les enrobés coulés à froid colorés pour les rues et pistes cyclables ; l'asphalte coloré pour les rues et trottoirs de ville ; les enrobés colorés à chaud appliqués en faible épaisseur (≤ 4 cm) et les enrobés avec des bitumes pigmentables ou des bitumes synthétiques pour les routes plus achalandées.

Le but de cette étude est la fourniture d'information sur les enrobés colorés. L'aspect essentiel sur lequel est focalisée cette étude est l'influence du pourcentage de l'oxyde de fer sur les caractéristiques physiques et technologiques des liants ainsi que le comportement des

enrobés colorés au moyen des essais classiques (DURIEZ, MARSHALL) et particuliers (module de rigidité).

Ce travail qui rentre dans le cadre d'une meilleure connaissance des matériaux entrant dans la composition des enrobés colorés a été abordé sous deux étapes essentielles, qui sont :

- ◆ Un synthèse bibliographique, qui nous a permis de présenter les matériaux composants un enrobé coloré, ainsi que les différentes techniques et domaines d'emplois de ces enrobés.
- ◆ Une partie expérimentale qui illustre la méthodologie utilisée et permet de suivre l'évolution de la coloration et les caractéristiques des liants ainsi que les performances mécaniques en fonction du pourcentage de l'oxyde de fer

chapitre1

constituants des enrobés bitumineux

1.1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons exposer les différents constituants des enrobés bitumineux, ainsi que les essais relatifs à chaque matériau.

1.2- Les granulats :

On appelle granulats, tout matériau inerte provenant de l'érosion des roches ou de leur broyage.

Le terme granulats est étendu à des granulats artificiels ou non utilisés dans la construction : laitier granulé, machfer, déchets de briques ...

Un granulats est dit lourd lorsque sa densité apparente est supérieure à 1, et léger dans le cas contraire

Suivant la dimension des grains on distingue : [4]

- **les fines** : éléments de dimensions inférieures ou égales à 0.08mm.

- **Sables** : granulats de plus petite dimension $d < 1\text{mm}$, et de plus grande dimension $0.08\text{mm} < D \leq 6.3\text{mm}$.

- **Gravillon** : granulats : $d \geq 1\text{mm}$, $D \leq 31.5\text{mm}$

- **Cailloux** : granulats : $d \geq 20\text{mm}$, $D \leq 80\text{mm}$.

- **Graves** : granulats $0/D$ avec $6.3\text{mm} < D \leq 80\text{mm}$.

Les granulats sont destinés après adjonction d'un liant à la confection des bétons

1.2.1-Les qualités exigées

Les qualités requises des matériaux destinés à constituer une couche de fondation et une couche de base sont les suivantes:

-présenter une granulométrie convenable de telle sorte que le matériau ne ségrége pas dans les diverses manipulations, constituer une couche facile à régler et présenter par frottement interne une bonne résistance aux efforts avec un module d'élasticité élevé.

-Etre constitué par un agrégat d'autant plus dur et résistant que les efforts dans la couche considérée sont élevés et que leur répétition est importante .Il ne faut pas dans une couche de base par exemple que l'agrégat se fragmente indéfiniment et produise des fines qui risquent de transformer petit à petit un gravier en sable beaucoup moins stable.

-Ne pas comporter de fines argileuses, ou en comporter si elles ne sont pas dangereuses .Les fines argileuses, sûr humidifiées un jour ou l'autre ; feront chuter le frottement interne jusqu'à l'annuler presque totalement.

-De façon générale, la stabilité mécanique doit être aussi indépendante que possible des conditions climatiques et notamment de la teneur en eau.

Lorsqu'on trouve en gisement ou en carrière un matériau répondant à toutes ces exigences, il n'est nul besoin de rechercher mieux, si malheureusement tel n'est pas le cas, on peut être tenté de « stabiliser » le matériau dont on dispose.

On distingue alors :

a- la stabilisation mécanique qui consiste à modifier la granulométrie, soit par apport d'un autre matériau inerte, soit par criblage, élimination de tranches excédentaires et reconstitution.

b- La stabilisation chimique : qui consiste selon le cas à :

b.1- conférer de la cohésion à un matériau dont le frottement interne est insuffisant (grave maigre traité au ciment ou au bitume)

b.2- hydrophober des matériaux sensibles à l'eau (traitement au bitume ou à des agents chimiques plus complexes)

b.3- neutraliser par échange ionique des fines argileuses nocives (chaux, ciment)

b.4- augmenter la stabilité des fines par des agents dispersants.

1.2.2-Principaux essais sur les granulats.

Les principaux essais sur les granulats sont :

1.2.2.1-La granulométrie

La granulométrie caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. Elle est réalisée par tamisage pour les plus gros et par sédimentométrie pour les éléments inférieurs à 80 μ m.

Les gravillons sont définis par leur plus petite et leur plus grande dimension. On parle d'un d/D avec une tolérance sur D de 15% si $D > 1,58d$ et de 20% si $D \leq 1,58d$.

Les graves et les sables sont des matériaux à granularité continue 0/D. D étant supérieur à 6,3mm pour les graves.

Le rôle de la granulométrie

Trois facteurs interviennent : le pourcentage de fines, le calibre des gros éléments et la forme de la courbe granulométrique.

- Le pourcentage de fines (élément < 80 μ m) : si ce pourcentage est nul ou insuffisant, le matériau est peu compact, difficile à serrer s'il n'est pas concassé. S'il est excessif, il y a formation de boue au compactage. On admet en général que le pourcentage des fines doit rester compris entre 5 et 15%, cette fourchette constituant un maximum.

- Le calibre des gros éléments : il conditionne à la fois la ségrégation et l'épaisseur de couche répandue.

- La forme de la courbe granulométrique conditionne l'aptitude au compactage, l'absence de ségrégation et la compacité du matériau compacté. On peut dire que plus les contacts entre grains seront nombreux, plus la couche sera stable et plus le matériau sera compact et moins on risquera de voir se produire des déplacements des grains et par suite des tassements.

L'étalement granulométrique, qui traduit les deux premières caractéristiques, est donné par le coefficient de HAZEN ou coefficient d'uniformité, Selon que ce coefficient est plus ou moins voisin de 1 on parle d'une granulométrie serrée ou étalée.

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

La courbure est donnée par le coefficient de courbure

$$C_c = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$$

Où D_{10} , D_{30} , D_{60} sont les côtes des mailles de tamis aux travers desquelles passent 10%, 30%, 60% du granulat.

1.2.2.2-L'Angularité :

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement en améliorant l'adhérence et pour ceux des assises de chaussées, dont elle améliore la stabilité.

- pour un granulat de roche massive, elle est égale à 100%
- pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données :

a) l'indice de concassage I_c , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré.

b) le rapport de concassage **Rc**, rapport entre **d** du matériau soumis au concassage et **D** du granulats obtenu.

1.2.2.3-La Forme

Elle joue un rôle important, à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'assise, des granulats plats réduisant la compacité et la stabilité.

Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur.

La masse de granulats plats, exprimée en pourcentage de la masse de l'échantillon, est appelée indice d'aplatissement.

1.2.2.4-Essai Micro-Deval humide

La résistance à l'usure est déterminée par l'essai Micro-Deval humide.

L'essai est réalisé dans un cylindre de 20cm de diamètre et de 15,4cm de longueur dans lequel on introduit les granulats à essayer, on ajoute une charge abrasive constituée de billes d'acier sphérique de 10mm de diamètre et 2,5l d'eau. Le cylindre tourne à 100tr/min pendant 2h.

Si **m** est la fraction passante au tamis de 1,6mm et si **M** est la masse initiale, le coefficient Micro-Deval humide est égal à :

$$MDE=100 \times m/M$$

1.2.2.5-Essai los Angeles

La résistance à la fragmentation ou la résistance au choc est appréciée par l'essai los Angeles. Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70cm de diamètre et 50cm longueur. Les granulats à essayer et des boules d'acier. Le cylindre effectue 500 révolutions à 30tr/min. Le poids et la granularité de la prise d'essai sont déterminés en fonction de la classe granulaire.

Si **m** est la fraction passante au tamis de 1,6mm le coefficient Los Angeles est égal à :

$$LA=100 \times m/5000$$

Classement de synthèse.

A partir des essais de **los Angeles** et **Micro-Deval** sur les granulats destinés aux travaux routiers, les gravillons sont classés suivant les cinq catégories de résistance mécanique du tableau (1-1) L'appartenance à

une catégorie, nécessite de satisfaire simultanément :

- à la somme des valeurs de **LA** et de **MDE**.
- et aux valeurs de **LA** et **MDE** du tableau.

Tableau (1-1): Classement des granulats selon la norme P 18 – 101 [13]

catégorie	LA +MDE	LA	MDE
A	≤25	≤20	≤15
B	≤35	≤25	≤20
C	≤45	≤30	≤25
D	≤55	≤35	≤30
E	≤80	≤45	≤45
F	>80	>45	>45

Lorsque la catégorie F est retenue, les limites supérieures doivent obligatoirement être fixées

1.2.2.6- Résistance au polissage

L'essai permet de mesurer la résistance au polissage sous l'effet du trafic. On place pour cela le gravillon inséré dans des plaquettes de mortier, à la périphérie d'un tambour sur laquelle roule librement une roue équipée d'un pneumatique. Un agent abrasif est interposé au cours de l'essai (sable siliceux pendant trois heures puis poudre d'émeri pendant les trois heures suivantes). On mesure ensuite le coefficient de frottement avec un appareil de type pendule équipé d'un patin en caoutchouc qui permet de mesurer l'énergie absorbée par le frottement. L'aptitude au polissage est mesurée par le coefficient de frottement résiduel

Tableau (1-2): Interprétation de l'essai de polissage accéléré des granulats [13]

Coefficient de polissage	Appréciation	Interprétation
Inférieur à 0.35	Mauvais	en principe un tel granulat ne doit pas être employé en couche de surface
Entre 0.35 et 0.45	Passable	un tel granulat ne doit être utilisé que lorsque les conditions de tracé et de trafic sont favorables
Entre 0.45 et 0.55 Supérieur à 0.55	Bon Très bon	l'utilisation d'un tel granulat est recommandée lorsque les conditions de tracé et de trafic sont défavorables (virages, carrefours, vitesses élevées, trafic intense)

1.2.2.7- Catégories de gravillons

Tableau (1-3): catégories de gravillons [4]

catégorie	Granularité		A* ou Em		propreté	
	Fuseau de spécification (position)	Fuseau de régulation (étendue)				
I	Refus à 1.25D=0%	.Refus à D 1 à 15% (1 à 20 % si >D1.58d)	Etendue maximale 10% à d	≤10	≥ (D+d)/3	≤0.50
Ibis		.Tamisât à d	10% à D	≤15	≥ (D+d)/3.5	≤1
II	Refus à 1.58D=0%	.tamisât à 0.63d<3% (<5% si D ≤ 5mm)	25% à (D+d)/2	≤20		≤2
III		si D ≥ 2.5d tamisât à (D+d)/2=33 à66%		≤30	≤3	

*pour des granularités inférieures à 10mm, A est majoré de 5 points

1.2.2.8-L'essai de friabilité :

Cet essai est aux sables ce qu'est l'essai Micro-Deval pour les gravillons ; Son but est de déterminer la résistance à l'attrition du sable en présence d'eau.

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.05mm produits au cours de l'essai.

Si M est la masse de matériau soumis à l'essai et m' la masse des éléments inférieurs à 0.05mm produits au cours de l'essai, par définition le coefficient de friabilité du sable sera :

$$FS= 100*(m'/M)$$

1.2.2.9- Propreté :

La propreté est mesurée par l'essai d'équivalent de sable et par l'essai au bleu de méthylène

L'essai d'équivalent de sable est réalisé dans une éprouvette transparente de 32cm de diamètre avec deux traits graves à 10cm et 38cm du fond. Une solution lavante est versée jusqu'au trait repère de 10cm dans l'éprouvette, On introduit 120g de sable, après 10min, on agite le tube horizontalement (90 secousse).

Enfin, par un tube laveur qu'on enfonce dans le matériau au fond de l'éprouvette, on ajoute la solution lavante jusqu'au trait 38cm, on laisse décanter 20 min.

On peut distinguer trois zones. On détermine la hauteur de la partie sableuse h_1 (partie inférieure) et la hauteur de la colonne trouble (sable+argile) h_2 .

On appelle équivalent de sable : $ES=100 \times h_1 / h_2$.

1.2.2.10- Catégories de sables

Les différentes catégories de sable sont représentées dans le tableau (1-4)

Tableau (1-4): catégories de sables [4]

Catégorie	Granularité		ES 10%	VB si ES10% Non obtenu
	Position du fuseau	Etendue maximale du fuseau		
a	refus à 1.58D=0	10% à D et à 0.5mm	≥ 60	≤ 1
b		15% à 2mm et 4mm		
c	Refus à D=1 à 15%	4% à 0.08mm si fines < 12 %	≥ 50	≤ 1.5
		6% à 0.08mm si fines ≥ 12 %		
			≥ 40	≤ 2

1.3- Liants hydrocarbonés

A l'origine, les seuls liants routiers étaient les goudrons, qui provenaient de la distillation des goudrons bruts d'usines à gaz ou de cokeries de hauts-fourneaux. L'arrêt des usines à gaz a fait que le goudron routier, sous sa forme traditionnelle, a complètement disparu, le brai de cokerie trouvant d'autres applications plus rentables et les huiles de goudron étant utilisées en ajout au bitume pour en faire des bitumes fluxés.

La quasi – totalité des liant routiers sont donc maintenant à base de bitume.

1.3.1- Types de bitumes

1.3.1.1- Bitume naturel

Le bitume existe à l'état naturel sous forme de résidu d'anciens gisements de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par une sorte de distillation

naturelle. Ils sont extraits soit à ciel ouvert, les gisements se présentent alors comme de véritables lacs, soit sous forme de filons en sous sol. Le plus connu de ces bitumes naturels est le bitume de TRINIDAD qui relève du premier type de gisement.

Au total, la production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200000t.

Ils ne sont guère utilisés que comme ajout pour certaines utilisations particulières, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques (*aptitude à être coloré*, effet stabilisateur pour les asphaltes coulés...). [13]

1.3.1.2- Asphalte naturel

L'asphalte naturel est constitué par une roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20%).

Le bitume naturel d'imprégnation a des caractéristiques particulières du fait de l'exsudation par la roche des fractions non colloïdales.

L'asphalte naturel entre traditionnellement dans la composition de l'asphalte coulé. Il peut également être utilisé comme appoint dans les enrobés auxquels il apporte du liant et des fines.

1.3.1.3- Bitume de pétrole

Substance visqueuse de couleur sombre, caractérisée par sa capacité à lier entre eux des granulats, c'est de très loin le liant hydrocarboné le plus utilisé dans les chaussées.

Les bitumes de pétrole sont fabriqués par distillation de bruts sélectionnés. Pour obtenir économiquement les propriétés spécifiques à chaque utilisation, on peut utiliser des procédés par soufflage, de précipitation, de mélange et bien souvent une combinaison de ces procédés.

Le bitume est composé d'hydrocarbonés de poids moléculaires élevés appartenant en majorité aux groupes naphthéniques et asphaltiques. D'une façon générale, le bitume contient:

- 80 à 85% de carbone
- 10 à 15% d'hydrogène.
- 2 à 3 %d'oxygène.
- traces : soufre, azote, vanilium, nickel, aluminium.

Le traitement du bitume à l'heptane normal, consiste à séparer le bitume en deux fractions:

- les maltènes et les asphaltènes. Les maltènes constituent la partie soluble dans l'heptane normal et peuvent, par traitement à l'héxane normal, être fractionnées en deux parties ; les huiles et les résines. Les huiles à leur tours peuvent être séparées en huiles aromatiques et huiles saturées.

Exemple de composition pour un bitume 80/100

- 11% d'asphaltènes.
- 34% de résines.
- 55% d'huiles.

Les proportions respectives des différentes fractions dépendent des facteurs suivants:

- l'origine du pétrole
- le procédé de fabrication du bitume
- le procédé de séparation.

a- Description des asphaltènes

Les asphaltènes sont des composés polaires essentiellement aromatiques ayant l'aspect d'un solide brun -noir. Suivant le bitume, leur pourcentage varie de 10 à 30. Les molécules d'asphaltènes ont une tendance très marquée à s'associer entre elles pour former des associations moléculaires: les micelles d'asphaltènes. On admet que les asphaltènes sont les produits de maturation des résines.

b- Description des résines

Ce sont des résines noires qui fondent par chauffage et qui sont constituées de molécules polycycliques pouvant contenir des cycles saturés, aromatiques ou hétéroaromatiques (soufre, azote, et oxygène).

c- Description des huiles saturées

Cette famille est constituée de molécules principalement paraffiniques. Ils sont soit incolores soit légèrement jaunâtres.

d- Description des huiles aromatiques

Ce sont des huiles visqueuses de couleur brun sombre. Environ 30 % des atomes de carbone font partie des structures aromatiques.

L'ensemble des huiles (saturées + aromatiques) constitue 40 à 60% du bitume

1.3.1.4- Les procédés de fabrication des bitumes [7]

En Algérie, il existe trois procédés pour la fabrication des bitumes routiers à savoir la distillation sous vide (distillation directe), le semi-soufflage ainsi que le procédé de désasphaltage.

a- Le procédé de distillation sous- vide

Ce procédé qui s'effectue dans une tour sous-vide consiste à créer un vide de 30 à 40 mmHg obtenu à l'aide d'éjecteur de vapeur. La pression réduite qui règne à l'intérieur de la tour est destinée à poursuivre la séparation physique des constituants sans les dégrader thermiquement. A cet effet, la température de marche est de 340°C à 360°C et ne doit jamais dépasser 400°C à la sortie du four.

b - Le procédé de semi-soufflage

La fabrication du bitume commence en premier dans la tour sous -vide, le résidu dit « base molle » récupéré est traité dans la section de soufflage à l'air pour obtenir un bitume routier. Cette technique consiste à injecter de l'air dans la colonne de soufflage à des températures comprises entre 250-280°C et un débit de 1000Nm³ /h

Il résulte de cette introduction d'air un durcissement accompagné d'une diminution de la susceptibilité à la température et essentiellement à la création des asphaltènes.

c- Le procédé d'extraction (le désasphaltage)

Le désasphaltage au solvant est employé comme complément dans le raffinage des bruts à huile, Il est effectué sur le fond de distillation sous-vide qui ne peut être employé comme bitume étant donné sa forte teneur en fractions lubrifiantes. Le brut à bitume ainsi que l'asphalte récupéré par désasphaltage au propane sont fractionnés en gazoles et sont traités ensuite dans la section de soufflage à l'air pour obtenir un bitume 40/50.

1.3.1.5- Les principaux essais sur les bitumes

La sensibilité d'un bitume à la température est d'une importance fondamentale. Dans les applications routières à chaud, il est nécessaire d'amener le bitume à l'état liquide pour réaliser de façon satisfaisante le mélange bitume-granulats.

Le bitume doit en outre, conserver sa consistance dans le domaine des températures d'utilisation.

D'une façon générale, la connaissance d'un bitume passe par :

- la mise au point et l'utilisation universelle d'essais techniques semi empiriques, destinés à apprécier sa consistance et son comportement dans le domaine des températures d'utilisation.
- la mise au point de lois de vieillissement prédictives du comportement à long terme du bitume.
- la mise au point d'essais physico-chimique pour mettre en évidence les familles rassemblées en groupes génériques.

Essais universels semi empiriques

1- Essai de pénétration

Dans l'essai de pénétration, on détermine la dureté d'un bitume. La pénétration est l'expression de la profondeur en 1/10mm à laquelle pénètre une aiguille de dimensions déterminées, dont le poids avec son support est de 100g, dans un échantillon de bitume au bout d'un temps de 5secondes.

2- Essai de ramollissement

La consistance des bitumes décroît progressivement lorsque leur température augmente. Ils se transforment graduellement et de façon à peine perceptible, de matériaux excessivement épais et d'une fluidité lente à des matériaux mous et d'une fluidité moins visqueuse.

La température de ramollissement, donnée par la méthode « bille et anneau » est la température à laquelle une bille d'acier placée sur un petit disque de bitume contenu dans un anneau de métal, le tout étant chauffé selon un processus déterminé, imprime à l'échantillon de bitume, une déformation verticale définie.

3- Mesure de la densité relative à 25°C

La densité relative d'un bitume, qui varie avec la température, est déterminée, à 25°C, par la méthode de pycnomètre. C'est le rapport de la masse d'un volume donné de bitume à la masse d'un égal volume d'eau.

La densité des produits bitumineux est intéressante à connaître car elle permet de faire les corrections de volumes lorsque ceux-ci sont mesurés à des températures élevées, Elle entre également dans le calcul du pourcentage des vides dans les mélanges bitumineux routiers compactés.

4- Perte de masse au chauffage

L'essai consiste à chauffer dans une étuve ventilée pendant 5 h à une température de 163°C, une couche de matériau bitumineux.

On détermine, par cette méthode, l'effet de la chaleur et de l'air sur le bitume en appréciant la réduction de la pénétrabilité et la variation de la masse de l'échantillon.

5- Point d'éclair – point de feu

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle les vapeurs qui se dégagent d'un échantillon de bitume, chauffé dans les conditions de l'essai, s'enflamment à l'approche d'une flamme.

Le point de feu est la température à partir de laquelle un bitume prend feu et brûle pendant au moins 5 secondes.

6- Essai de ductilité à 25°C

La ductilité d'un matériau bitumineux est l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe lorsqu'on l'étire à une vitesse spécifiée et à une température donnée. La vitesse de l'essai est de 5 cm/min $\pm 5\%$.

7- Indice de pénétrabilité, susceptibilité des bitumes à la température

La susceptibilité des bitumes à la température, c'est –à –dire la mesure de la variation de leur consistance en fonction de la température, est généralement caractérisée par un nombre dénommé indice de pénétrabilité dans le domaine où la pénétrabilité est mesurable.

Cet indice de pénétrabilité est donné par la formule :

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

P1 : étant la pénétrabilité mesurée à la température T1.

P2 : étant la pénétrabilité mesurée à la température T2.

8- viscosité

La viscosité d'un bitume est la mesure de son frottement interne. Si une lame de liquide d'épaisseur *e* est prise entre deux plateaux parallèles de surface (*S*) et que les deux plateaux glissent l'un par rapport à l'autre à une vitesse *V*, la viscosité est définie par :

η =contrainte de cisaillement/taux de cisaillement

9- Appréciation de l'adhésivité liant-granulat

L'adhésivité d'un liant pour un minéral est marquée par sa faculté de pouvoir mouiller le minéral. En pratique routière, nous nous sommes intéressés à deux possibilités :

- le granulat est humide. Le liant pourrait t-il mouiller ?

Ce qu'il convient d'estimer ici est l'adhésivité dite active. L'essai à la plaque de Vialit pratiqué avec des granulats d'humidité connue, permet d'évaluer l'adhésivité active.

- notre couple étant formé, combien de temps résistera t-il aux assauts de l'eau, Cet aspect de l'adhésivité que l'on appelle passive nous importe peut-être le plus et de ce fait a suscité l'apparition du plus grands nombres d'essais. Le principe général de ces essais est d'enrober à chaud des granulats secs avec le liant puis d'apprécier le désenrobage éventuel en immersion statique dans l'eau

- les essais de vieillissement

Deux méthodes de simulation de vieillissement du bitume ont été développées pour suivre l'évolution du bitume au cours de son enrobage ou in situ dans la chaussée.

Le bitume incorporé dans un revêtement hydrocarboné subit deux types de vieillissement.

I- le vieillissement, à la construction (rapide)

Lors de la fabrication et la pose des enrobés hydrocarbonés (enrobage, mélange, compactage et refroidissement), le bitume, chauffé à une température de 160 à 170°C en présence d'air, subit un choc thermique qui entraîne un vieillissement rapide et limité. Ce vieillissement se traduit par une oxydation chimique importante. La plupart des praticiens sont d'accord pour reconnaître que ce vieillissement à la construction se traduit généralement par une chute de la classe du bitume.

Ce type de vieillissement est correctement, simulé par :

- *l'essai TROFT* : qui consiste à étuver pendant 5h à 163°C un film de liant de 3.2mm d'épaisseur.

- *l'essai RTOFT* : qui consiste à étuver 35 g de bitume contenus dans une fiole cylindrique animée d'un mouvement de rotation autour de son axe horizontal pendant 75mn à 163°C en présence d'oxygène.

2- le vieillissement en service

De nombreux chercheurs ont étudié l'évolution du bitume in situ. Des chantiers expérimentaux ont été faite et des comparaisons entre le bitume original et le bitume extrait de la route d'un certain âge ont été fait.

Ces comparaisons ont montré que des modifications dans la structure chimique du liant et dans ses propriétés physico-chimique et mécaniques se produisent. À savoir :

- Augmentation de la teneur en asphaltènes.
- Variation importante des teneurs en aromatiques et en résines.
- Augmentations du point de ramollissement.
- Diminution de la pénétration.
- Augmentation de la température de fragilité Frass.
- Augmentation de la viscosité

1.3.1.6- Classification des bitumes purs

Tableau (1-5): classification des bitumes purs [13]

Qualités	180-200	80-100	60-70	40-50	20-30
-Pénétrabilité (25°C, 100g, 5s). (1/10mm)	180à220	70à100	50à70	35à50	20à30
-Point de ramollissement bille et anneau... (°C)	34à43	42à48	46à51	50à56	52à68
-Densité relative à 25°C (méthode au pycnomètre)...	1,00à1,07		1,00à1, 10		
-Perte de masse au chauffage (163°C ,5h).....(%)	<2		<1		
-pourcentage de pénétrabilité restant après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale.....	>70	>70	>70	>70	>70
-Point d'éclair (appareil Cleveland)... (°C)	>230	>230	>230	>250	>250
-Ductilité à 25 °C.....(cm)	>100	>100	>80	>60	>25
-Solubilité dans le tétrachloroéthylène(C ₂ Cl ₄)..... (%)	>99,5				
-Teneur en paraffine..... (%)	<4,5				

1.3.2- Bitumes fluidifiés, fluxés et émulsion de bitume [13]

Les bitumes sont très visqueux à température ambiante. On peut les rendre suffisamment fluides par chauffage pour permettre l'enrobage des granulats, des enrobés et des graves-bitumes.

Par contre, lorsqu'on les utilise en répandage pour les enduits superficiels, plusieurs difficultés apparaissent liées, au maintien de températures élevées dans les répanduses, au refroidissement trop rapide du film de liant répandu avant gravillonnage (mouillage défectueux) et aux difficultés de mise en œuvre.

Deux types de solution ont été mises au point pour abaisser la viscosité à la mise en œuvre tout en la retrouvant avant la mise en service:

- l'utilisation de diluants.
- la mise en émulsion dans de l'eau.

1.3.2.1- Bitumes fluidifiés

Ils sont fabriqués sous le nom de cut-back et on les distingue par leur vitesse de séchage, elle-même fonction du fluidifiant (essence, kérosène ou gasoil).

On distingue traditionnellement les catégories suivantes en fonction de la vitesse de séchage:

- lente (SC-slow-curing)
- moyenne (MC- de medium-curing).
- rapide (RC, de rapide-curing).

1.3.2.2- Bitumes fluxés

Ils sont obtenus par mélange de bitume et d'huiles de houille à faible volatilité provenant de la distillation du goudron brut.

Contrairement au kérosène des bitumes fluidifiés, une partie des huiles de fluxage reste associée au bitume de base qui se trouve ainsi plastifié.

1.3.2.3- Emulsion de bitume

Une émulsion est une dispersion de deux liquide non miscibles l'un à l'autre, préparée généralement à l'aide d'un produit dénommé émulsifiant. Elle est composée de deux phases : une phase dispersée et une phase dispersante.

On peut distinguer deux types d'émulsions en fonction de la nature de leurs phases:

1- *les émulsions directes*: c-à-d de type "huile dans l'eau" qui sont constituées d'un liquide hydrocarboné dispersé dans l'eau. (**fig1.1**)

2- *les émulsions inverses*: c-à- d de type " eau dans l'huile" qui sont constituées d'eau dispersée dans un liquide hydrocarboné. (**fig1.2**)

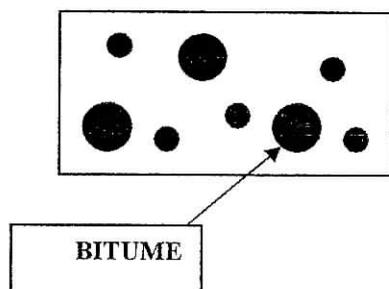


Fig. (1-1): émulsion directe

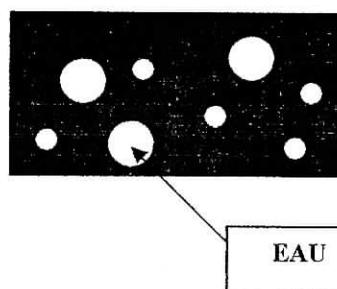


Fig. (1-2): émulsion inverse

Les deux phases sont séparées par un film protecteur d'émulsifiant dont les molécules tapissent la surface des particules. Ces molécules ont leur partie apolaire (chaîne hydrocarbonée) piquée dans l'eau et crée, en s'ionisant, des charges électriques à la surface des particules.

Le signe de ces charges confère aux émulsions leur caractère anionique ou cationique.

- **les émulsions anioniques** : dans lesquelles le radical lipophile c-à-d celui qui se fixe sur la gouttelette de bitume, est négatif. Les gouttelettes sont donc chargées négativement. Les émulsifiants correspondant sont des bases du type : RCOO^-Na^+ (fig1-3)

- **les émulsions cationiques**: dans lesquelles le radical lipophile est positif, l'émulsifiant est dans ce cas un acide du type: RN^+Cl^- (fig1-4)

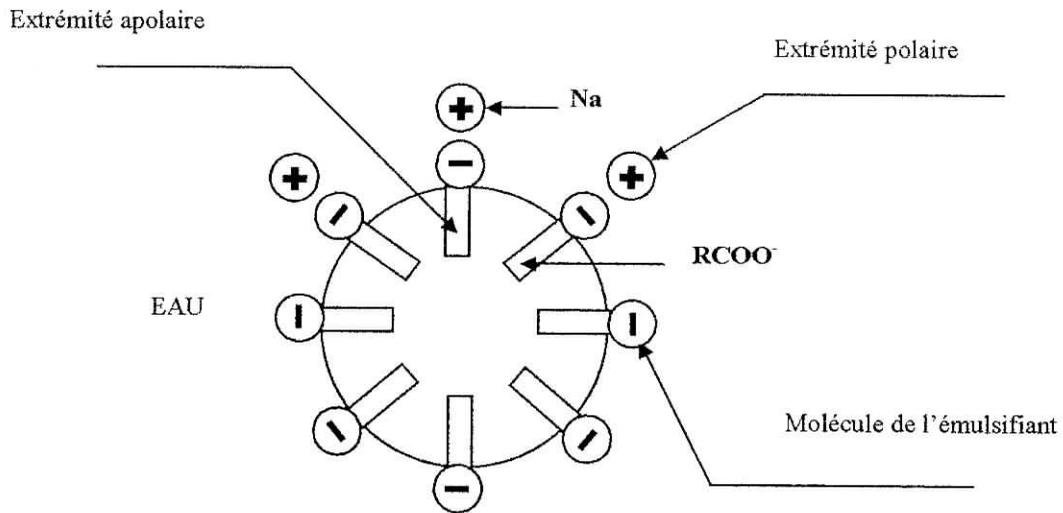


Fig. (1-3).globule de bitume (cas des émulsions anioniques $\text{pH}>7$) [10]

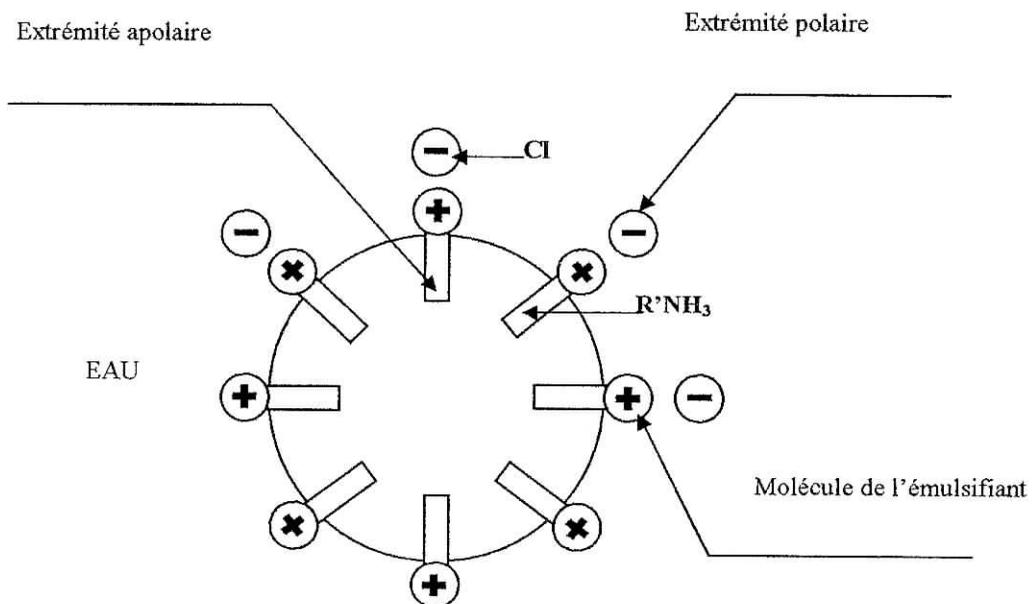


Fig. (1-4). Globule de bitume (cas de l'émulsion cationique $\text{pH}<7$) [10]

- Formulation des émulsions

Les propriétés techniques et physico-chimiques des émulsions : pH, conductivité, signes des charges, intensité de répulsion électrostatique, sont choisies en fonction de leur condition d'emploi :

- technique : repandage, enrobage, pénétration, etc.
- matériel utilisé
- condition climatique

Une émulsion de repandage doit répondre aux caractéristiques suivantes : rupture rapide (de l'ordre d'une ½ heure), bonne adhésivité vis – à – vis de granulats secs ou humides, viscosité suffisante pour que l'émulsion ne s'écoule pas avant rupture.

Bien entendu, il ne s'agit pas là de relations biunivoques; ces exigences peuvent accepter plusieurs solutions et inversement une formulation peut satisfaire à plusieurs emplois.

- Choix de formulation (voir figure 1.5) [10]

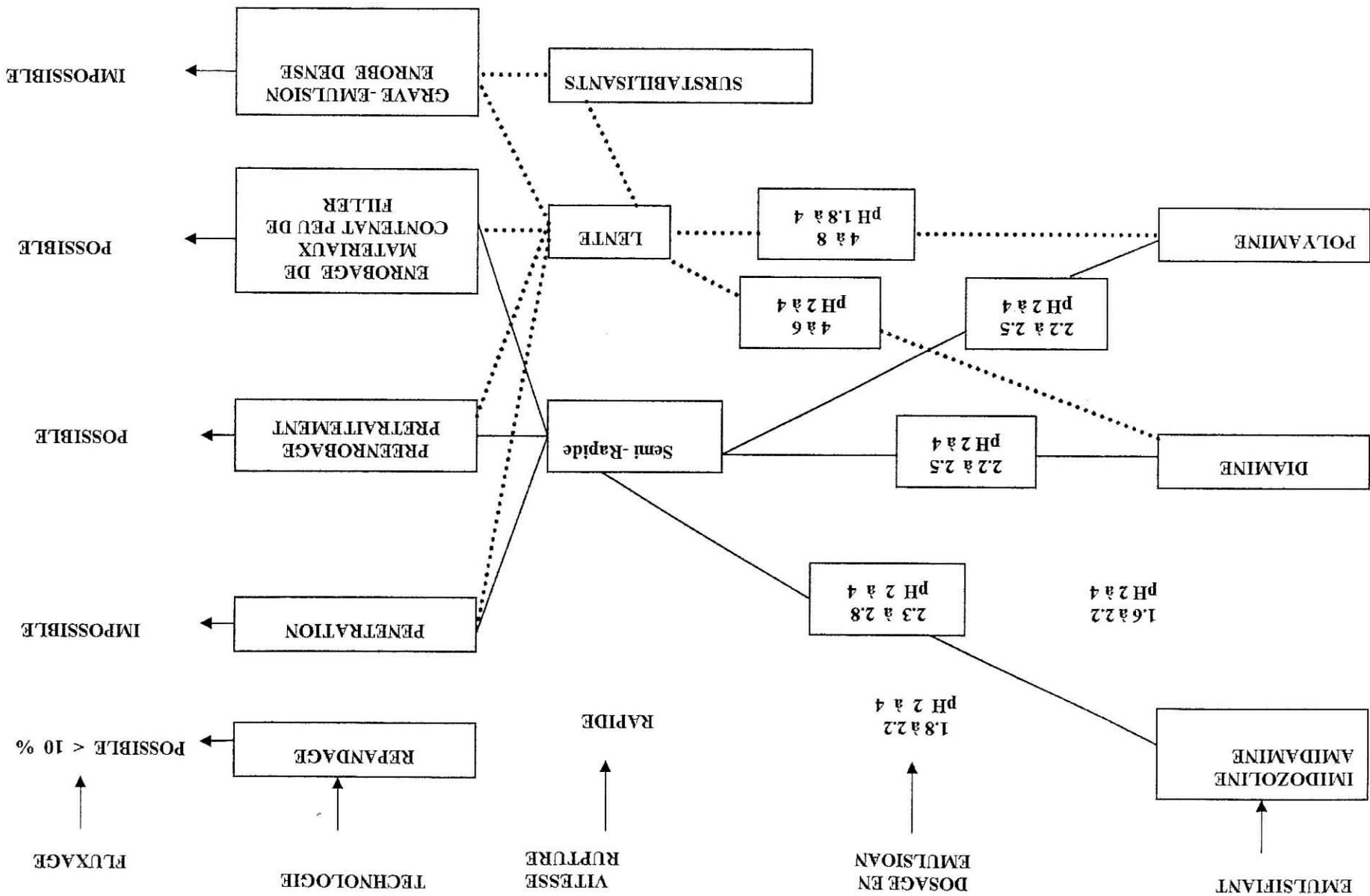
Il n'y a guère de formulation type; la formule doit être mise au point pour chaque bitume et chaque technique d'emploi. Toutefois, il faut tenir compte d'un certain nombre de règles générales :

1. la quantité d'acide ou de base ajoutée dans la phase aqueuse doit être calculée afin que l'émulsifiant présent sous forme ionisée soit en quantité suffisante.
2. La concentration en liant ne doit pas dépasser le seuil au dessus duquel la viscosité atteint des valeurs peu compatibles avec les conditions d'emploi des émulsions, Ce seuil est de l'ordre de :
 - 65 % de bitume pour les émulsions anioniques.
 - 70 % de bitume pour les émulsions cationiques.

Cette différence de comportement des émulsions anioniques et cationiques tient à l'étendue granulométrique plus importante dans le cas des cationiques.

3. il est préférable dans l'absolu, qu'une partie de l'émulsifiant soit à l'origine, dans la phase hydrocarbonée.

Fig(1-5):Schématisation du déroulement d'une étude de formulation [10]



- Fabrication de l'émulsion [10]

La fabrication de l'émulsion s'opère en deux stades :

- Le premier est celui de la préparation des 2 phases : phase aqueuse et phase liant à partir des cinq constituants de base.
- Le seconde correspond à l'émulsification de la phase liant dans la phase aqueuse.

- Préparation de la phase liant

Fluxage :

Les fluxants utilisés sont généralement :

-des bitumes fluidifiés de faible viscosité (0/1) réceptionnés et stockés de la même façon que les bitumes.

- des huiles de houille.

Si le plus souvent le bitume est employé pur, il arrive parfois qu'une addition de fluxant soit nécessaire :

- lorsque l'augmentation de la température du liant se relève impossible ou trop onéreuse (c'est le cas des émulsions fabriquées en saison froide).
- Lorsque l'étalement du film de bitume résiduel (après rupture de l'émulsion) est dans la pratique insuffisant.

Le fluxage peut se faire par admission directe du fluxant à l'entrée de la turbine. C'est le procédé le plus simple, mais le mélange de liant n'est pas intime et l'on risque fort d'aboutir à la superposition de deux émulsions : une émulsion de bitume et une émulsion de fluxant.

Il semble préférable de préparer le liant à l'avance dans un malaxeur conçu à cet effet. C'est une opération supplémentaire, mais le résultat est beaucoup plus sûr qu'avec le procédé direct.

Mise en température

A son arrivée dans la turbine, le liant doit avoir une viscosité suffisamment basse pour se fractionner aisément, sous l'action des forces de cisaillement.

La viscosité optimale est de l'ordre de 200 centipoises, ce qui donne généralement ;

- 140°C pour les bitumes 180/200.
- 150 °C pour les bitumes 80/100.
- 160°C pour les bitumes 40/50.

Les conditions idéales d'émulsification impliquent de maintenir ces températures à un (01) ou deux (02) degrés près.

La mise en température de façon rigoureuse d'une cuve contenant une quantité importante de liant présente quelques difficultés : la mauvaise conductibilité thermique du bitume provoque des surchauffes au niveau des serpentins tandis que le reste de la masse reste froid. Il est donc nécessaire d'étager les serpentins de réchauffage dans la cuve et d'opérer un brassage énergique dès que la fluidité du liant le permet. Ce brassage peut s'effectuer soit à l'aide d'un turbo – agitateur, soit par pompage et circulation.

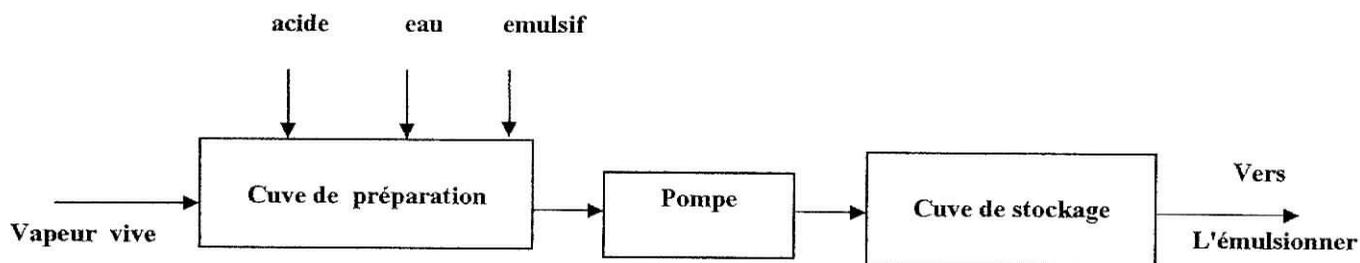
- Préparation de la phase aqueuse

La phase aqueuse est préparée de façon discontinue. Chaque préparation unitaire correspond à un tonnage déterminé d'émulsion, la quantité adéquate d'émulsif est introduite dans un bac de préparation avec la quantité correspondante d'acide. (Voir figure 1-6)

La plupart des émulsifs ne sont pas solubles dans l'eau, mais leur chlorhydrate l'est. C'est pourquoi, il faut introduire l'émulsif et l'acide ensemble. On ajoutera toutefois une petite quantité d'eau pour éviter une réaction trop brutale.

Plusieurs processus sont utilisés pour la préparation des phases aqueuses.

La préparation directe : la cuve étant de dimensions appropriées, il suffit de compléter la préparation définie ci dessus avec la quantité d'eau nécessaire, Le plus souvent le chauffage et le brassage de cette préparation sont assurés par une simple injection de vapeur vive



Fig(1-6): Préparation directe de la phase aqueuse [10]

La solution mère : On prépare une phase aqueuse concentrée en n'ajoutant à l'émulsif et à l'acide qu'une partie de l'eau requise. Cette solution mère brassée mécaniquement puis refoulée dans un autre bac où elle reçoit son complément d'eau et portée à la température voulue. (Voir figure 1-7)

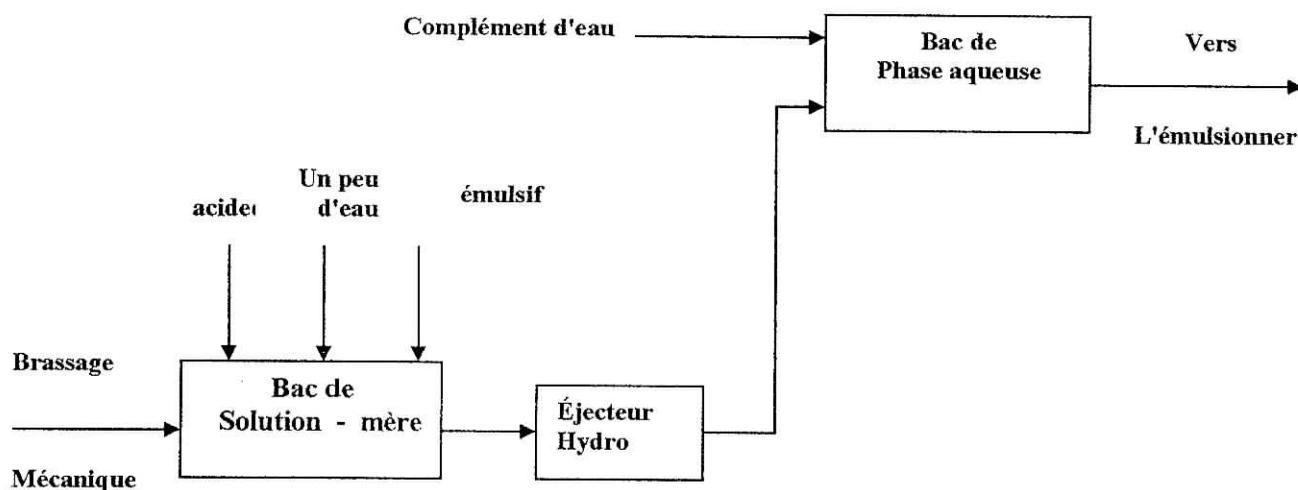


Fig (1-7):Préparation de la phase aqueuse par solution mère [10]

Mise en température de la phase aqueuse

La phase aqueuse doit être à une température telle qu'à la sortie de la turbine, l'émulsion soit la plus chaude possible tout en restant naturellement au-dessus de 100°C (pour des raisons de sécurité ,on se limite à 95°C).

On peut alors faire le bilan thermique de l'opération en tenant compte des chaleurs spécifiques des deux phases : Les calories perdues par le liant dont la température étant de B °C sont reprises par la phase aqueuse qui se trouvait à la température A°C . On prendra comme chaleurs spécifiques les valeurs approchées de 1 pour la phase aqueuse et de 0.5 pour le liant, On aura donc : $(B^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}) * 0.5 * b = (90^{\circ}\text{C} - A^{\circ}\text{C}) * a$

'a' et 'b' étant les pourcentages respectifs de la phase aqueuse et de liant.

L'émulsification

L'émulsification consiste à diviser le bitume en fines particules chargées, douées d'un pouvoir répulsif les unes pour les autres. (voir figure 1-8)

Elle nécessite simultanément une énergie mécanique de cisaillement du liant donnée par la turbine et une énergie physico-chimique apportée par l'émulsifiant qui a pour rôle :

- au moment de la fabrication, introduit en faible concentration, il abaisse la tension interfaciale des 2 corps en présence : c'est un corps tensio-actif. (il diminue donc le travail de l'émulsification).
- Au stockage, il se fixe à la périphérie des globules dispersées et s'oppose à la coagulation : c'est un corps stabilisateur.
- Il peut jouer le rôle de dope d'adhésivité.

L'émulsifiant, pour être efficace, doit être sous forme de sel. La salification doit être faite avec précaution pour aboutir à une phase aqueuse de pH déterminé, dans laquelle l'émulsifiant est parfaitement réparti. Une mauvaise neutralisation conduit à la fabrication d'émulsions de qualité aléatoire.

Le choix de l'émulsifiant étant fait en fonction des classes d'émulsions (rapide, semi-rapide, lente), la quantité d'émulsifiant est déterminée par les conditions réelles d'utilisation : nature et granularité du matériau pierreux, nature de bitume, conditions climatiques, matériel de mise en œuvre.

« Pour une même formule granulométrique un malaxage lent demande une émulsion plus stable et nécessite par conséquent une légère augmentation de la teneur en émulsifiant, les conditions climatiques peuvent aussi obliger à de légères modifications de formulation : on sait par exemple que la chaleur et le vent accélèrent la rupture ».

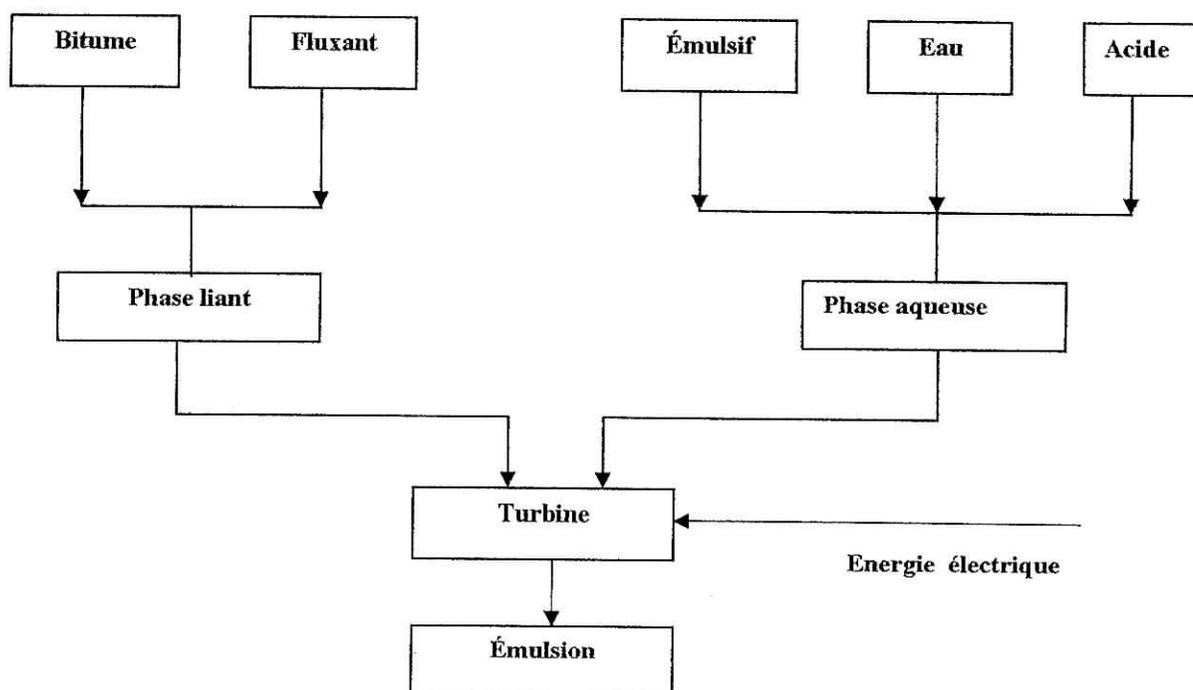


Fig. (1-8) Schéma théorique de fabrication d'une émulsion [10]

- Caractéristiques technologiques des émulsions [10]

a- stabilité des émulsions:

- signification de stabilité

L'émulsion de bitume est par définition un système instable, Une émulsion absolument stable vis – à – vis de granulats ne serait d'aucun intérêt routier, il est nécessaire de considérer deux sortes de stabilité :

Stabilité au stockage

les émulsions sont des systèmes instables au sein desquels se développe , dès le stockage , un premier stade plus ou moins réversible d'agglomérations de petites particules de bitume entraînant la formation d'un réseau lâche d'agglomérations sans séparation macroscopique mais les particules ne perdent pas leurs individualité, On parle alors de floculation – ou entérinant la formation d'un système colloïdal structuré en un agrégat compact avec séparation macroscopique on parle alors de coagulation. Une émulsion coagulée est plus difficile à redisperser qu'une émulsion floculée.

- la coalescence : c'est le second stade de la coagulation, les particules agglomérées se combinent pour donner une particule plus grosse au sien desquelles elles ont perdu leur individualité et à ce moment que commence, par définition, la rupture de l'émulsion, terme désignant la séparation irréversible partielle ou totale, de la phase dispersée et la phase continue. (Voir figure 1-9)

- un autre phénomène observé lors de stockage, c'est la décantation qui peut se traduire par une sédimentation, soit par un crémage.

On peut ralentir la décantation :

- en augmentant la finesse de l'émulsion.

- en s'efforçant d'avoir une différence de masse volumique aussi faible que possible entre la phase dispersée et la phase dispersante.

- en augmentant la viscosité de la phase dispersante.

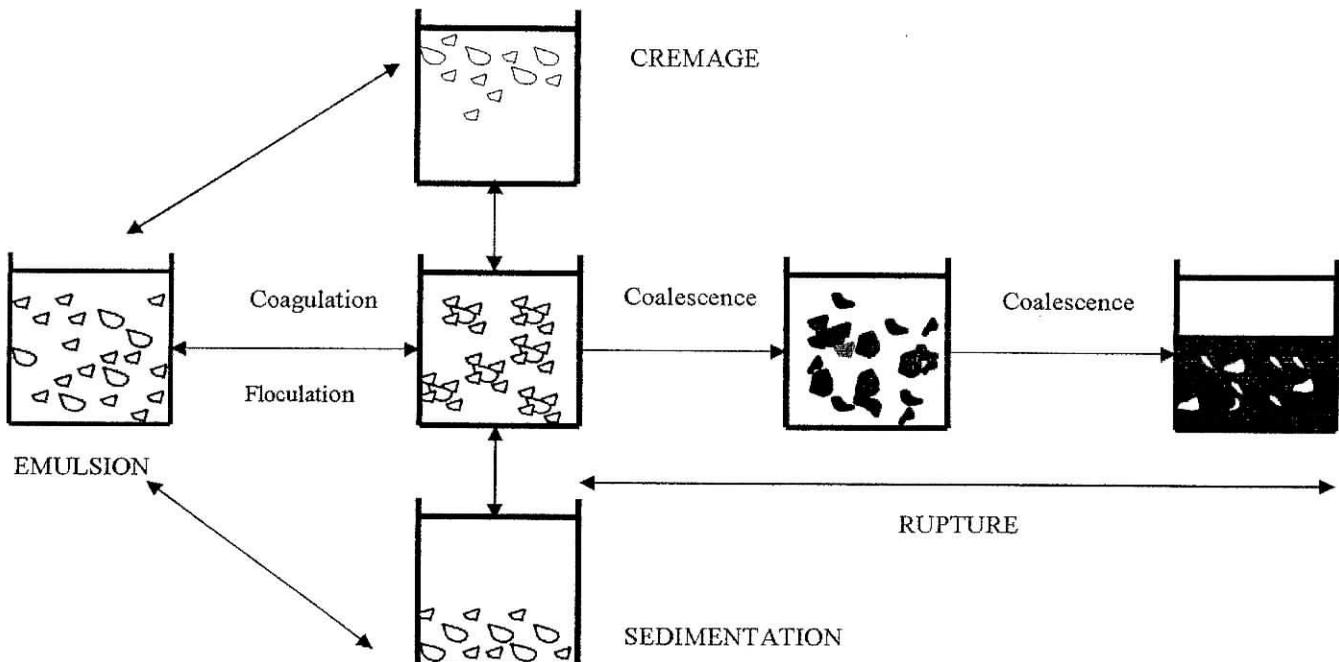


Fig. (1-9): Processus de rupture et processus de décantation [10]

Stabilité des émulsions vis – à – vis des granulats

Définition de la rupture physique de l'émulsion

On appelle " rupture physique" d'une émulsion bitumineuse au contact d'un minéral. La séparation des phases de l'émulsion, l'hétérofloculation des globules de bitume et l'expulsion de l'eau sans occasionner de réaction de " type chimique ".

Vitesse de rupture

La vitesse de rupture est liée d'une part aux caractéristiques physico –chimiques de l'émulsion et d'autre part à celle du matériau minéral. Ils sont donnés comme suit :

1 - facteurs liés à l'émulsion : La vitesse de rupture des émulsions est inversement proportionnelle à la quantité d'émulsion. Elle varie de façon importante avec sa nature; elle dépend aussi du pH de l'émulsion : pour les émulsions cationiques la meilleure stabilité est généralement atteinte pour un pH bas – si le pH augmente la vitesse de rupture augmente -.

2 - facteurs liés au granulat minéral : La rupture dépend de la nature et de la granulométrie du matériau minéral il est bien connu qu'un granulat contenant une grosse proportion de fines amène une rupture beaucoup plus rapide qu'un granulat propre. Cela se conçoit parfaitement car la rupture est avant tout un phénomène de surface, de plus, les fines ont tendance à absorber de l'eau. le phénomène est plus sensible dans le cas des émulsions cationiques en face d'un cas donné de granulat minéral, il faudra donc agir sur les facteurs liés à l'émulsion (quantité d'émulsifiant, pH, granulométrie) pour contrôler la vitesse de rupture.

Mécanisme de rupture

Dans le cas des émulsions anioniques, la rupture se produit par évaporation de l'eau. La teneur en liant augmente entraînant une augmentation du nombre de rencontre des globules – A partir d'une certaine concentration, les répulsions électriques ne peuvent plus s'opposer au contact direct de 2 globules et à leur coalescence. L'émulsion se rompt.

Dans le cas des émulsions cationiques, la rupture est différente. Elle s'explique facilement dans le cas d'une émulsion directe. L'émulsif contenu dans la phase aqueuse est adsorbé par l'agrégat d'autant plus rapidement que l'agrégat offre une plus grande surface spécifique. C'est-à-dire qu'il est plus fin. La phase dispersante s'appauvrit ait d'une façon telle que pour , réaliser l'équilibre , l'émulsif adsorbé à la périphérie des globules de bitumes passe dans la phase continue , Les globules ne sont plus protégés et se soudent les unes aux autres jusqu'à rupture complète de l'émulsion.

L'évaporation de l'eau influence d'une manière secondaire la vitesse de rupture. Il faut tenir compte de cette influence lorsqu'on utilise une émulsion cationique dans des conditions exceptionnelles (climats très chauds et très secs).

La figure (1-10) schématise le déroulement de processus de rupture et le processus de mûrissement.

1- Lorsque l'émulsion et les granulats sont mis en contact, commence par définition, le processus de mûrissement et simultanément a lieu le processus de rupture qui peut, lui, avoir débuté avant que les émulsions et les granulats n'aient été en contact. Une émulsion partiellement rompue, c'est-à-dire une émulsion ou la coalescence a débuté, s'avère satisfaisante dans la pratique si le processus du coalescence n'est pas trop avancé.

2- Au bout d'un certain temps, le processus de rupture est terminé, le bitume ayant pris en une phase continue alors que le mûrissement se poursuit.

3- Il s'achève lorsque l'eau et le solvant éventuel ont disparu laissant un système granulat liant "sec".

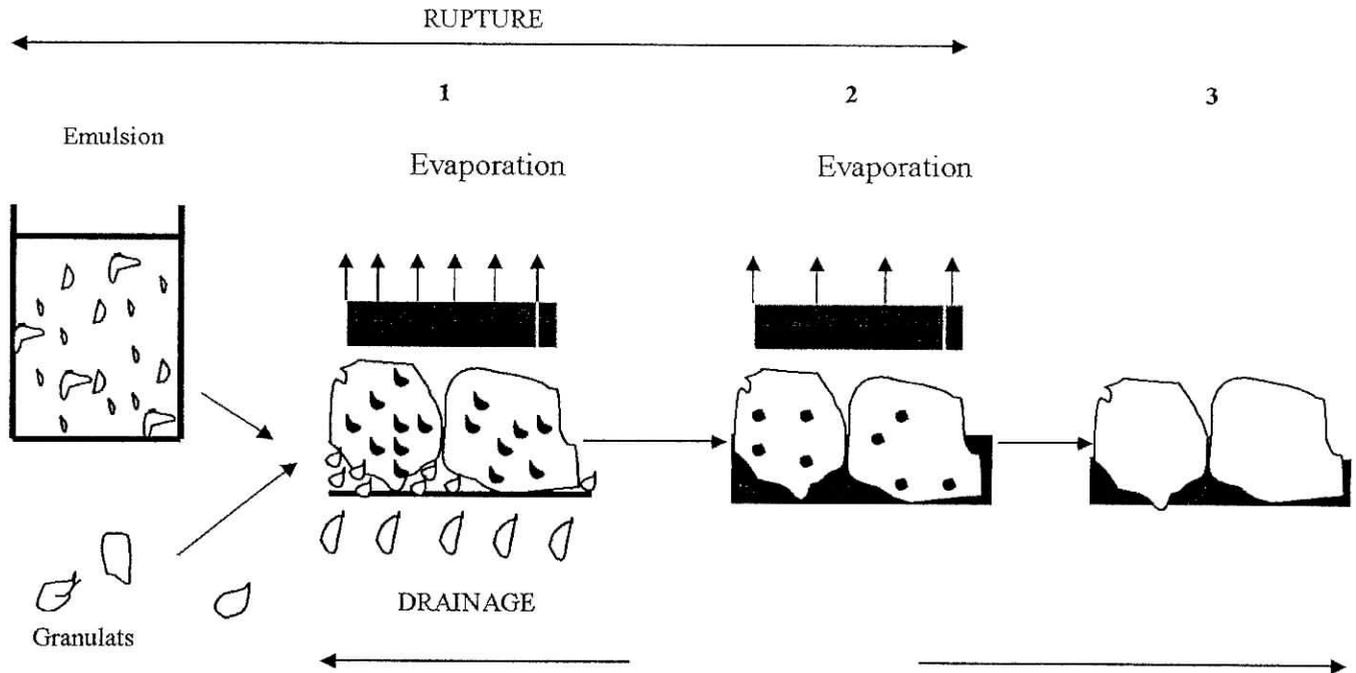


Fig. (1-10) : processus de rupture et processus de mûrissement [11]

b- Viscosité

La viscosité est une caractéristique importante qui intervient :

- pour le transfert à travers les canalisations, le pompage et le répandage.
- pour l'utilisation sur chantier :

1 – un enduit superficiel exige une émulsion relativement visqueuse afin d'éviter les pertes de liant.

2 - une imprégnation, au contraire exige une émulsion fluide qui puisse pénétrer dans le corps de chaussée.

Facteurs influençant la viscosité

-La teneur en liant:

La viscosité d'une émulsion croît avec la teneur en liant : cette croissance assez lente au début, devient très rapide lorsqu'on arrive aux teneurs généralement adoptées pour les émulsions de bitume.

- la granulométrie:

La viscosité est influencée par la granulométrie, elle est d'autant plus importante que la courbe granulométrique est plus resserrée et que l'émulsion est plus fine.

- la viscosité de la phase dispersante

Elle n'est pas égale à la viscosité de l'eau, Si la viscosité de la phase dispersante augmente la viscosité de l'émulsion augmente.

Les plages de viscosité des émulsions et leur domaine d'emploi sont indiqués dans le tableau (1-6)

Tableau (1-6) : Plage de viscosité et domaine d'emploi des émulsions [9]

Classe d'émulsion	Fourchette de viscosité exprimée en degré Engler	Domaine d'emploi
Fluide	2 à 6	Réparation, imprégnation, enrobage, couche d'accrochage
Semi- fluide	6 à 15	Enrobage, répannage pour enduit superficiel
visqueuse	15 à 30	Répannage pour enduit superficiel

c- Adhésivité:

On pourrait croire qu'il suffit, pour définir l'adhésivité d'un liant à un minéral d'indiquer que cette adhésivité n'est autre chose que la résistance au décollement opposée par le liant quant on exerce un effort pour l'en arracher. Mais cette notion d'apparence très simple, est en réalité sans grande intérêt – *un liant ne peut se décoller d'un minéral auquel il adhère réellement lorsqu'on l'en détacher par un effort mécanique On étire le liant et on le sépare dans sa masse , mais on ne le décolle pas , Si le liant est fragile , il se déchire également dans sa masse , mais ne se décolle pas non plus-* d'une part parce que le liant pouvait se décoller du granulat sans dépense d'énergie mécanique , mais par simple contact avec l'eau , d'autre part la mesure directe de l'adhésivité est impossible.

On peut dire donc que l'adhésivité représente au sens physique, la faculté du liant de résister au déplacement et au décollement sous l'effet des actions extérieures possibles.

L'adhésivité peut être considérée sous deux aspects distincts mais toujours combinés dans la pratique:

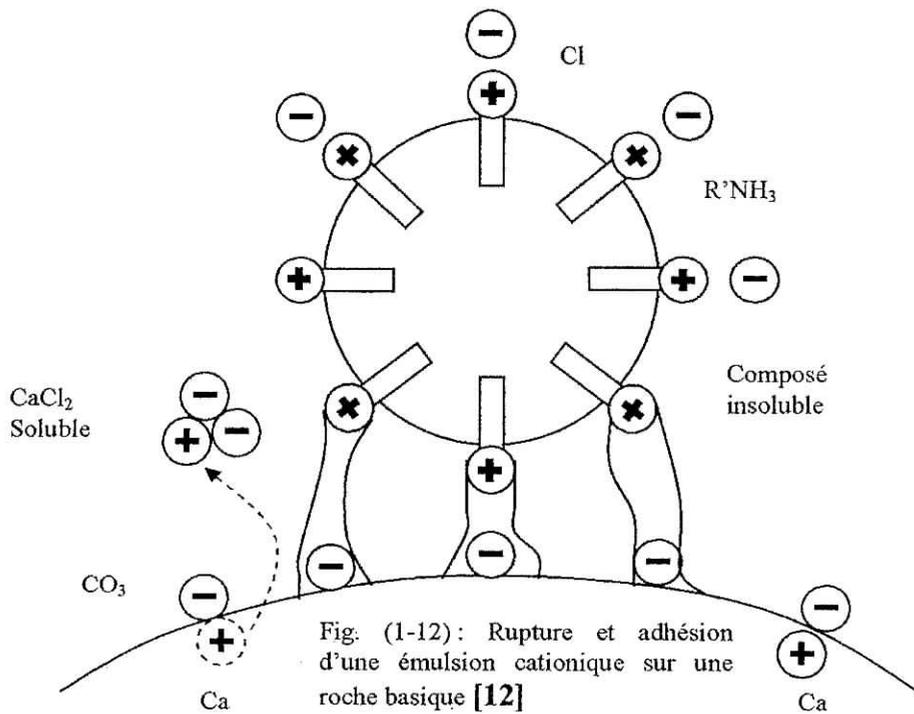
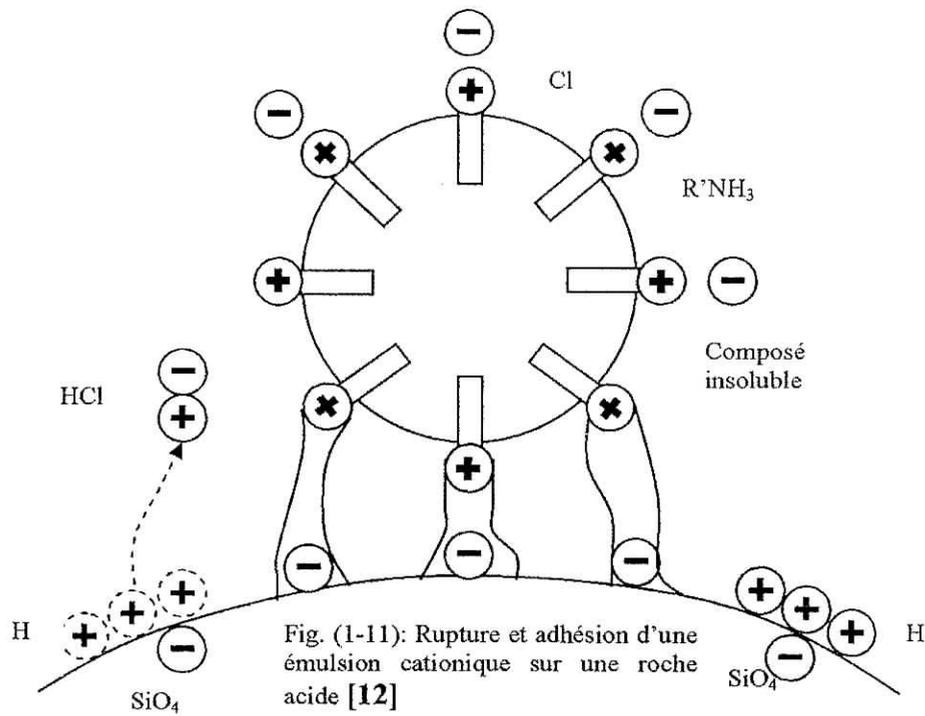
1 -l'adhésivité mécanique : peut être définie comme la liaison due à l'accrochage mécanique du film à ce support. Ce type d'adhésivité varie avec la rugosité et la porosité de ce support, aussi qu'avec les tensions internes dans le film.

2 -l'adhésivité spécifique: peut être définie comme la liaison due aux forces d'attraction à la surface de séparation entre les molécules du film et les molécules du support – agrégat-l'adhésivité spécifique est donc un phénomène d'ordre physico –chimique.

En ce qui concerne les émulsions de bitume, l'émulsif nécessaire à la fabrication de la dispersion est un dope d'adhésivité.

L'adhésivité d'une émulsion dépend :

- de la nature du bitume employé et des additifs éventuels.
- de la nature et de la quantité d'émulsifiant employé ; on peut s'apercevoir que l'adhésivité est améliorée par augmentation de la quantité d'émulsifiant, mais on ne peut aller trop loin dans cette voie. Une quantité trop grande d'émulsifiant risquent de rendre l'émulsion trop stable.
- de pH de l'émulsion : chaque émulsifiant à un intervalle de pH où l'adhésivité est plus grande.
- de la granulométrie de l'émulsion, on a pu s'apercevoir sans bien en éclaircir d'ailleurs les raisons profondes, que pour les émulsions cationiques l'adhésivité était plus grande que l'émulsion avait tendance à la mono dispersion.
- de la nature minéralogique du granulat, de sa propreté, de son humidité.



- Caractéristique physico – chimiques

- **Le pH d'émulsion** : caractéristique de sa phase aqueuse après émulsification. Il peut être perturbé par des substances susceptibles de migrer d'une phase dans l'autre. Il a une très grande importance, tant du point de vue stabilité que du point de vue adhésivité.

En règle générale l'adhésivité des émulsions cationique est plus grande pour des pH compris entre 3 et 5 que pour des pH inférieurs à 3; mais qu'au contraire la stabilité est meilleure pour des pH plus bas.

Il faut toutefois signaler que l'on rencontre des émulsions très stables bien que leur pH soit élevé; Il suffit que la quantité d'émulsifiant salifié soit suffisante ou que l'on utilise un stabilisant, ce qui dans la pratique est plus rentable.

- **la granulométrie** : c'est une des caractéristiques les plus importantes des émulsions, car elle détermine le nombre de propriétés technologiques : viscosité, stabilité, adhésivité :

- La viscosité d'une émulsion est d'autant plus grande que l'émulsion est plus fine et son écart type plus petit.

- L'émulsion n'est pas adhésive si elle contient un trop fort pourcentage de grosses particules.

- La stabilité varie en fonction directe de la finesse.

facteurs influant sur la granulométrie.

- Nature de l'émulsifiant :

la finesse de l'émulsion dépend de l'émulsifiant utilisé ; On peut grâce à des études physico-chimiques apprécier le pouvoir émulsifiant des diverses substances chimiques et établir une relation entre la nature de l'émulsifiant et la granulométrie des émulsions

- Quantité d'émulsifiant :

La finesse de l'émulsion est d'autant plus grande que la quantité d'émulsifiant est plus importante.

- Quantité d'acide:

Pour chaque bitume et chaque émulsifiant, il existe une quantité optimale d'acide ou de base permettant une meilleure émulsification.

- Principaux essais sur l'émulsion

L'émulsion formulée puis fabriquée en principe selon les règles exposées précédemment est soumise à un contrôle qui permet de définir l'émulsion et de la classer suivant la norme en vigueur.

Une émulsion est définie par :

- Son type : anionique ou cationique.
- La nature et la quantité du liant qu'elle contient.
- Ses caractéristiques physico-chimiques.

Par ailleurs elle est classée :

- Selon sa viscosité : émulsion fluide, semi-fluide ou visqueuse.
- Selon sa vitesse de rupture, comme émulsion à rupture rapide, semi-rapide ou lente.

- la teneur en eau

Cet essai a pour but de déterminer la quantité d'eau, donc de liant, contenue dans une émulsion. Le principe de la méthode est d'entraîner l'eau de l'échantillon par distillation à reflux d'un solvant non miscible à l'eau après condensation, l'eau se sépare du solvant et s'accumule dans un tube de recette gradué. La teneur en eau est donnée par :

$$W_{\text{eau}} = M_{\text{eau}}/M_{\text{émulsion}}$$

De cette caractéristique dépend aussi la faculté d'enrobage.

- la pseudo-viscosité

La pseudo-viscosité est mesurée à l'aide du viscosimètre Engler, Cette détermination, faite par écoulement, n'a qu'une valeur relative, car d'une part le gradient de vitesse est mal défini,

d'autre part la mesure peut être faussée par des phénomènes tels que la rupture partielle de l'émulsion se produisant au niveau de l'orifice.

La pseudo viscosité Engler, à une température ($T^{\circ}\text{C}$) donnée est par définition le rapport de la durée d'écoulement dans un viscosimètre Engler, de 200ml de l'émulsion portée à $T^{\circ}\text{C}$ à la durée d'écoulement dans le même viscosimètre de 200ml d'eau portée à la même température

$$\eta = T \text{ émulsion} / T \text{ eau}$$

Lorsqu'on a affaire à une émulsion très visqueuse, c'est-à-dire dont la pseudo-viscosité Engler est supérieure à 15 °E, on utilise un viscosimètre STV.

- la susceptibilité

les travaux routiers sont réalisés aussi bien à $+10^{\circ}\text{C}$ en arrière saison que sur des chaussées atteignant la température de 40°C à 50°C dans certaines régions. Il est donc important de connaître la viscosité des émulsions selon les températures.

La susceptibilité d'une émulsion se déduit de la mesure de la pseudo viscosité Engler à deux températures, 20°C et 40°C Pour cela, on calcule l'écart entre les valeurs de la viscosité obtenue aux deux températures et on le rapporte à la valeur obtenue à 20°C .

- la stabilité au stockage

Elle se caractérise par l'aptitude d'une émulsion à ne présenter aucune séparation des phases au cours du stockage. Il est évident que cette caractéristique ne présente d'intérêt que pour des émulsions qui seront effectivement appelées à être stockées.

Elle est déterminée par l'essai de stabilité au stockage par décantation qui consiste à mesurer l'épaisseur de la couche décantée, sous l'effet d'une différence de potentiel (entre 6 et 12V) entre le cathode et le bûcher contenant l'émulsion. La stabilité au stockage est donnée par la relation :

$$(d/D)*100$$

d : épaisseur de la couche décantée en mm.

D : diamètre intérieur en mm du becher.

- l'indice de rupture

Pour caractériser la rupture d'une émulsion de bitume, on a souvent recours à IREC. Méthode mécanique permettant d'apprécier la rupture de l'émulsion par le biais de la résistance au malaxage du système émulsion – granulat, Cet essai utilise des fines siliceuses de distribution granulométrique donnée.

Dans une masse d'émulsion homogénéisée et sous agitation, on introduit régulièrement au moyen d'un sous – distributeur vibrant à raison de 0.3g/s, les fillers siliceux. La vitesse de rotation de l'agitation est maintenue constante à 1000tours/mn. L'introduction de la poudre minérale est arrêtée au moment où la résistance au malaxage, du système émulsion granulat devient telle que le moteur de l'agitation se bloque et que l'on peut à ce moment détacher complètement du récipient le mélange filler- émulsion. On détermine alors l'indice de rupture de l'émulsion cationique.

$$\text{IREC} = (\text{masse de filler introduit} / \text{masse de l'émulsion}) * 100$$

On distingue :

- les émulsions à vitesse de rupture rapide celles pour lesquelles $\text{IREC} < 100$.

- les émulsions cationiques à vitesse de rupture lente celles pour lesquelles $\text{IREC} > 120$. Les émulsions cationiques pour lesquelles $80 \leq \text{IREC} \leq 140$ étant en pratique considérées comme des émulsions à vitesse de rupture semi rapide ou moyennes.

- le pH :

Le pH d'une émulsion directe est le pH de sa phase aqueuse. On mesure la différence de potentiel, exprimée en unité pH, entre une électrode de référence du type calomel et une

électrode de mesure. L'augmentation de la quantité d'acide dans la formulation de l'émulsion est l'un des moyens permettant d'augmenter la stabilité, mais un pH trop faible (< 1.8) peut conduire à un défaut d'adhésivité.

La Classification des émulsions cationiques est représentée par le tableau (1-7)

Tableau (1-7) : classification des émulsions cationiques selon la norme NFT 65-011

caractéristique	Méthode Normalisée De référence	rapide			Semi-rapide			lente			surstabilisée	
		classe			classe			classe			classe	
		ECR60	ECR65	ECR69	ECM60	ECM65	ECM69	ECL55	ECL60	ECL65	ECS55	ECS60
-Teneur en eau... (%)	NFT66-023	39à41	34à36	30à32	39à41	34à36	30à32	44à46	39à41	34à36	44à46	39à41
-Pseudoviscosité Engler à 25°C... (s)	NFT66-020	2à15	>6	.....	>2	>6	.....	<15	2à15	>6	<15	>2
-pseudoviscosité STV à 25°C (diamètre de l'orifice d'écoulement 4mm)..... (s)	NFT66-020	.....	.....	>9	<18	.....	>9	.....	.....	.....	.....	<18
-homogénéité... -particules supérieures à 0,63mm.....	NFT66-016	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
-particule comprises entre 0,63mm et 0,16mm.....	.....	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
-stabilité au stockage par décantation(1).....	T66-022	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
-adhésivité(2).....	NFT66-018	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
-émulsion à stockage limité(1) 1 ^{er} partie de l'essai...	.....	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	.....	.....	.....	.....	.....
2 ^e partie de l'essai...	.....	≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	.....	.....	.....	.....	.....
-émulsion stockable(1).....	.....	.....	.....	.....	≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	.....	.....
-indice de rupture...	NFT66-017	<100	<100	<100	<80à 140	<80à 140	80à14	>120	>120	>120	.....	.....
-stabilité au ciment.....	NFT66-024	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	≤2	≤2
-charge des particules.....	NFT66-021	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

(1) il est admis qu'une émulsion stockée pendant un temps t à une température supérieure à 5 °C brassée, peut présenter une couche superficielle de solution aqueuse ; après brassage cette couche doit disparaître et l'émulsion ne doit pas présenter d'amorçage de rupture.

On distingue :

- une émulsion à stockage limité, par le fait que le temps t précédemment défini est au maximum de 15 jours ;
- une émulsion stockable, par le fait que le temps t précédemment défini est compris entre 15 jours et 3 mois.

(2) les caractéristiques d'adhésivité d'une émulsion doivent être spécifiées vis-à-vis d'une nature de granulats.

2.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les propriétés fondamentales des mélanges bitume-granulat ainsi que les différents essais pratiqués sur les bétons bitumineux dans le but de trouver une composition adéquate pour un béton bitumineux.

2.2- Les propriétés fondamentales des mélanges bitume –granulat [1], [2]

Les mélanges bitume-granulat sont des matériaux complexes et la détermination des propriétés pertinentes est un problème difficile qui fait l'objet de plusieurs débats.

L'un des problèmes principaux est l'existence d'un grand nombre de variables comme :

- le fournisseur, la classe et la susceptibilité à la température du bitume
- les proportions relatives de bitume, de granulat et de bullages dans le mélange.
- la forme, les propriétés de surface, l'absorption, la résistance etc. des granulats.
- la classification des granulats.
- le degré de compactage.
- le niveau et la variation de température et la présence d'eau.
- Le volume, la vitesse et l'importance des charges de roues.

Certains de ces facteurs sont liés entre eux ; par exemple, l'effet nuisible de l'eau sera plus marqué si la teneur en liant est faible, le granulat plus absorbant, la granulométrie ouverte ou si le mélange n'est pas bien compacté.

Un autre problème est le développement de méthodes d'essais qui peuvent être utilisées pour déterminer les propriétés mécaniques pertinentes. Si une méthode d'essai consiste à simuler exactement les variations, en régimes de contrainte et d'environnement, subies par le matériau sur la route, celle-ci impliquera alors des techniques complexes et un équipement sophistiqué devant être opéré par un personnel de formation technique de haut niveau et le changement du spécimen sera faible. Si, en revanche, une méthode d'essai se veut relativement bon marché, simple à effectuer et avec une grande sortie de données d'essai, celle-ci sera alors moins simulatrice. Cependant, cette situation s'est améliorée grâce au développement d'équipements d'essai utilisant des transducteurs précis, composants développés à l'origine pour l'automatisation industrielle, la saisie de données automatisée et les techniques de contrôle.

2.3- Mélanges bitumineux [1], [2]

Les mélanges bitumineux sont composées de bitume, de granulat et, dans la plupart des cas, d'air. Il existe presque un nombre infini de combinaisons possibles et, bien qu'un nombre relativement faible de ces combinaisons convienne au pavage, la gamme potentielle des propriétés fondamentales demeure vaste.

En général, les granulats utilisés pour les couches de base structurelles et les nappes de base de la chaussée consistent soit en une combinaison de toutes les tailles produites par un concasseur (à granularité continue) soit en un mélange de granulat gros et de sablon (à granulométrie discontinue). Dans certains cas, un granulat grossier et élémentaire est utilisé pour produire une structure de granulat en nid d'abeilles (asphalte poreux et à granulométrie ouverte) et des mastiques sont produits en mélangeant des granulats fins avec du bitume. La quantité de bitume ajoutée est normalement suffisante pour enduire toutes les particules de granulat d'une pellicule épaisse de plusieurs microns. Plus de bitume sera requis pour des mélanges ayant des pourcentages plus élevés de granulats fins tels que le mastique ou le mélange à granulométrie discontinue dans la mesure où, à poids égal, le granulat fin a une aire de superficie plus étendue que le granulat gros.

2.4- Formulation des enrobés bitumineux

Face à l'accroissement considérable du trafic routier lourd, il est évident que la mise au point des méthodes de dimensionnement basées sur une analyse structurale poussée de la chaussée et une connaissance précise des caractéristiques des matériaux dont elle est constituées est indispensable.

En effet, une couche d'enrobé doit présenter les principales qualités suivantes :

- ◆ **uni** : pour le confort et la sécurité des usagers.
- ◆ **imperméabilité** : pour protéger le corps de chaussée et augmenter la durabilité de l'enrobé lui-même.
- ◆ **durabilité** : pour augmenter la durée de vie de la chaussée il faut lutter contre les phénomènes de fatigue et d'orniérage.
- ◆ **rugosité** : pour la sécurité des usagers.
- ◆ **flexibilité** : pour admettre les déformations d'ensemble qui peuvent être imposée par la flexion des couches inférieures. La flexibilité dépend en premier lieu de la ductilité du liant.

L'insuffisance de flexibilité se manifeste par la fissuration du tapis qui doit être limitée pour satisfaire tant à des exigences de confort qu'à celles ayant trait à l'imperméabilité de la chaussée

- ◆ **stabilité** : pour quelle résiste à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques.

L'insuffisance de stabilité se traduit par fluage avec formation de dépression, d'ornière et d'ondulation.

La figure (2.1), nous montre l'effet de la contrainte de compression verticale sur le matériau bitumineux, sous la roue. Lorsque le matériau est comprimé verticalement, il aura tendance à se dilater horizontalement et résultera en contraintes horizontales « limitatives ». L'importance de ces contraintes limitatives dépend d'un nombre de facteurs y compris le rapport de Poisson. L'importance de la déformation verticale dépend fortement de facteurs liés au squelette du granulat, par exemple, le degré de limitation a également une influence particulièrement sur des matériaux

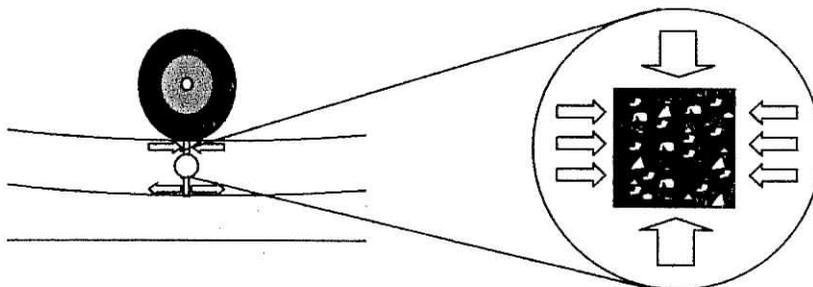


Figure (2.1): effet de contrainte

Tel que l'asphalte poreux qui, sans l'appui des matériaux environnants, se déformerait rapidement. Lorsque la roue se déplace lentement et que la température est relativement haute, la rigidité sera faible. Donc, pour une contrainte déterminée, l'extension sera élevée.

Il a été suggéré que la déformation permanente pourrait se produire en deux étapes tel que démontré :

1. La première étape est la densification qui pourrait être considérée comme une phase de compactage secondaire pendant laquelle le squelette du granulat se tasse.

2. La deuxième étape a été appelée la « phase de cisaillement » au cours de laquelle le matériau se déplace latéralement provoquant ainsi le développement « d'épaulés ». (voir figure 2.2)

L'occurrence de l'une ou de ces deux étapes dépend largement du type de mélange. Ceci a été observé avec des bétons asphaltiques lourds utilisés dans des pays chauds ou, tout d'abord, le squelette du granulat est comprimé jusqu'à ce que les bulles d'air soient pratiquement inexistantes et que le liant occupe toute la place entre les particules du granulat. Le contact inter-particules est alors réduit, la phase de cisaillement commence et le matériau s'écoule effectivement. Des essais visant à garantir que les bullages soient supérieurs à 1% ou 2 % lorsque le mélange est compacté à refus aideraient à réduire l'occurrence de la phase de cisaillement

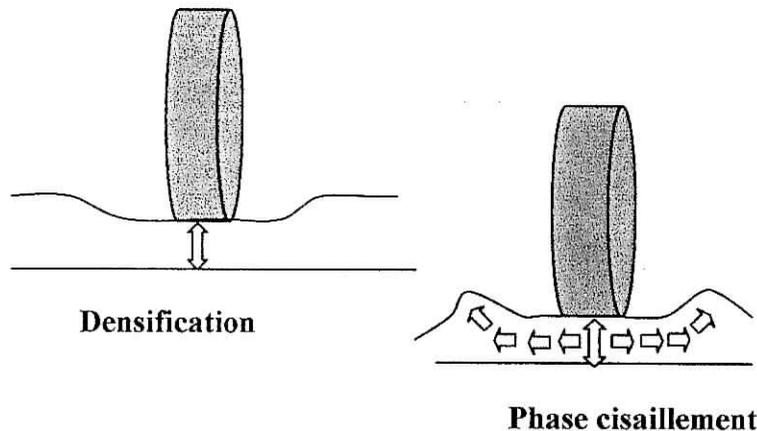


Figure (2.2) : déformation permanente

La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats, la dureté du liant et le compactage. Pour obtenir un enrobé à la fois stable et flexible, il faut donc avoir un liant qui reste visqueux en été sans devenir fragile en hiver, et qui de plus résiste bien au vieillissement.

• **L'absence de sensibilité à l'eau** : La tenue à l'eau est influencé par deux facteurs principaux qui sont :

- l'adhésivité du liant aux granulats.
- l'absence de tout élément argileux susceptible de gonfler en présence d'eau.

Cette stabilité à l'eau s'étudie en comparant les résistances mécaniques d'échantillons d'enrobés soit immédiatement après moulage, soit après une immersion plus ou moins prolongée. Le rapport des résistances après et avant immersion est une bonne mesure de la sensibilité de l'enrobé à l'eau.

Lorsqu'on constate une chute de stabilité après immersion, il faut évidemment savoir à quelle cause l'attribuer :

1. Un premier renseignement est fourni par la valeur de l'équivalent de sable des fines des granulats, si celle-ci est élevée (>80 par exemple) il est à peu près certain que l'adhésivité est seule en cause, si elle est faible (<40 par exemple) il est probable que les fines du mélange sont nocives.

2. Un deuxième renseignement est fourni par l'absorption d'eau et le gonflement de l'éprouvette après immersion.

pour cerner au mieux les propriétés des enrobés et l'aptitude qu'ils auront à répondre à une fonction donnée, de nombreux chercheurs ont mis au point des méthodes d'essai dans un souci d'une meilleure connaissance de certaines propriétés soit pour chercher l'explication de désordres constatés et tenter d'y apporter un remède en affinant les règles de formulation, soit pour essayer de prévoir leur comportement à long terme et fournir des données indispensables aux calculs du dimensionnement des chaussées.

2.5- Classification des chaussées d'après leur compacité [1], [9]

2.5.1- les enrobés denses : les enrobés denses présentant un pourcentage de vide inférieur à 10%

2.5.2- les enrobés semi-denses : qui sont des mélanges dont le pourcentage des vides est compris entre 10 et 15. ces enrobés contiennent un faible pourcentage de sable.

2.5.3- les enrobés ouverts : qui sont des mélanges contenant suffisamment de vides (pourcentage de vides supérieur à 15%). ces enrobés sont constitués par des fractions granulaires dépourvues de sable

2.6- Principaux essais sur enrobés

D'une façon générale, il existe deux types d'essai pour caractériser un enrobé en laboratoire. Des essais qui tentent de simuler le comportement d'un enrobé lorsqu'on le met en œuvre et qu'on le compacte comme :

a- l'essai de compression simple LCPC qui permet de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir du rapport des résistances à la compression avant et après immersion des éprouvettes dans l'eau. Les éprouvettes réalisées dans des moules cylindriques de 80mm de diamètre intérieur et 150mm de hauteur sont compactées à la presse avec une pression de moulage de 120kg/m², qui est appliquée en une minute et maintenue cinq minutes. Les éprouvettes sont conservées à 18°C pendant 8 jours.

b- essai Hubbard Field : qui consiste à mesurer l'effort maximum exercé sur une éprouvette cylindrique placée sur un appui cylindrique creux d'un diamètre intérieur légèrement inférieur au diamètre extérieur de l'éprouvette.

L'essai s'effectue à 60°C au USA et à 18°C avant et après immersion de 7 jours dans l'eau.

c- l'essai MARSHALL : qui permet de compacter des éprouvettes cylindriques de 10 mm de diamètre et 6,3 mm de hauteur par damage génératrice. L'essai qui s'effectue à 60°C a pour but de déterminer, pour un taux de compactage donné :

- *la stabilité MARSHALL :* c'est la résistance de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette semi frettée, cette compression est appliquée à une vitesse de 0.86mm/s après une demi- heure d'immersion dans l'eau à 60°C.

- *le fluage MARSHALL :* c'est l'affaissement de l'éprouvette au moment de la rupture.

d- l'essai de presse à cisaillement giratoire : qui caractérise le pourcentage de vide d'un mélange hydrocarboné soumis à un compactage isotherme.

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés hydrocarbonés par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé.

Le principe de l'essai consiste à soumettre des éprouvettes à une action de pétrissage, conjuguée à une faible compression statique simulant l'effet des compacteurs sur chantiers.

L'action de compactage est réalisée à vitesse de rotation constante de tours /min. la température de l'essai fonction de la dureté du bitume.

Cette action est suivie par l'enregistrement simultané en fonction du temps de la hauteur de l'éprouvette et de l'évolution de la force d'inclinaison F nécessaire pour maintenir l'Angle ϕ constant (1 degré).

L'essai s'arrête automatiquement après 200 girations.

D'autres essais tentent de simuler le comportement d'un enrobé en service comme :

a- l'orniéreur : l'orniéreur est un appareil destiné à tester le comportement des enrobés bitumineux sous l'effet d'une charge roulante. C'est un simulateur de trafic qui permet de caractériser la résistance à l'orniérage des enrobés.

L'essai se fait sur des plaques rectangulaire prélevées sur routes puis sciées, ou sur des plaques fabriquées en laboratoire.

Les éprouvettes ont les dimensions suivantes :

Longueur : 500mm.

Largeur : 180mm.

Hauteur : jusqu'à 150mm.

Lors de l'essai, deux roues animées d'un mouvement alterné passent chacune sur plaque de matériau, dont on observe les dégradations.

b- l'essai Duriez : qui à pour but de déterminer, pour un compactage donné, les qualités de résistance mécanique et de résistance au désenrobage par l'eau d'une éprouvette cylindrique de **80mm** de diamètre compactée dans des moules cylindriques avec une force de **60 KN** pendant **5 min**, le poids de l'éprouvette est de **1000g**.

La résistance à la compression axiale est donnée par le rapport immersion- compression r/R .
Où

R : résistance après 8 jours de conservation à sec.

r : résistance après 8 jours dont 7 jours d'immersion

La température de l'essai est de 18°C et la vitesse est de 1mm/s .

c- le phénomène de fatigue : La fatigue peut être définie de la façon suivante : *le phénomène de rupture sous une contrainte répétée ou variable ayant une valeur maximum généralement inférieure à la résistance à la traction du matériau.*

La figure (2.3) est une autre vue des contraintes dans une couche bitumineuse sous une charge appliquée par une roue. La contrainte de traction à l'extrémité inférieure de la couche bitumineuse résultera en une extension de traction. La figure montre une vue exagérée de l'effet d'une contrainte de traction sur le matériau bitumineux.

Contrairement à la contrainte verticale de compression qui agit surtout sur le squelette du granulat, la contrainte de traction agit principalement sur le bitume (ou mortier asphaltique-fin) qui lie les particules du granulat entre elles. Plus le liant est dur et plus le nombre de points de contact du granulat est grand, plus la rigidité du béton est élevée et plus l'extension de traction pour une contrainte déterminée est faible.

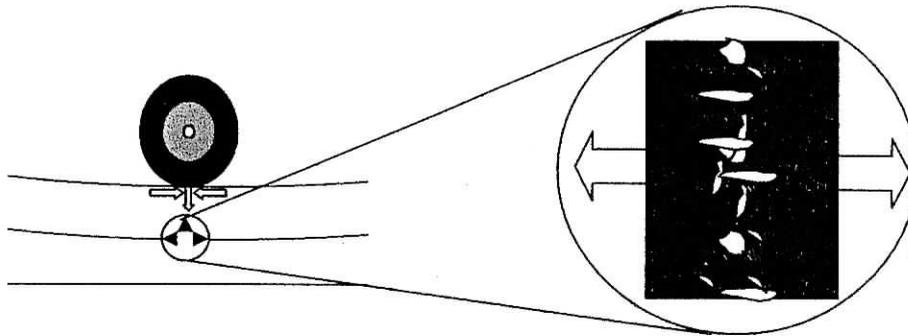


Figure (2.3) : phénomène de fatigue

Un essai de fatigue a pour but de déterminer la durée de vie d'un matériau c-à-d le nombre de répétitions de charges qu'il peut subir jusqu'à sa rupture.

d- module de rigidité :

Le module de rigidité d'un mélange bitumineux est le rapport entre la contrainte et l'extension. C'est peut-être, la propriété fondamentale la plus importante dans la mesure ou elle nous renseigne sur le degré de déformation du matériau sous l'action d'une charge déterminée et ceci est lié à la fissuration due à la fatigue, à la déformation permanente et au pouvoir couvrant de la charge. La rigidité est analogue au module de Young qui est utilisé pour caractériser les matériaux élastiques tels que le caoutchouc ou l'acier.

L'essai consiste à placer une éprouvette cylindrique du matériau à étudier dans une chambre climatique de manière à pouvoir lui appliquer un effort de compression qui engendre des déformations qui seront mesurées à l'aide des capteurs (déformation horizontale pour le calcul de module de rigidité et les déformations verticales pour les autres essais)

La température est fixée à 20°C pour le calcul de module de rigidité.

Essai de module de rigidité par traction indirecte (voir figure 1.4)

Le NAT est d'une sensibilité élevée, ce qui permet d'obtenir des mesures précises de déformations au cours de l'essai de traction indirecte

Le principe de l'essai de traction indirecte répétée consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée.

Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction. Le module élastique (S_m) est donné par la relation suivante :

$$S_m = \frac{L}{(D \times t)} \times (\nu + 0.27)$$

Où:

S_m : module de rigidité

L : effort vertical maximal appliqué,

D : déformation diamétrale maximale,

t : épaisseur de l'éprouvette,

ν : coefficient de Poisson.

Avant l'essai proprement dit, l'éprouvette est soumise à 5 pulsations de conditionnement, dont le but est la stabilisation des barres de chargement par l'intermédiaire desquelles l'effort est transmis à l'échantillon. Cinq pulsations d'essai sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs.

Le coefficient de Poisson est estimé à la valeur communément utilisée et qui dépend de la température de l'essai.

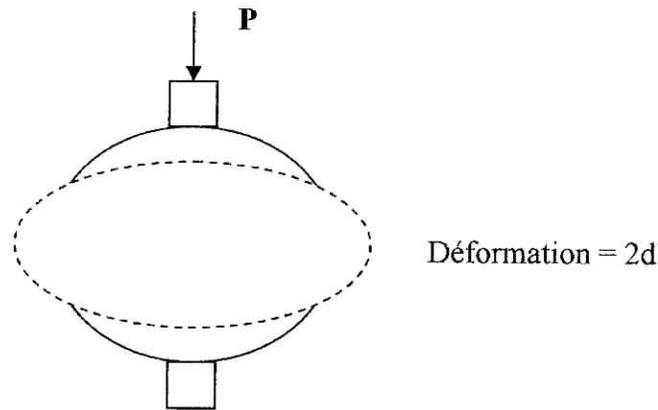


Fig. (2-4) Principe de l'essai de traction indirecte

Les informations délivrées par ces essais sont différentes et le choix de l'essai à faire dépend des caractéristiques recherchées car il n'est pas possible pour des raisons de durée et de coût, à l'utilisation systématique de tous les essais.

Le tableau suivant donne pour chaque essai, les principales informations délivrées

Essai	INFORMATION
DURIEZ	Compacité, résistance à sec -tenue à l'eau
MARSHALL	Compacité, fluage MARSHALL, stabilité MARSHALL
ORNIEUR	Résistance à l'orniérage
PCG	Maniabilité, prévision de la compacité sur chantier en fonction de l'épaisseur
NAT	rigidité
FATIGUE	durée de vie en fatigue

2.7-Spécifications relatives aux granulats pour bétons bitumineux -couche de roulement-

Le tableau (2-1) regroupe les différentes spécifications concernant les bétons bitumineux

Tableau (2-1) spécifications aux granulats pour couche de roulement [5]

COUCHE DE ROULEMENT							
trafic		<T3	T3	T2	T1	T 0	>T0
Caractéristiques normalisées	-dureté des gravillons (LA-MDE)	catégorie	C		B		B
	-granularité, forme, propreté des gravillons (A-P)		II		II		II
	- granularité, propreté des sables (ES 10%-VB)		a		a		a

2.8- La méthode du L.C.P.C pour l'étude des mélanges [1]

A partir d'un granulat simple ou composé, entrant dans le fuseau recommandé, on choisit une teneur en liant fonction de la surface spécifique calculée du granulat, et on soumet le mélange compacté à l'essai de compression simple avant et après immersion. On vérifie que le pourcentage des vides est convenable, que la stabilité à sec est suffisante et que, après immersion, la chute de résistance à la compression est faible.

La surface spécifique du squelette minéral est calculée conventionnellement par la formule :

$$S=0.17G + 0.33g + 2.3 s_1 + 12 s_2 + 135f \text{ (m}^2\text{/kg) où}$$

G : proportion en poids d'éléments supérieurs à 10mm ;

g : proportion en poids d'éléments entre 5 et 10mm ;

s₁ : proportion en poids d'éléments entre 0,3 et 5mm ;

s₂ : proportion en poids d'éléments entre 0,08 et 0,3mm ;

f : proportion en poids d'éléments inférieurs à 0,08mm.

La teneur en liant sera définie lors de l'étude au laboratoire en utilisant la formule suivante :

$$P = \alpha K^5 \sqrt{S}$$

α : coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats tel que

$$\alpha = 2.65 / \gamma_g$$

K : module de richesse.

S : surface spécifique conventionnelle.

2.9-Calcul de la compacité des éprouvettes

La compacité des éprouvettes est donnée par :

$$C = \frac{D_{ap}}{D_{th}}$$

Avec :

D_{ap} : densité apparente de l'éprouvette.

D_{th} : densité théorique de l'éprouvette.

La densité théorique est donnée par la formule :

$$D_{th} = \frac{100\% \text{ agrégats} + p\% \text{ de bitume}}{V_{abs\text{agrégats}} + V_{abs\text{bitume}}}$$

chapitre3

lumière et couleur

3.1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons essayer d'expliquer les phénomènes physiques et chimiques liés à la couleur.

3.2- La lumière

La lumière est une forme d'énergie, notre principale source lumineuse est le soleil. Le soleil est une grande boule de matières maintenue à de très hautes températures par l'énergie dégagée par des réactions chimiques et nucléaires qui se font en son sein. L'énergie dégagée à la suite de ces réactions nous la ressentons soit sous forme de chaleur ou de lumière. Par le même processus nous obtenons le couple (chaleur- lumière), la matière est composée de molécules, les molécules sont composées d'atomes semblables ou différents. Les atomes sont elles mêmes composées d'un noyau chargé (+) et d'électrons chargés (-) qui gravitent autour. Ces électrons sont à l'origine de l'électricité et des phénomènes électriques, le noyau est composé entre autre de protons chargé (+) et de neutrons qui eux son neutres.

Sous l'action, à un niveau d'énergie quelconque (réaction chimique ou réaction nucléaire), certains électrons passent d'une orbite à une autre c'est-à-dire à un niveau d'énergie différent.

Lorsque l'électron rejoint sa place initiale sur son orbite d'origine il restitue l'énergie qu'il a fallu lui fournir pour se déplacer ; sous forme de lumière ou de chaleur.

3.2.1- Réflexion de la lumière

La lumière se déplace en ligne droite, On peut le constater lorsqu'un rayon lumineux traverse une vitre. Lorsqu'il est projeté sur une surface, il est soit :

- complètement réfléchi.
- ou partiellement réfléchi.

L'angle avec lequel le rayon lumineux est projeté sur une surface est le même que l'angle formé par le rayon réfléchi. On dit que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

La brillance d'un film ou d'une surface est due au phénomène de la réflexion de la lumière. Sur un surface parfaitement lisse la lumière projetée se réfléchit de façon uniforme dans l'œil de l'observateur comme dans la fig. (3-1) et la surface paraît brillante. Comme l'œil reçoit une image complète de l'objet, l'observateur la voit parfaitement définie, et on dit que l'objet est brillant et lisse.

Par contre, si la surface n'est pas lisse, des parties de l'objet se voient clairement par réflexion, et d'autres parties de l'objet sont flues parce que la réflexion de la lumière est diffuse et l'image que perçoit l'œil est beaucoup moins nette.

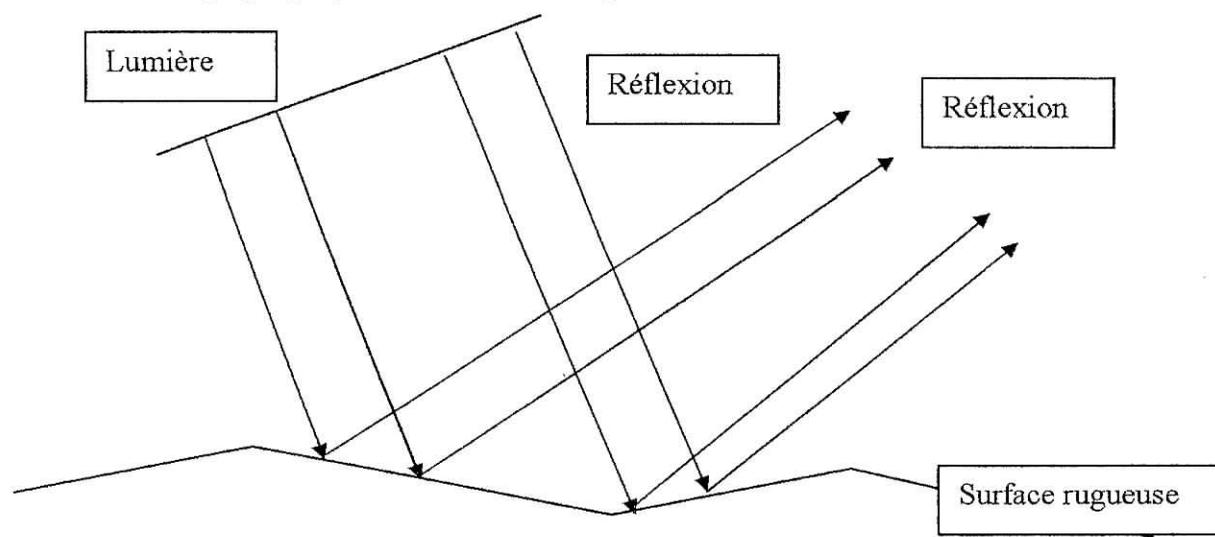


Fig. (3-1) : Réflexion de la lumière

3.2.2- Réfraction de la Lumière

Quand la lumière rencontre un objet (surface), une partie de cette lumière est réfléchiée et une partie est soit :

- absorbée : dans ce cas on dit que l'objet est opaque ou teinté.
- où passe à travers de l'objet et dans ce cas on dit que l'objet est transparent ou translucide (verre, eau, etc....).

3.2.3- Diffraction de la lumière

La majeure partie des objets qui nous entourent ne sont pas plats et ont beaucoup de parties arrondies. Le comportement de la lumière sur une surface arrondie se comporte comme sur une surface plane par rapport à la tangente de la courbe, et on peut y appliquer toutes les lois de la réflexion et de la réfraction propres à la surface plane. (Voir figure 3.2)

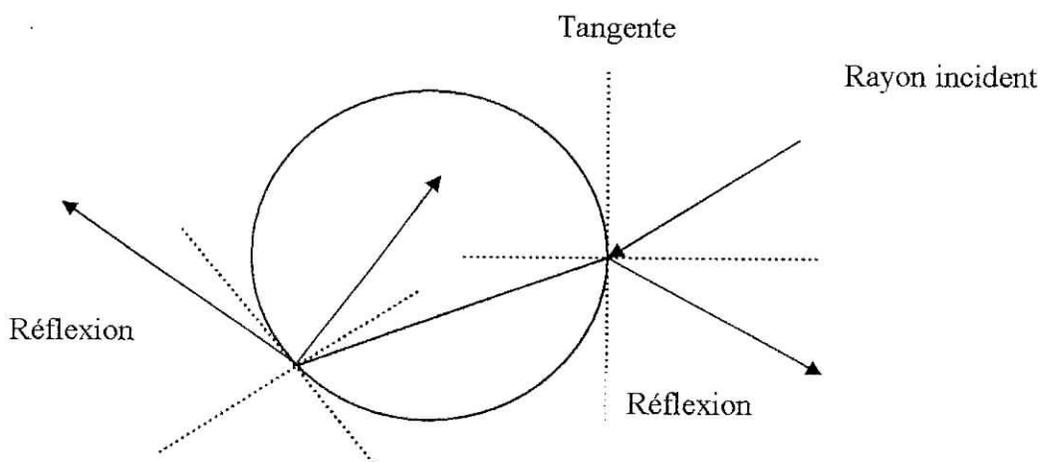


Fig. (3-2) : diffraction de la lumière

La diffraction est le phénomène qui est utilisé dans le spectrophotomètre.

3.3- La couleur

La couleur est une manifestation de l'interaction entre la lumière visible (la lumière visible se situe dans des longueurs d'ondes comprises entre 400nm et 750nm) et la matière, qui nous paraît alors colorée par elle-même. Le phénomène de la vision, lui aussi résulte d'une absorption de la lumière par la rétine, absorption modifiée par une série de réactions chimiques. La structure des protéines du système visuel et provoquant une suite de réponses chimiques ayant pour effet de transmettre les signaux reçus le long du nerf optique jusqu'au cerveau.

L'irradiation d'une matière par la lumière blanche se traduit, selon la structure de cette matière et l'état de sa surface, par les phénomènes suivants :

- toutes les radiations incidentes sont réfléchies ou diffusées, la matière nous apparaît alors blanche.
- Toutes les radiations sont absorbées, la matière nous apparaît noire.
- Une partie des radiations est absorbée sélectivement, la lumière nous apparaît colorée.

Il faut préciser que la lumière blanche émise par le soleil couvre les radiations électromagnétiques localisées dans la région de 400 à 800nm au-delà et en deçà du spectre visible. La lumière est composée de radiations invisibles pour l'œil humain. Pour les longueurs d'onde supérieures à 800nm, on se trouve dans le domaine de l'infrarouge et pour

celles inférieures à 400nm dans celui de l'ultraviolet. La couleur d'une substance n'est donc qu'un cas particulier d'un phénomène beaucoup plus général, celui de l'absorption sélective.

3.4- La vision et perception des couleurs (voir figure 3.3)

La sensation colorée que l'on éprouve lorsqu'on regarde un objet coloré résulte de trois facteurs :

- la lumière qui éclaire l'objet.
- l'objet qui renvoie une partie de cette lumière en fonction de sa couleur.
- notre œil qui est impressionné (rétine) par la lumière qu'il reçoit en regardant cet objet.

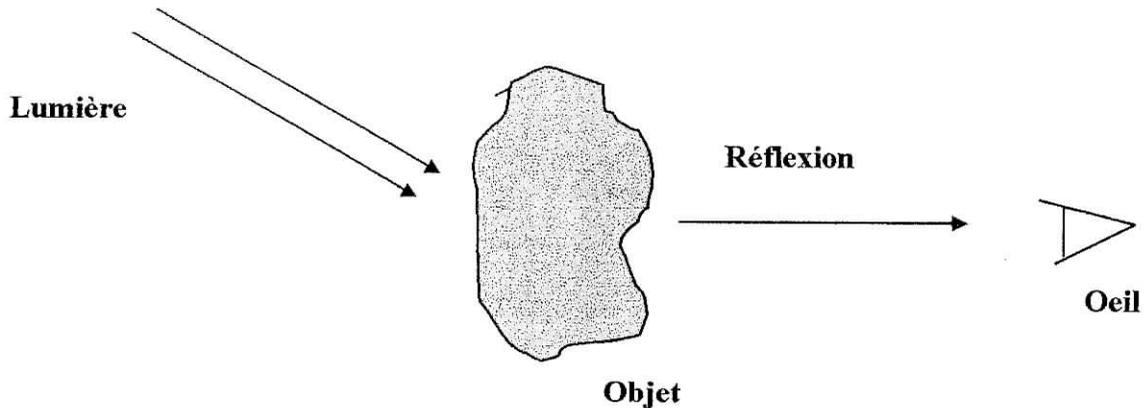


Fig. (3-3) : vision et perception des couleurs

3.5- Lumières colorées et matières colorées

Nous avons dit dans le paragraphe précédent que La couleur est une manifestation de l'interaction entre la lumière visible et la matière donc :

- | | | |
|---|---|-------|
| - une lumière blanche sur surface rouge | → | rouge |
| - une lumière rouge sur une surface rouge | → | rouge |
| - une lumière rouge sur surface blanche | → | rouge |
| - une lumière verte sur surface blanche | → | vert |
| - une lumière verte sur une surface verte | → | vert |
| - une lumière verte sur une surface rouge | → | noir |
| - une lumière rouge sur une surface verte | → | noir |

3.6- Terminologie des couleurs

3.6.1- Tonalité : Le ton, ou tonalité, c'est la quantité de la couleur dans le sens courant, c-à-d, par exemple le bleu, le vert et le jaune cette qualité, encore appelée la teinte, caractérise aussi le rouge, le magenta et le cyan

3.6.2- Saturation : La saturation correspond à la proportion de la couleur dominante La saturation se remarque par les couleurs vives et les couleurs ternes, elle augmente ou diminue par rapport à un point central. Le jaune du citron est plus saturé (vif) que celui de la banane.

3.6.3- luminosité : La luminosité d'une couleur est la quantité de lumière réfléchiée par la surface. L'échelle de la luminosité à comme extrémité le blanc et le noir.

3.6.4- chromaticité : La chromaticité d'une couleur est en quelque sorte l'ensemble des valeurs que sont le ton et la saturation

3.6.5- clarté : La clarté est une caractéristique telle que couleurs claires et couleurs foncées. La clarté des couleurs augmente ou diminue selon un axe vertical. Prenons comme exemple le jaune du citron et celui du pamplemousse. Le jaune citron est le plus clair

3.7- Analyse colorimétrique [41]

La couleur est mesurée sur l'objet coloré selon le principe de **Hunter**, en coordonnées L^* , a^* , b^* (système CIE1976) ou en coordonnées XYZ (système CIE1931).

Le principe du colorimètre est le suivant.

L'échantillon à contrôler est éclairé sous un angle incident de 45°C par un ou plusieurs faisceaux optiques (suivant la tête optique utilisée), en fonction de son état de surface, l'échantillon réfléchit la lumière d'une façon plus ou moins diffuse. Le fuseau lumineux réfléchi par l'échantillon est amené par un conduit de fibre optique sur les filtres appropriés.

La lumière qui traverse chaque filtre arrive sur des cellules photodéectrices au silicium, qui vont générer un courant proportionnel à l'intensité lumineuse qui les atteint. Tous les filtres sont contrôlés au spectrophomètre pour donner une courbe de réponse identique

3.8- Pigments et colorants [41], [42]

3.8.1- Définitions

3.8.1.1- Colorant : -matière colorante sous forme de poudre, de couleur ou noir, soluble dans les Solvants et les substrats.

3.8.1.2- Pigment : matière colorante sous forme de poudre, de couleur, blanc ou noire, insoluble dans les solvants et les substrats.

De ces définitions, il résulte que les colorants étant par définition solubles, ils auront une forte tendance à migrer.

En technique routière seuls les pigments minéraux sont utilisés, car ils résistent assez bien aux effets de la température (lors de l'enrobage, 150°C pour les enrobés et proches des 230°C pour les asphaltes), des intempéries et surtout de la lumière (ultra-violets).des vérifications de la stabilité de la couleur aux températures d'enrobage sont parfois nécessaires, notamment dans le cas des asphaltes.

Les pigments minéraux sont commercialisés sous forme d'un mélange de particules primaires, d'agrégats et d'agglomérats :

- **les particules primaires :** sont de formes très diverses : sphères, parallélépipèdes, bâtonnets, aiguilles.

- **les agrégats :** sont des assemblages face à face de particules primaires présentant des interfaces non accessibles aux plastifiants ou aux liants.

- **les agglomérats:** ont des assemblages de particules primaires et d'agrégats par les arêtes et les sommets ; leurs surfaces intérieures sont accessibles aux plastifiants et aux liants.

Certaines de ces particules, de granulométrie plus ou moins fine, peuvent apporter des variations des propriétés des pigments (solidité de couleurs à la lumière et aux intempéries, nuances de la teinte, brillance)

La finesse de broyage peut également modifier la nuance d'une teinte comme le montre le tableau ci-dessous :

Tableau (3-1) : Influence de la finesse des particules sur les nuances de teinte [42]

Influence des particules plus grossières	Teinte de référence	Influence des particules plus fines
+ rouge	Jaune	+vert
+ rouge	Orange	+jaune
+ bleu	Rouge	+jaune
+ bleu	Violet	+rouge
+ rouge	Bleu	+vert
+ jaune	Vert	+bleu
+ rouge	Brun	+jaune

3.9- Principaux types de pigments minéraux [42]

3.9.1- Dioxyde de titane (TiO₂) :

Employé avec des pigments colorés, il permet d'obtenir des nuances opaques et des pastels.

Il est commercialisé sous deux formes cristallines :

- **l'anatase** : plus blanc que le rutile, n'est pas recommandé pour les applications extérieures.
- **le rutile** : un peu plus jaunâtre que l'anatase, mais possède une excellente solidité à la lumière et aux intempéries.

3.9.2- Jaune de chromate

Ce sont des cristaux mixtes de PbSO₄, PbCrO₄.

Leur tonalité va du jaune verdâtre pour ceux qui contiennent beaucoup de PbSO₄ au jaune orangé pour ceux qui n'en contiennent pas.

Leurs nuances sont pures, mais ils présentent une mauvaise résistance aux alcalis. Les qualités non traitées ont une faible solidité aux intempéries (noircissement).résistance à la chaleur : 230-240°C.

3.9.3- Titanates de nickel et de chrome

Ce sont des cristaux mixtes à structure rutile, de formule :



Me étant du nickel ou du chrome.

Leurs nuances sont ternes, leur pouvoir colorant est faible. Ils présentent d'excellentes résistances à la lumière, aux intempéries, à la chaleur (> 500°C) et aux produits chimiques.

3.9.4- Oxyde de Fer

Formule générale : $x\text{Fe}_2\text{O}_3, y\text{H}_2\text{O Fe}_2\text{O}_3\text{Fe}_3\text{O}_4$

Leurs nuances vont du jaune au noir en passant par le rouge et le brun.

Ils présentent une très bonne solidité à la lumière et aux intempéries. seul l'oxyde rouge présente un intérêt pratique car il résiste à la chaleur au-delà de 500°C, alors que les oxyde

jaune, brun et noir virant au rouge entre 180 et 200°C ,soit par déshydratation, soit par oxydation.

3.9.5- Pigment de cadmium

Ce sont des cristaux mixtes de CdS.ZnS (jaune) ou CdSe (rouge)
Leurs nuances sont très pures. Ils présentent une excellente solidité à la lumière et aux intempéries, ainsi que d'excellente résistance à la chaleur (>500°C) et aux produits chimiques.

Ils sont fortement remis en cause du point de vue toxicologique, et leur utilisation n'est plus acceptée dans un certain nombre d'applications et de pays.

3.9.6- Orange de molybdène

Ce sont des cristaux mixtes : $xPbCrO_4$, $yPbSO_4$, $zPbMoO_4$

Leurs nuances sont de plus en plus rougeâtres quand la proportion de $PbMoO_4$ augmente.

Les oranges de molybdène ont les mêmes caractéristiques que les jaunes de chrome.

3.9.7- Bleu de cobalt :

Ce sont des aluminates de cobalt : CoO . Al_2O_3

Ils ont une très bonne solidité à la lumière et aux intempéries, ainsi qu'une excellente résistance à la chaleur.

3.9.8- Bleus outremer :

Ce sont des silicates doubles de sodium et d'aluminium contenant du soufre. Leurs nuances vont du bleu verdâtre au bleu violacé.

Ils présentent une mauvaise résistance aux acides, mais une bonne solidité à la lumière et aux intempéries, ainsi qu'une excellente résistance à la chaleur.

3.9.9- Verts oxydes de chrome :

Ce sont des oxydes de chrome : Cr_2O_3 , de nuance terne. Ils présentent une très bonne solidité à la lumière, aux intempéries et une excellente résistance à la chaleur (> 500°C).

chapitre4

présentation des enrobés colorés

4.1- Introduction

Ce chapitre dresse un état de l'art sur les revêtements bitumineux colorés. Il rappelle les principales caractéristiques des constituants, définit et décrit les techniques bitumineuses colorées pour couche de roulement en indiquant leurs avantages et leurs inconvénients. Le domaine d'emploi avec les objectifs recherchés, ainsi que les restrictions et précautions d'usage sont présentés.

4.2- Description des revêtements colorés [41]

4.2.1- les constituants

4.2.1.1- Les granulats

Les granulats sont choisis pour leur couleur qui devra se rapprocher le plus possible de la couleur finale recherchée. Sous l'effet de l'usure par la circulation des véhicules, les gravillons se décapent de leur pellicule de liant et par conséquent, à terme, la couleur dominante sera essentiellement celle du granulat, d'où l'importance primordiale du choix de la teinte du granulat dans les revêtements colorés. Ils pourront éventuellement provenir de carrières assez éloignées de lieu d'utilisation ce qui peut augmenter considérablement le prix du mélange, car les coûts supplémentaires de transport peuvent s'intégrer dans le prix global du produit, d'autant que les quantités produites restent très réduites du fait des coûts élevés de ces techniques. Si l'on ne trouve pas de teintes similaires, on choisira des granulats de couleurs claires assez neutres estompant la teinte du granulat par rapport à celle du colorant. Le recours à des couleurs naturelles (gris clair, ton pierre, ocre clair, rouge clair,...) est de plus en plus fréquent pour insérer la route dans son environnement. Dans certains cas, on peut même se dispenser de l'usage de colorant.

Les propriétés mécaniques et géométriques des granulats devront aussi satisfaire aux classes de performances des normes sur les granulats en fonction des utilisations attendues, notamment vis-à-vis des sollicitations mécaniques du trafic lourd et des contraintes liées aux demandes d'adhérence sur section sous trafic rapide important (choix d'un granulat présentant une bonne résistance à l'usure par polissage). L'adhésion entre le liant et les granulats devra être vérifiée, au besoin par la réalisation d'essais d'adhésivité passive et active en laboratoire. En effet, il est fréquent de rencontrer des modifications de l'adhésivité avec les granulats colorés, dues à la présence de certains oxydes, voire même des altérations de la roche. On vérifiera, lors de l'étude de formation, la résistance du produit bitumineux coloré vis-à-vis du désherbage par l'eau.

On attachera également une attention particulière à la couleur des fines d'apport, qui devront aussi avoir une couleur semblable à celle du produit final. Ceci est d'autant plus vrai que l'on recherche des enrobés blancs. Les études préalables devront se faire avec les fines retenues pour le chantier, afin d'évaluer les effets sur la couleur finale des variations du dosage en fines d'apport. Les fines provenant de la même roche que celle des granulats est souvent souhaitable. Lors de la fabrication, l'incorporation de filler récupéré provenant d'autres fabrications de la centrale est vivement déconseillée.

4.2.1.2- Les liants

Les liants utilisés pour la réalisation des revêtements colorés sont de deux genres :

- les liants à base de bitume.
- les liants à base de résine.

Les liants bitumineux utilisables pour la réalisation des revêtements colorés sont :

- les bitumes purs classiques.

- les bitumes purs pigmentables.
- les bitumes de synthèse ou liant clairs.

Ils peuvent être employés soit à chaud en enrobage (enrobés bitumineux et asphaltes), soit à température réduite après fluidification par une coupe pétrolière (enduits superficiels d'usure), soit à froid sous forme d'émulsion (enduits et enrobés coulés ou coulis)

- Les liants à base de bitume [14], [16], [20], [41]

- les bitumes purs classiques :

La couleur noire, des bitumes routiers classiques, due aux asphaltènes, limite leur usage aux seuls enduits superficiels d'usure, ou la coloration est essentiellement obtenue par la couleur des granulas utilisés. Pour des raisons d'économie et surtout les limites d'efficacité dans une base noire, restreignent les teintes possibles à la seule couleur rouge brun par ajout d'oxyde ferrique, aux dosages très élevés (3 à 4 %). Ce procédé présente le double avantage de s'affranchir des contraintes relatives à l'approvisionnement d'un bitume spécifique et disposer sans réserve des caractéristiques mécaniques normales des bitumineux usuels, ou même, en cas de nécessité des caractéristiques mécaniques améliorées des matériaux à base de bitume modifiés par polymère, C'est une solution qui offre beaucoup de souplesse en restant relativement économique lorsque la seule couleur rouge peut être admise.

- Les bitumes pigmentables

Les bitumes pigmentables présentent, par une fabrication spéciale, une teneur réduite en asphaltènes (de l'ordre de 5%, au lieu de 15% pour le bitume classique), permettant une coloration rouge selon diverses nuances, à des dosages plus faibles en colorant. Mais surtout, outre le rouge d'autres couleurs comme des verts ou bleus sombre sont également possibles. Par leur faible dosage en asphaltènes, ces liants présentent une certaine susceptibilité à la température et sont sensibles aux charges lourdes. Des déformations par orniérage ou par fluage statique sont possibles, aussi ces liants ne peuvent être utilisés que sur des sites hors circulation ou trafic modéré en véhicules lourds. Leur emploi reste par conséquent assez limité.

- Les bitumes de synthèse ou liants clairs

Les liants clairs sont des produits issus de la chimie du pétrole. Ils sont obtenus par un procédé de raffinage spécial du pétrole, conduisant à une base ne contenant pas d'asphaltènes. L'analyse rhéologique montre que le comportement de ces liants de synthèse suit le même principe d'équivalence temps/température que les bitumes classiques, mais employés purs, ils présentent une susceptibilité à la température plus grande que les liants bitumineux de même consistance, ce qui leur confère une maniabilité exceptionnelle lors de la mise en place de l'enrobé. Les températures d'équi-viscosité sont inférieures d'environ 15°C à celle de bitumes conventionnels de même grade. Il faut encore noter qu'ils présentent un moindre durcissement que les bitumes classiques pendant la phase d'enrobage à chaud (augmentation de la TBA après RTFOT limitée à seulement 1 ou 2°C, contre 4 à 7 pour les bitumes purs) et ils confèrent à l'enrobé une maniabilité plus forte lors de la mise en place de l'enrobé, permettant de réduire quelque peu l'énergie de compactage. En outre, leur parfaite compatibilité vis-à-vis des polymères thermoélastiques ou thermoplastiques donne la possibilité d'adapter la formulation pour une très large gamme d'utilisation pouvant aller jusqu'aux sollicitations mécaniques les plus sévères.

En film mince, ces bitumes de synthèse sont translucides. Ils peuvent donc être employés sans colorant pour laisser apparente la couleur des granulat. Ils permettent, par incorporation d'une quantité de pigment inférieure à celle utilisée pour les bitumes pigmentables (réduire de

plus de 50%), d'obtenir une très large palette de couleurs, aux teintes plus ou moins vives, présentant une bonne clarté.

Ces bitumes de synthèse sont employés soit à chaud en centrale d'enrobage (150 à 170°C), ou dans les centrales de fabrication des asphaltes aux températures supérieures à 200°C, soit à froid sous forme d'émulsion de bitume de synthèse (type 70/100 à 65 ou 70% de bitume de synthèse) pour des applications en couche d'accrochage d'enrobés colorés de faibles épaisseurs (2 à 4cm), en enduits superficiels, et plus rarement, en enrobés coulés à froid.

A titre d'exemple, le tableau (4-1) regroupe les caractéristiques usuelles d'un ensemble de liants de synthèse :

Tableau (4-1) : Caractéristiques de différents liants de synthèse pigmentables commercialisés en France [20]

		20/30		35/50				50/70				70/100				180/200
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
pénétration	1/10m m	25/ 30	20/ 30	35/50	40/ 50	35/ 50	35/ 50	50/ 70	60/ 70	50/ 70	50/ 70	80/ 100	70/ 100	70/ 100	70/ 100	180/ 100
TBA	°C	49- 55	56-64	6272	64	46-52	54- 60	59- 68	64	44- 50	51- 57	56-64	64	41-47	50- 56	63
Densité relative			0.97- 1.04	1.031	0.95 5		0.97 -	1.02 4	0.956		0.97 -	1.021			0.97 -	0.949
Point d'éclair	°C	>25 0	>230	>230	>27 0	>250	>23 0	>23 0	>270	>25 0	>23 0	>230	>27 0	>250	>23 0	>270
Point de frass	°C	-2	-8	-15		-10	-12	-17		-12	-13	-18		-14	-15	
Viscosité à	125°C									200						
	130°C					200										
	135°C	200														
	140°C			370												
	160°C		590					311	455		440	245	375	200		270
	170°C						510									
180°C																
Vieillesse nt RTFOT																
Pénétration Résiduelle	%			82	90			87	88			78	85			94.5
ΔTBA	°C			1	1			1.5	1			1.5	1			1

Les liants à base de résine [16], [44], [43]

Les liants à base de résine utilisables pour la réalisation des revêtements colorés sont :

- Les résines époxydes

Les résines époxydes peuvent être soit liquides, très visqueuses ou bien solides suivant la valeur moyenne de l'indice n, Ce paramètre dépend du rapport molaire entre l'épichlorhydrine et le bisphénol A. Elles nécessitent au moment de la mise en œuvre du mélange d'une base résine et d'un agent durcisseur, qui génère une réaction de polymérisation. C'est à la fin de cette réaction que la couche de produit atteint l'optimum de ses caractéristiques.

Les revêtements fabriqués avec les résines époxydes présentent de nombreuses qualités :

- une résistance mécanique élevée. (Voir Tableau (4-2)).
- une susceptibilité thermique pratiquement négligeable -surtout pour la coloration
- une excellente adhérence sur tous les types de support, contribuant à leur imperméabilisation et une grande inertie à l'action des produits chimiques.

Du point de vue de la coloration, la gamme de teintes possibles est très variée (grés, vert rouge, beige,...).

Pour le comportement à long terme, les ultraviolets semblent à l'origine d'une évaporation de la couleur (éclaircissement) dans le temps. Il convient également de noter une tendance à fariner.

Tableau (4-2) caractéristiques des résines époxydes [44]

Caractéristique	norme	Valeur moyenne pour la formule de référence
Contrainte à la rupture en traction	ISO 527	70 0 80 N/mm ² ou MPa
Allongement à la rupture en traction	ISO 527	1 à 1.5 %
Contrainte à la rupture en compression	ISO 604	140 à 150 N/mm ² ou MPa
Contrainte à la rupture en flexion	ISO 178	110 à 130N/mm ² ou MPa
Allongement maximal à la rupture en flexion	ISO 178	1.2 à 1.7 %
Module d'Young en traction	ISO 178	10200 N/mm ² ou MPa
Coefficient de Poisson	ISO 53457	≈0.35
Résistance au choc charpy	ISO 179	7 à 10·kj/m ²

- Les résines polyuréthannes

Elles nécessitent une période de polymérisation pour que les matériaux qu'elles constituent atteignent l'optimum de leurs propriétés. La polymérisation peut être générée de 2 manières différentes :

- soit à partir d'un système bicomposant constitué à la mise en œuvre et semblable dans le principe à celui des résines époxydes.
- soit à partir d'un monocomposant qui polymérise sous l'action de l'humidité de l'air.

Les résines polyuréthannes possèdent également beaucoup de qualités, très semblables à celles citées précédemment. Et la gamme de couleurs disponible est aussi très variée.

Il existe dans cette famille de liants des variations moins sensibles aux agressions atmosphériques (ultraviolets principalement) qui en particulier ne jaunissent pas et ne farinent pas au cours de l'usage à long terme.

- Les résines polyméthacryliques

Elles nécessitent également une phase de polymérisation suivant le principe d'un bicomposant constitué à la mise en œuvre par le mélange d'une base et d'un catalyseur. Les qualités des revêtements élaborés avec ces résines sont de même ordre que celle des cas précédents, avec comme principaux avantages des résistances mécaniques de niveau élevé et une polymérisation très rapide.

La contre partie a ces avantages est une grande rigidité accompagnée d'un risque important d'inflammabilité à l'application et d'une odeur forte et persistante.

- Les résines acryliques et vinyliques

Elles sont préparées suivant un principe différent de celui des autres groupes de résines. Ces liants sont fournis sous forme d'émulsions de copolymères. Les principaux avantages issus de cette particularité sont de pouvoir disposer d'un produit prêt à l'emploi, monocomposant, pour un prix plus faible que celui des liants appartenant aux groupes précédents. Mais les caractéristiques des résines acryliques et vinyliques ne sont pas du même

niveau de qualité. En particulier la durée de vie et l'inertie chimiques sont relativement faibles.

Leur domaine d'emploi se trouve donc limité aux peintures et aux traitements antipoussière dans le cas de revêtements supportant un faible trafic.

Quelle que soit la faculté de coloration des liants, l'efficacité du résultat du point de vue de la teinte d'un revêtement, aussi bien à court, moyen ou long terme ne dépend pas uniquement du liant.

Pour un enrobé bitumineux, la couleur dominante après une période de 1 ou 2 ans devient essentiellement celle du granulat. L'asphalte échappe en partie de cette règle, comme certains mélanges élaborés avec les liants à base de résines.

4.2.1.3- Les colorants [41], [47]

Les colorants sélectionnés sont des oxydes métalliques, parmi lesquels on trouve :

- les oxydes de fer pour les rouges et les jaunes.
- le chromate de plomb pour les jaunes clairs
- l'oxyde de chrome pour les verts.
- l'oxyde ou l'aluminate de cobalt pour les bleus.
- l'oxyde de titane pour le blanc.

Pour des raisons de prix et de facilité d'emploi (utilisable avec tout type de liant), le rouge reste la couleur la plus employée.

Ces colorants utilisés avec des bitumes de synthèse conduisent à une grande variabilité des teintes (par mélange de colorants), celles-ci pouvant être très lumineuses et vives. Les dosages en colorant sont faibles de l'ordre de 0.5 à 2% suivant l'intensité de la couleur recherchée et la qualité « colorimétrique » du colorant employé. Ces poudres sont assimilées à des fines d'apport dont on tient compte dans la formulation du mélange au niveau de la reconstitution granulaire. Par ailleurs, une attention particulière doit être portée pour les mélanges à froid, à base d'émulsion, *car ces fines du colorant peuvent modifier les mécanismes de rupture de l'émulsion, en créant des ruptures prématurées voire anarchiques, et en augmentant la cohésion des mélanges avant leur application sur la route.* Des études préalables de laboratoire avec l'ensemble des composants du chantier sont indispensables

L'incorporation de colorants en poudre se fait dans le malaxeur par dosage en vrac ou par sacs prépesés fusibles, un pré-malaxage à sec est généralement effectué. L'intensité et la régularité de coloration finale seront d'autant plus réussies que la distribution du pigment dans le mélange sera homogène. Aussi, certains procédés consistent à réaliser préalablement une solution mère de bitume et de pigment ou à préparer une pâte (colorants et huiles compatible avec le liant), autorisant une dispersion plus homogène dans le mélange.

4.3- Quelques notions de prix [41]

Les enrobés colorés sont beaucoup plus chers que les enrobés traditionnels, car ils font appel à des constituants spécifiques particulièrement coûteux. Ils nécessitent des attentions particulières lors des études de formulation (adaptation de la couleur sans modification des autres performances), et lors de leur fabrication et de leur mise en œuvre (stockage séparé des liants spéciaux, temps de malaxage plus long, nettoyage complet des équipements). De plus, ils concernent généralement d'assez faibles quantités produites, d'où des difficultés pour amortir ces postes fixes.

Comme ordre de grandeur, on peut retenir que par rapport à un enrobé noir conventionnel de même épaisseur, le prix d'un enrobé rouge traditionnel avec un bitume pigmentable est deux fois plus élevé, alors que pour un enrobé de couleur avec un bitume de synthèse et des colorants variés, la fourchette de prix s'étend dans un rapport de 4 à 6.

Le bitume de synthèse, issu de la chimie du pétrole est de 10 à 12 fois plus cher qu'un bitume pur de distillation directe, mais il présente aussi des propriétés supérieures, car il est généralement modifié par l'incorporation de polymères.

Les colorants d'origine minérale sélectionnés sont des produits extrêmement chers. Leur coût s'exprime en kilogramme, alors qu'en technique routière, grande consommatrice de matériaux (bon marché), on raisonne généralement en tonnes.

A titre indicatif, les ordres de grandeur de prix des colorants sont, selon les oxydes, et pour une qualité routière moyenne :

- 1 à 1.3 €/kg pour l'oxyde de fer, rouge brun
- 1.5 à 2 €/kg pour le chromate de plomb ; jaune.
- 2 à 2.5 €/kg pour l'oxyde de titane ; blanc.
- 3 à 4 €/kg pour l'aluminate de cobalt ; bleu.
- 4.5 à 6 €/kg pour l'oxyde chrome ; vert.

A ces prix viennent souvent s'ajouter les suppléments de transport des granulats de couleur adaptée, que l'on ne trouve pas nécessairement à proximité des chantiers. Ceci est bien entendu très différent des cas courants d'enrobés classiques noirs.

4.4- Techniques bitumineuses pour couches de roulement [41]

4.4.1- Enduits superficiels d'usure (ESU)

Les ESU sont réalisés en place et constitués de couches de liants et granulats répandues successivement, la formule d'un ESU est définie par sa structure, la nature et le dosage des constituants.

Pour les applications en revêtements colorés, la structure la plus utilisée est le monocouche simple gravillonnage : une couche de liant, généralement à chaud appliquée à la répanduse et une couche de gravillons, généralement de fine granularité : 4/6 ou 6/10 mm, choisis pour leur teinte.

La coloration est due essentiellement à la couleur des gravillons, de façon encore plus marquée que pour les autres revêtements bitumineux, car les gravillons recouvrent en totalité la couche de liant, assurant la rugosité de surface et par conséquent une bonne drainabilité et une adhérence de la chaussée. L'importance du choix de la couleur des granulats est par conséquent primordiale.

La teinte de liant n'ayant que peu d'influence sur la couleur finale, dans la majorité des cas ce sont des bitumes à chaud ou à froid classiques (bitume pur, voir modifié par des polymères) qui sont utilisés. Et ce, d'autant plus que cette technique bon marché, ne justifierait pas le recours à des liants de synthèse, par ailleurs assez coûteux, et nécessitant l'usage de matériels spécifiques (pompe doseuse spéciale et nettoyage des matériels). La pigmentation du liant ne sera utile que pour soutenir la teinte des gravillons, et éviter le noircissement dans les bandes de roulement, sur chaussée à trafic lourd ou canalisé, et en zones fortement sollicitées. Mais dans ces cas, on s'oriente généralement vers d'autres revêtements que les ESU. L'emploi de liants, de synthèse est donc réservé à des applications très spécifiques, lorsque l'on souhaite, dès l'origine, une couleur uniforme sans altération par des gravillons ayant pu rouler dans le liant, et par conséquent, tachés par la coloration de ce liant.

Les ESU colorés restent principalement des ESU traditionnels, où la couleur est apportée par les granulats. Les teintes les plus courantes sont donc le rouge plus ou moins sombre, le gris et le ton pierre. L'adhésivité du couple liant-granat est généralement à vérifier en laboratoire par des essais de type « plaque vialit », pour s'assurer qu'il n'y aura pas d'évaluation par arrachement dans le temps ou sous trafic, par suite d'une moindre adhésivité de certains granulats colorés. Des dopes d'adhésivité, pulvérisés à l'interface lors du répandage des gravillons sur la couche de liant, sont donc parfois nécessaires

4.4.2- Enrobés coulés à froid ou coulis bitumineux

Ce sont des mélanges de granulats, d'une émulsion de bitume, d'eau et d'additifs (dope d'adhésivité, mais aussi fibre, ciment) visant à réguler la rupture de l'émulsion (accélérer ou retarder la rupture, éviter les coulures) en fonction des conditions climatiques durant l'application. Ils sont fabriqués et mis en œuvre à froid au moyen d'une machine spécifique. Celle-ci est dotée des équipements de stockage des constituants, de dosage, malaxage et répannage dans un traîneau aux largeurs désirées. Il n'y a pas de couche d'accrochage au support, l'émulsion en léger excès dans le mélange assure cette fonction. Après répannage, l'ECF ou le coulis bitumineux ne nécessitent généralement pas de compactage, la remise en circulation s'effectuant après la rupture complète de l'émulsion, soit après la demi-heure qui suit l'application. Le compactage au moyen d'un compacteur à pneus est toutefois recommandé sur les surfaces peu ou pas circulées.

C'est la granularité qui différencie le coulis bitumineux (D inférieur à 6,3mm), de l'ECF (D supérieur ou égale à 6,3mm). En raison de leur faible rugosité et de leur adhérence très réduite, les coulis 0/4 sont réservés aux zones non, ou très peu circulées.

La granularité des ECF colorés est généralement un 0/6 appliqué en monocouche au dosage moyen de 12 à 14 kg/m². De part les difficultés de gérer la rupture des émulsions, de la baisse de cohésion du mélange avec certains colorants et liants spéciaux, et pour des aspects économiques (comme pour les ESU) les ECF ou coulis les plus répandus sont de couleur rouge et composés d'un mélange de granulats rouges, d'oxyde ferrique et d'émulsion de bitume pur traditionnel. Des applications d'ECF avec liant de synthèse et colorants peuvent être intéressantes lorsqu'il s'agit de linéaires importants, comme des bandes cyclables ou des couloirs spécifiques par exemple. En effet, leur faible épaisseur ne nécessite pas de travaux d'accompagnement de remise à niveau, comme avec les enrobés par exemple. Des études spécifiques sont à entreprendre pour s'assurer d'une bonne résistance mécanique de l'ECF coloré.

4.4.3- Enrobés colorés

Les revêtements en enrobés sont constitués par un mélange d'un squelette minéral et d'un liant bitumineux ; ils sont fabriqués et mis en œuvre à chaud (température voisines de 150°C). Pour chaque catégorie normalisée, les épaisseurs d'application sont liées à la granularité (courbe granulométrique continue ou discontinue) et à la dimension maximale des gravillons D. pour les revêtements colorés, du fait des surcoûts, seuls les enrobés de faible épaisseur sont retenus : épaisseur inférieure à 5 cm, d'où l'importance d'un bon collage au support par une couche d'accrochage dont la nature et le dosage doivent être adaptés au support et aux types de sollicitations. Ainsi, il est parfois nécessaire d'utiliser des émulsions de bitume de synthèse claires, pour assurer le collage de revêtements en très faible épaisseur (2 à 3cm) sur des zones recevant du trafic lourd et pour éviter des remontées de liant noir de cette couche d'accrochage traditionnelle dans le passage des roues.

Les enrobés colorés sont soit :

- des bétons bitumineux minces (BBM), de 3 à 4cm d'épaisseur, de dimension maximale 10mm ou mieux 6mm, de granularité généralement discontinue comportant environ 25 à 30% de sable.
- soit de bétons bitumineux très minces (BBTM), de 2 à 2.5cm d'épaisseur, généralement de dimension maximale 6mm, de granularité discontinue 2/4, ne comportant que 20 à 25% de sable. Ces BBTM sont réglementés par la norme expérimentale P98-137 de mai 2201, définissant deux classes de BBTM selon leur proportion de vides. Pour les applications colorées, la classe 1, comportant moins de vides est généralement préférée.

Les formulations d'enrobés colorés sont généralement de composition plutôt sableuse et de dimension maximale réduite : 6mm, plus rarement 10mm, offrant un aspect de surface un peu

plus fermé (rugosité moyenne traduite par une hauteur de sable $HS < 1\text{mm}$), d'où une plus grande homogénéité de la teinte et une meilleure réflexion de la lumière.

4.4.4- Asphaltes colorés

Les revêtements en asphalte sont composés d'un mélange d'un squelette minéral à base de granulats concassés et riches en fines (22 à 30%) et d'un liant bitumineux fortement dosé (6,5 à 8,5% soit de 1 à 2,5% (en valeur absolue) de plus que pour les enrobés). dans le cas des asphaltes colorés ce liant est souvent un bitume pigmentable pour les revêtement de coloration rouge et d'un bitume de synthèse pour les autres couleurs. Le malaxage s'effectue entre 220 et 250°C, le mélange est conservé par brassage dans des pétrins jusqu'à son application par coulage, puis lissage et surfacage. Il ne nécessite pas de compactage et permet la réalisation de couche étanche. C'est un exclusivement urbain, facile d'emploi dans le contexte délicat des travaux en villes (petites surfaces, difficiles d'accès, nombreuses réparations...).

Un traitement de surface, par bouchardage, gravillonnage ou impression de motifs, assure une rugosité suffisante pour les asphaltes en chaussées. La coloration est obtenue dans la masse, par des liants clairs spéciaux et des colorants. Toutefois, sur les zones non circulées, la surface lisse de l'asphalte se prête bien à la coloration par des peintures ou des enduits de résines colorés.

Une autre technique a été utilisée avec l'asphalte coloré et qui a donnée des bons résultats de point de vue esthétique et propriétés visuelles et photométriques c'est l'asphalte avec microbille de verre. L'accrochage de microbilles de verres à la surface d'asphaltes colores élargit les propriétés de l'asphalte dans le domaine de la réflexion de la lumière, sans augmenter les risques de glissance.

Devant un grand nombre de petits éléments de miroirs disposés au sol et dont la position est aléatoire, pour une position donnée de l'observateur et de la source, quelques éléments s'illuminent et frappent l'œil de l'observateur qui, ainsi, voit quelques points lumineux sur le sol. [43]

Dés que l'observateur se déplace, ces quelques points lumineux s'éteignent et d'autres points, auparavant éteints, s'allument. En d'autres termes, dès que quelque chose se déplace, soit la source lumineuse (phare, par exemple), soit le plus souvent l'observateur (piéton qui marche, cycliste ou automobiliste qui circule) ce dernier voit à chaque instant des points s'allumer au sol et d'autres s'éteindre. L'effet, très agréablement surprenant, est une sorte de crépitement d'étoiles, car c'est bien de scintillements qu'il s'agit. L'impression d'animation du sol est réelle et on dirait qu'il vit.

Le procédé consiste à répandre sur l'asphalte encore chaud après sa mise en œuvre, des microbilles de verre. Ces microbilles, de dimensions généralement comprises entre 100 et 600 μm , sont saupoudrées à refus –soit environ 1kg/m^2 - et l'excès est enlevé par balayage après refroidissement total de l'asphalte, généralement le lendemain du chantier

Le répandage des billes de verre est exécuté par un personnel spécialisé qui doit apprécier le moment opportun ou l'asphalte est suffisamment refroidi pour que les microbilles ne s'enfoncent pas dans le revêtement et se tachent de l'asphalte, et ou il est encore assez chaud pour que les billes adhèrent à la surface de façon homogène.

Ces asphaltes colorés avec microbilles sont réservés le plus souvent à des surfaces piétonnes comme par exemple trottoirs, allées, flot, parvis ou esplanades.

4.5- Domaine d'emploi des différentes techniques et restrictions d'usage [41]

4.5.1- Choix des revêtements colorés

L'usage de revêtements bitumineux colorés concerne trois grands domaines : la ville intra muros ; les tunnels et l'aménagement sur place de routes en rase campagne. Les objectifs recherchés, selon ces différents espaces, sont les suivants :

- en ville, dans le but :
 - ◆ d'améliorer le cadre de vie par une mise en valeur du patrimoine, en retenant des couleurs de revêtements en harmonie avec le bâti (aménagement de trottoirs, esplanades,...).
 - ◆ De créer des ambiances visuelles en partageant les espaces multifonctionnels (places, aires de jeux,...)
 - ◆ De réaliser des avertisseurs visuels permettant :
 - de renforcer la signalisation (en entrée de ville, à proximité de zone sensible,...)
 - de personnaliser les voies de circulation (couloir bus, piste cyclable,...), de différencier les différents espaces (zone de stationnement),
 - de baliser des cheminements (voie piétonne)
 - de fixer l'attention sur des points singuliers (tourne à gauche, îlot,...), et donc d'une manière générale d'améliorer la sécurité des différents usagers par de meilleurs lecture et compréhension des différents espaces partagés.
- Dans les tunnels, dans le but :
 - ◆ d'améliorer la sécurité par :
 - réduction de l'effet de trou noir en entrée de tunnel,
 - amélioration des contrastes, et, par conséquent, de la perception des obstacles,
 - amélioration du ressenti de confort dans un espace fermé, et réduction du sentiment de claustrophobie.

- ◆ De réduire l'énergie lumineuse installée pour un même niveau de luminance, et donc réduire les dépenses d'éclairage (jusqu'à 30% d'énergie)
 - en rase campagne, pour l'aménagement de voies différenciées, notamment les bandes cyclables.

Des études spécifiques, pour chaque cas considéré, doivent être menées au préalable par une équipe pluridisciplinaire (architecte, éclairagiste, ingénieur, psychologue,...) pour évaluer l'intérêt technologique et les retombées en matière de sécurité, de l'emploi de ces revêtements colorés.

4.5.2- Restrictions d'usage

Pour des raisons évidentes de difficultés à maintenir durablement une couleur optimale et suffisamment uniforme (qualité principale attendue), l'emploi des revêtements colorés est fortement déconseillé dans les cas suivants :

- réparation fréquente due à la présence de réseaux enterrés.
- zones fortement circulées ou des sollicitations tangentielles entraîneront des dépôts de gomme,
- zones situées à proximité de lieux de pollution ou de risques importants de salissures (marchés, stationnement ou les véhicules sont susceptibles de perdre de l'huile).
- zones ne pouvant pas être nettoyées régulièrement.

Par ailleurs, des contraintes particulières de fabrication et de mise en œuvre, nécessiteront des précautions spéciales comme :

- le stockage indépendant des bitumes pigmentables et de synthèse, avec une unité de dosage adaptée pour ce liant et le colorant,
- le nettoyage complet et très soigné de tous les équipements de fabrication, transport, et mise en œuvre (finisseur et compacteurs).
- le recours à des émulsions de bitume de synthèse en couche d'accrochage pour des enrobés minces, impose les mêmes contraintes de stockage, dosage, propreté, que pour la répandues de liant,
- une attention toute particulière du personnel d'exécution pour éviter toute pollution par des reliquats de matériaux bitumineux noirs traditionnels.

Ces dispositions peuvent entraîner un accroissement des délais, qu'une planification efficace des travaux pourra atténuer, et ce d'autant qu'il sera alors possible de regrouper la réalisation de plusieurs chantiers en revêtements colorés. Une baisse de prix par rapport aux volumes pourra être envisagée.

4.5.3- Choix des différentes techniques bitumineuses colorées

Sur le plan technique, le choix des différents matériaux colorés pour couche de roulement reste identique à celui de leur famille d'origine. Les critères de choix s'appuient sur les principaux avantages et inconvénients des revêtements bitumineux colorés. Ils sont récapitulés au tableau ci-dessous. L'intérêt de ces techniques bitumineuses par rapport aux autres matériaux colorés, que sont, d'une part, les matériaux modulaires (pavages, dallage en pierres) et, d'autre part, les bétons de ciments désactivés, sont la rapidité de mise en œuvre sur des surfaces variées, et une remise en service immédiatement après refroidissement, pour des coûts voisins ou inférieurs. De plus, les techniques bitumineuses s'adaptent aisément aux différents supports. Elles sont par ailleurs, bien répandues et bien maîtrisées par l'ensemble des entreprises de travaux public.

Tableau (4-3) : aide aux choix des techniques par un bilan comparatif : avantages et inconvénients « guide CERTU » [41]

technique	Avantages	inconvénients
Enduits	<ul style="list-style-type: none"> -prix peu élevé -couleur dépend essentiellement des granulats -bonne rugosité -réparabilité correcte -imperméabilité du support déformable -épaisseur < 1.5cm 	<ul style="list-style-type: none"> - bruyants, n'améliorent l'uni - support homogène et non indentable nécessaire -risque de rejets -période de réalisation restreinte -marquage difficile
Asphalte	<ul style="list-style-type: none"> -mise en œuvre manuelle - réparabilité facile, mais teinte modifiée -bien adapté à des usage urbains 	<ul style="list-style-type: none"> -surcoût important pour coloration autre que le rouge - sensibilité au poinçonnement et à l'orniérage - support rigide et non déformé nécessaire
Bétons bitumineux minces ou très minces	<ul style="list-style-type: none"> -technique courante -plusieurs épaisseurs et qualités possibles -excellente drainabilité et adhérence -amélioration acoustique avec les fines granularités 0/6 	<ul style="list-style-type: none"> - surcoût important pour coloration autre que le rouge -pas d'amélioration de l'uni en faible épaisseur - couleur des gravillons à assortir à celle du bitume
Coulis et enrobés coulés à froid	<ul style="list-style-type: none"> - mise en œuvre facile - bien adaptés à des usages urbains - imperméabilité améliorée - couleur des gravillons prépondérante 	<ul style="list-style-type: none"> - surcoût important pour coloration autre que le rouge - sensibilité au lissage sous trafic <i>-colorants peuvent modifier la rupture et créer des problèmes de cohésion au jeune âge, période de réalisation restreinte</i>

4.6- Propriétés particulières

4.6.1- protection thermique [41]

Une expérimentation réalisée par LCPC sur le Boulevard périphérique de Paris (100000 poids lourds par jours), pour évaluer la réduction de la température en surface de chaussée, apportée par l'emploi de granulats clairs (quartzite beige, utilisé depuis quelque années pour réduire la sensibilité à l'orniérage) avec ou sans liant clair (bitume de synthèse avec 1% d'oxyde de titane). L'enrobé utilisé est un BBM 0/14 de 3 cm, posé sur un enrobé à module élevé de 9cm (présentant une excellente résistance à l'orniérage). Les mesures de température en surface (-1cm) et en profondeur à (-6cm), lors de l'été (condition de mesure : 3heures d'ensoleillement et température ambiante de 34°C), ont montré une baisse significative des températures de 5 °C pour l'enrobé avec liant de synthèse et granulats clairs et 2°C avec seulement des granulats clairs.

Le comportement dans le temps s'est avéré très satisfaisant, l'évolution de la texture de surface a été modérée (HS passant de 1,3mm à 0,8mm après 3 ans) et l'orniérage a été maîtrisé (pas de déformation significative de l'enrobé clair). Le revêtement conserve sa teinte claire, et ne comporte aucun désordre particulier. Ses propriétés de surface sont satisfaisantes. Cette expérimentation confirme que les revêtements bitumineux clairs absorbent moins la chaleur et, par conséquent, ils contribuent à une meilleure résistance à l'orniérage, sachant que ce phénomène se déclenche au-delà d'un seuil de température, et que si l'on reste en dessous de cette limite, il n'y a plus de déformations permanentes.

De même, l'enrobé clair peut être utilisé comme masque d'étanchéité dans les barrages dans le but de réduire durablement le fluage de cette étanchéité bitumineuse, sur une forte pente exposée à l'ensoleillement important.

4.6.2- Perception de nuit [32], [38], [40], [41]

De nuit, la vision des couleurs se trouve en partie dégradée du fait des conditions particulières d'observation sous éclairage artificiel ou la vision mésopique (ou crépusculaire) ne fait intervenir que les bâtonnets, cellules peu sensibles à la couleur. Afin de couvrir l'ensemble des situations susceptibles de se produire dans le domaine de l'aménagement de la voirie urbaine, une étude théorique par un modèle de vision a été conduite au LCPC. La sélection d'un large panel d'échantillons de surfaces colorées et d'une série de conditions d'illumination représentatives de l'éclairage urbain ont permis d'évaluer la modification de la perception des couleurs la nuit par rapport aux conditions d'observation diurnes comme références.

Les résultats de cette étude ont démontré que bien que les couleurs apparaissent sombres et pour certaines d'entre elles désaturées, l'utilisateur est capable de percevoir, de nuit sous éclairage public de qualité (niveau uniformité de luminance suffisants), la tonalité d'un grand nombre de surfaces colorées. Si globalement on constate que les surfaces bleues et vertes sont les mieux perçues et que les surfaces violettes, rouges et pourpres sont mal perçues, le rendu des surfaces jaunes et orangées est fortement influencé par les caractéristiques spectrales des sources lumineuses. Ainsi, face à la diversité des situations, un soin particulier au choix des sources d'éclairage en fonction de la couleur du revêtement de chaussée doit être apporté en tenant compte des premiers résultats de cette étude théorique pour parvenir à une bonne perception nocturne des couleurs.

4.6.3- Propriétés photométriques et évolutions- économie [26]

Les quelques mesures réalisées sur des carottes d'enrobés colorés par liant de synthèse et granulats clairs, avec ou sans traitement de surfaces par grenailage, semblent montrer des propriétés photométriques intéressantes. Le coefficient de clarté Q_0 qui traduit la proportion d'énergie lumineuse réfléchi par le matériau est voisin de 0.12 conduisant à une bonne restitution lumineuse, et un gain possible en terme d'éclairage de 30 à 40%. Toutefois le revêtement s'avère quelque peu spéculaire (léger effet de miroir)-le coefficient de spécularité traduit le caractère spéculaire du revêtement; il correspond à la proportion d'énergie lumineuse réfléchi dans une direction privilégiée. Il convient donc d'en tenir compte dans les dispositions d'éclairage, pour parvenir à une bonne uniformité de luminance. L'aspect brillant du revêtement au jeune âge est souvent observé. Dans le temps, cette caractéristique de spécularité s'améliore, le revêtement devient alors plus diffusant, mais le coefficient de clarté diminue légèrement du fait des salissures et de l'assombrissement de la teinte. Il n'est pas possible de donner des indications précises sur les propriétés photométriques, car celles-ci sont assez variables et dépendent beaucoup de la formulation, des conditions d'application et de service du revêtement. A titre indicatif on donne des résultats de mesure obtenus sur des

carottes prélevées au jeune âge dans un tunnel. Ces résultats sont représentés dans le tableau (4-4)

Tableau (4-4) : caractéristiques de surface sur carottes de revêtements clairs [29]

BBTM 0/10 clairs	Age	3 mois	6 mois	12 mois
Rugosité : HS en mm		1.5	1.2	1.2
Coefficient de clarté Q0		0.130	0.125	0.117
Coefficient de spécularité S1		1.34	1.11	0.82

Il est reconnu que, quelque soit le type d'installation d'éclairage, les chaussées claires induisent une économie d'éclairage. Cependant, cette économie doit être mise en balance avec le surcoût du revêtement coloré. D'où la nécessité, pour des ouvrages en tunnels, d'études technico-économiques selon ce surcoût et le niveau d'éclairage nécessaire propre aux conditions lumineuses en entrée de tunnel et à la vitesse des usagers. On gardera aussi en mémoire, que ce revêtement a généralement une durée de vie plus élevée qu'une chaussée traditionnelle, et qu'il représente un faible pourcentage du coût des travaux d'un tunnel.

4.6.4- Amélioration de la sécurité [26]

En France un suivi des accidents a été réalisé, sur l'A8 (25000 véhicules/jours dont 15 % lourds) du contournement de Nice où 3 tunnels ont été aménagés avec des revêtements clairs et des équipements dynamiques de sécurité. Le suivi semble montrer une amélioration sur le plan de la sécurité avec une diminution des taux et de la gravité des accidents. L'amélioration la plus perceptible est la quasi disparition des accidents en entrée de tunnel, qui semble due à l'effet combiné d'enrobés clairs qui améliorent la visibilité de l'ouvrage et de la gravité des accidents.

L'utilisation d'un revêtement clair à base de bitume de synthèse et d'oxyde de titane en tunnel offre une bonne perception des contrastes et de l'environnement. Les enrobés clairs ou éclaircis en entrées de tunnel sur les 200 premiers mètres auraient une action favorable sur la réduction de l'effet de trou noir perçu par l'utilisateur lorsqu'il pénètre dans le tunnel.

4.6.5- Comportement dans le temps des revêtements colorés [41]

Le tableau (4-5) extrait du guide du CERTU donne une estimation de la durée moyenne de service possible pour chaque famille de revêtements, en fonction du trafic journalier à la mise en service. Ceci pour des matériaux dont les qualités respectent les prescriptions des normes et dont l'application a été effectuée suivant les règles de l'art. Cette estimation globalise la pérennité mécanique des matériaux, la conservation des caractéristiques de surface suffisantes et le maintien de la coloration.

D'une manière générale, le comportement mécanique des revêtements colorés reste identique aux revêtements dont ils sont issus, avec la couleur en plus. Ils offrent donc les mêmes caractéristiques de surface, si l'on a pris le soin de respecter les règles de l'art concernant, notamment le respect des épaisseurs et des modalités de compactage.

Au jeune âge (dans les 2 à 3 ans), sous l'effet d'une oxydation superficielle au contact de l'air et sous l'action des UV, et par suite de salissures diverses, les revêtements colorés ont tendance à s'éclaircir : la teinte devient un peu plus terne, la brillance s'estompe. Par la suite, il semble que la teinte se stabilise et l'aspect d'ensemble conserve une bonne uniformité. Il existe des revêtements bitumineux de teinte claire : beige, ocre ou vert qui offrent un très bel aspect général, sans entretien particulier.

Tableau (4-5) : Estimation des durées de service en années des revêtements colorés (CERTU 1997) [41]

trafic	faible	moyen	élevé	Très élevé
voies	Rue de desserte voie de distribution locale	Rue à trafic principal voie de distribution principale	Voie principale desserte ZI voie T.C. très fréquentée	Voie rapide urbaine
Estimation de trafic lourd (supérieur à 3.5t/essieu)				
camions/j/sens matériau	0 à 150	150 à 300	300 à 750	750 à 1000
Asphaltes coulés	>20	10 à 20	10 à 15	5 à 10
Bétons bitumineux	>15	10 à 15	10 à 12	
Coulis	>10	5 à 10	Non recommandé	Non recommandé
Enrobés coulés à froid	>10	10 à 15	8 à 10	3 à 6
Enduits superficiels	>10	5 à 10	4 à 6	Non recommandé

4.7- Code des couleurs

Les revêtements colorés sont de plus en plus employés en milieu urbain dans les pays européens. En France, Afin de limiter les effets néfastes que pourrait entraîner une utilisation excessive de la couleur sur la chaussée, la circulaire interministérielle du 15 mai 1996 précise ses domaines d'emploi et propose un code des couleurs appropriée aux principaux usages. Le tableau (1-6) représente les principales recommandations interministérielles pour l'utilisation de la couleur sur chaussée

Tableau (4-6) : Couleur sur chaussée : recommandations interministérielles du 15 mai 1996 (France) [18]

Rappel		DOMAINE D'EMPLOIS POSSIBLES (rase campagne et agglomération)				
Signalisation Par marquage Des chaussées	ALERTE	Affectation de l'espace			Valorisation De l'espace (place traversante, aire piétonne,...)	
		Espaces non circulés, sauf à titre exceptionnel (filot, terre- plein central, bande centrale neutralisée, accotement,...)	Usage réservé aux cycles	Usages réservés hors cycles (transport en commun,...)		
Modalité D'application	Réglementaire	Selon l'objectif de l'aménagement				
Couleurs Quels que soient la technique et les matériaux utilisés (coloration en surface ou dans la masse)	Couleurs réglementaires	Toutes couleurs hormis le « rouge vif » et tous les verts	Gamme de couleurs atténuées (tons clairs ou sombres) -Rose, brun, brique,... -sable, ocre.... -Bleu,... -Gris,...	VERT	Gamme de couleurs atténuées (tons clairs ou sombres) -rose, brun, brique,... -sable, ocre,... -bleu,... -Gris,...	Gammes de Atténuées (tons clairs ou sombres) - rose, brun , brique -sable, ocre. -Bleu,... -Gris,...

4.8- Conclusion

Afin de garantir une bonne durabilité technique et esthétique, les tendances observées pour les revêtements colorés sont à l'emploi de couleurs naturelles données directement par la teinte des granulats et à l'usage de liant clair souvent sans colorant. L'aménagement de voies piétonnes, de places et d'esplanades, de trottoirs et de pistes cyclable se fait avec des enrobés très minces. Les enrobés rouges bruns restent les plus employés du fait de leur faible coût (emploi de bitume généralement classique). La dissociation des voies et des aménagements de zone à faible circulation peut être réalisée de façon économique par des ESU de granulats colorés. De même, les ECF rouge bruns sont fréquents en zone de stationnement ou voie spécialisée. Les revêtements bitumineux colorés peuvent constituer un outil intéressant d'aménagement de la voirie, mais des travaux restent à faire sur le sujet, tant au niveau des fabricants des produits pour maintenir durablement les propriétés photométriques et colorimétriques.

Partie expérimentale

La partie expérimentale comporte trois chapitres et qui sont :

- Caractéristiques des constituants et composition du mélange
- Les enrobés colorés à froid.
- Les enrobés colorés à chaud

chapitre 1

caractéristiques des constituants et composition du Mélange

1.1 – Introduction

L'étude expérimentale comporte :

- Une analyse des matériaux au laboratoire,
- Une formulation d'enrobés,
- Des résultats des performances mécaniques du béton bitumineux.

1.2- Etude de laboratoire

L'étude de laboratoire s'est articulée sur les paramètres suivants :

- Identifications des constituants (granulats, émulsion et bitume),
- Formulation de l'enrobé bitumineux,
- Détermination des performances mécaniques de l'enrobé formulé

1.2.1 Provenance des matériaux

- 1 - Les agrégats proviennent de la carrière de BOUABRA située dans la wilaya de BEJAIA,
- 2 - l'émulsion de bitume provient de l'usine d'émulsion de DBA – Chebli-
- 3 - le bitume importé provient de l'usine d'émulsion DBA-Chebli

1.2.2 - Caractéristiques des constituants

1.2.2.1 - Identification des granulats

Analyse chimique sommaire

L'analyse chimique sommaire effectuée sur les granulats a donné les résultats suivants:

Tableau (1.1) : Analyse chimique sommaire

Echant	Granulats
%CaCo3	80
%CaSo4	Néant
%NaCl	Traces
%Insolubles	9.22
%Matières organiques	Néant
%Perte au Feu	40.28
%Eau Constitution	4.9

Cette analyse chimique montre qu'on est en présence d'un calcaire sans matières organiques.

Analyse granulométrique par tamisage (P 18- 560)

L'essai consiste à fractionner des granulats au moyen d'une série de tamis .La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à 0.2D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

Mode opératoire

- ◆ Laver les granulats au tamis de 0.08mm et les sécher à l'étuve jusqu'à masse constante.
- ◆ Placer la série des tamis par ordre décroissant, et verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis.
- ◆ Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne.
- ◆ Peser le refus de chaque tamis.

Essai Los Angeles (P 18-573)

Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.

Mode opératoire

- ◆ Laver le matériau tamisé (4-6,3 pour 3/8, 10-40 pour 8/15).
- ◆ La masse de l'échantillon pour essai sera de 5000g.
- ◆ Introduire dans le tambour la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie (7 boulets pour 4-6.3, et 11 boulets pour 10-14).
- ◆ Faire effectuer à la machine 500 rotations (15 min).
- ◆ Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- ◆ Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6mm.
- ◆ Laver le refus au tamis de 1.6mm, égoutter et sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- ◆ Peser ce refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée.

Essai Micro-Deval (P 18-572)

L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des classes granulaires type.

Mode opératoire

- ◆ Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à une température constante de 105°C constante c'est – à – dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure ne diffèrent pas de plus de 0.1%.
- ◆ Tamiser à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie (4-6.3 pour 3/8 et 10-14 pour 8/15).
- ◆ La masse de l'échantillon pour essai est de 500g pour 4-14.
- ◆ Introduire dans le cylindre d'essai la charge abrasive (2000g pour 3/8 et 5000g pour 8/15).
- ◆ Ajouter 2.5l d'eau.
- ◆ Mettre le cylindre en rotation à une vitesse de 100tr/min pendant 2h.

- ◆ Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat.
- ◆ Tamiser le matériau dans le bac sur le tamis de 1.6mm sous un jet d'eau.
- ◆ Sécher le refus à 1.6mm à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- ◆ Peser ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.

Coefficient d'aplatissement (P 18-561)

La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0.2D$, avec M exprimée en kilogramme et D , plus grande dimension spécifiée exprimée en millimètres.

Mode opératoire

- ◆ Tamiser l'échantillon par voie sèche, sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme P 187-560.
- ◆ recueillir les différentes fractions d/D ; peser chaque classe granulaire avec une précision relative de 0.1%.
- ◆ tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement est défini par le tableau de correspondance.
- ◆ Peser avec une précision relative de 0.1% le passant sur la grille correspondant à chaque classe granulaire d/D .

- M_c : masse de chaque classe granulaire d/D en grammes.

- $M = \sum M_c$

- M_e : masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante.

Equivalent de sable (P18-598)

Mode opératoire

- ◆ Verser jusqu'au trait repère inférieur la solution lavante dans l'éprouvette cylindrique.
- ◆ Peser 120g de matériau.
- ◆ Verser soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement les 120g de matériau.
- ◆ Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déployer les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- ◆ Laisser reposer dix minutes.
- ◆ Après dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.
- ◆ Faire subir à l'éprouvette 90 cycle en 30s.
- ◆ Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.
- ◆ En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, puis enfoncer le tube jusqu'à fond de l'éprouvette.
- ◆ L'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur, arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.
- ◆ Laisser reposer pendant 20 min.
- ◆ Au bout de ces 20 min mesurer à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette.

- ◆ Mesurer également la hauteur h'_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

Détermination de la propreté superficielle (P18-591)

L'essai a pour but la détermination de la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2 mm.

Mode opératoire

- ◆ La masse de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0.2D$, avec M exprimée en kilogramme et D en millimètres.

- ◆ Peser deux échantillons M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour essai et M_h pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à 0.5mm ou 1.6mm pour le ballast.

- ◆ Sécher le premier échantillon M_{1h} à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

- ◆ Le peser, soit M_{1s} sa masse sèche.

- ◆ La masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

Pour la détermination de la masse des éléments inférieurs à 0.5mm, l'essai doit être effectué à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant l'essai

- ◆ Tamiser sous eau l'échantillon M_h sur le tamis de 0.5mm ou 1.6mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.

- ◆ Récupérer le refus et le sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Le tamiser à nouveau sur le tamis de 0.5mm ou 1.6mm pendant une minute et le peser, soit m' sa masse sèche

- ◆ La masse sèche m des échantillons inférieurs à 0.5mm ou 1.6mm est égale à :

$$m = M_s - m'$$

Coefficient de friabilité des sables (NFP 18-576)

Les éléments fins du sable, inférieurs à 0.1mm, ne sont pas étudiés, le sable est écarté à 2mm.

Mode opératoire

- ◆ Tamiser par voie humide les 2 kg de matériau sur les tamis 0.1 et 2mm.

- ◆ Sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

- ◆ Homogénéiser et peser l'échantillon pour essai de 500g.

- ◆ Prendre 9 billes de 30mm de diamètre, dont la masse doit être de 975g, et 21 billes de 18mm de diamètre dont la masse doit être de 490g.

- ◆ Compléter avec des billes de 10mm diamètre, de façon que la masse totale de la charge soit de 2500g.

- ◆ Introduire la charge et les 500g puis ajouter 2.5 litres d'eau dans le cylindre d'essai, mettre le couvercle ;

- ◆ Mettre le cylindre en rotation à la vitesse de 100tr/min pendant 1500 tours ou 15 min.

- ◆ Recueillir l'ensemble dans un bac, en évitant toutes les pertes. Laver soigneusement l'intérieur du cylindre et recueillir la charge à l'aide d'un aiment

- ◆ Laver sur un tamis de 0.05mm sous un jet d'eau jusqu'à eau claire.

- ◆ Sécher l'échantillon à l'étuve jusqu'à masse constante, puis tamiser à sec sur un tamis de 0.05mm.

- ◆ Peser au gramme près le refus, soit m' cette masse.

Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés par le tableau (1.2) et illustrés par la figure (1.1)

Tableau (1.2): Analyse granulométrique

tamis	Passant % (0/3)	Passant%(3/8)	Passant%(8/15)
0	100	100	100
16	100	100	96
14	100	100	75
12.5	100	100	59
10	100	100	24
8	100	92	5
6.3	100	70	1
5	100	45	
4	100	24	
3.15	98	9	
2.5	90	4	
2	80	2	
1.6	72	2	
1	54	1	
0.63	40		
0.5	35		
0.4	31		
0.315	28		
0.25	26		
0.2	23		
0.16	21		
0.1	18		
0.08	16		

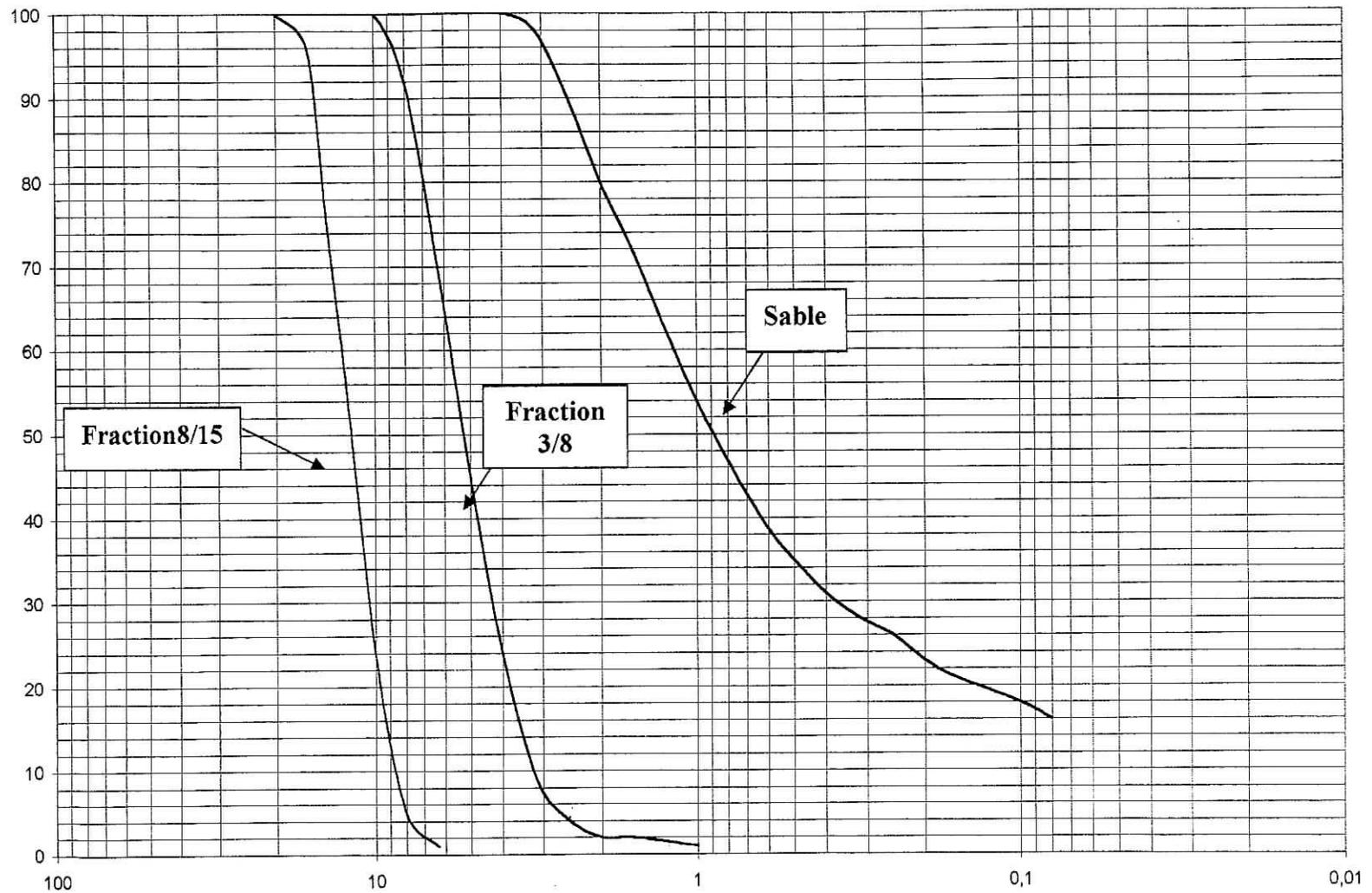


Fig. (1.1) : courbes granulométriques des fractions 8/15, 3/8, sable

Interprétation des résultats

Tableau (1.3) : caractéristiques des granulats de la carrière de BOUABRA

Fraction (d/D)	LA%	MDE%	A	propreté	Absorption (%)	E.S	F.S	Poids spécifique
0/3	-	-	-	-	-	60.3	27	2.67
3/8	26.15	14.3	22.9	3.2	1.84	-	-	2.69
8/15	22.63	15.7	18.5	0.52	-	-	-	2.73
Spécifications (catégorie CII)	≤30	≤25	≤20	≤2	-	≥60	≤40	-

Les résultats des essais d'identification effectués sur les granulats ont montré ce qui suit :

- Les coefficients LOS ANGELES sont conformes aux spécifications, ce qui révèle une Bonne résistance aux chocs.
- Les coefficients MICRO-DEVAL en présence d'eau ont révélé de bonnes résistances à l'attrition.
- La propreté superficielle des gravillons est conforme aux spécifications pour le 8/15.
- Les courbes granulométriques des fractions granulaires s'inscrivent parfaitement dans leurs fuseaux de référence.
- L'équivalent de sable est conforme aux spécifications

1.2.2.2- Identification de l'émulsion

Détermination de la teneur en eau (NFT 66-023)

L'échantillon doit être filtré sur un tamis de 630µm d'ouverture de mailles puis homogénéisé soigneusement par agitation.

Mode opératoire

- ♦ Peser 40g d'émulsion dans le ballon à 0.1g près.
- ♦ Ajouter 70 à 80 ml de toluène.
- ♦ Agiter légèrement et assembler les différents éléments de l'appareil.
- ♦ Faire circuler l'eau froide dans le réfrigérant.
- ♦ Chauffer le récipient de distillation en réglant de manière à éviter l'engorgement du réfrigérant.
- ♦ Poursuivre la distillation jusqu'à ce que le volume d'eau recueilli dans le tube de recette reste constant et qu'il n'y ait plus d'eau visible en aucun autre point de l'appareil.
- ♦ Arrêter le chauffage. Laisser le tube de recette et son contenu se refroidir.
- ♦ Lire le volume de l'eau rassemblée au fond du tube de recette.

Détermination de la pseudo viscosité (NFT 66-020)

L'échantillon doit être filtré sur un tamis de 630 μ m d'ouverture de mailles puis homogénéisé soigneusement par agitation
Avant de commencer l'essai, il faut d'abord Nettoyer soigneusement l'intérieur du réservoir et le tube d'écoulement.

Mode opératoire

- ◆ Pour l'étalonnage de l'appareil, obturer le tube d'écoulement et verser 200ml d'eau distillée à 20 °C dans le réservoir.
- ◆ Soulever plusieurs fois le pointeau très légèrement de façon que le tube d'écoulement se remplisse d'eau distillée et qu'une goutte demeure suspendue à l'orifice de sortie.
- ◆ Placer la fiole jaugée sous le tube.
- ◆ Soulever franchement le pointeau, et déclencher le chronomètre au moment où la première goutte de liquide touche le fond de la fiole.
- ◆ Noter le temps t_0 d'écoulement de 200ml d'eau distillée.

Pour mesurer le temps d'écoulement de l'émulsion, le mode opératoire ne diffère de celui utilisé pour l'étalonnage que par les points suivants :

- ❖ Les déterminations seront poursuivies dans un temps assez court après l'introduction de l'émulsion dans le viscosimètre, pour éliminer la possibilité de formation de dépôt.
- ❖ L'agitation de l'émulsion par rotation du couvercle est presque continue pour éviter la formation de mousse.
- ❖ La fiole jauge est placée de façon que l'émulsion s'écoule le long de la paroi pour éviter la formation de mousse.
- ❖ Noter le temps t_1 d'écoulement des 100 premiers millilitres puis le temps t_2 d'écoulement des 200ml. si l'écoulement est régulier. Le temps t_2 doit être à 5 seconde près : $t_2 = t_1 * 2.353$

Détermination de l'indice de rupture d'une émulsion cationique (NFT 66-017)

Travailler sur un échantillon passé au tamis de 630 μ m d'ouverture de maille.

Mode opératoire

- ◆ Conserver dans un bain thermostatique réglé à la température de 25°C l'émulsion à essayer et 1kg de fines de référence dans des récipients bouchés hermétiquement pendant 1h environ avant la réalisation de l'essai.
- ◆ Déterminer la masse m_1 de la capsule émaillée, contenant la spatule de nickel,
- ◆ Peser dans la capsule environ 100g de l'émulsion à essayer, soit m_2 la masse de l'ensemble.
- ◆ Remplir la trémie avec les fines de référence maintenues à 25°C.
- ◆ Ouvrir la trappe de la trémie ; les fines tombent alors régulièrement dans la capsule. simultanément, mélanger intimement de façon régulière l'émulsion et les fines au moyen de la spatule.
- ◆ Refermer la trappe lorsque le mélange devient pâteux et que se forme un caillot isolé et non adhérent à la capsule, caractéristique de la rupture de l'émulsion.
- ◆ Peser de nouveau la capsule avec la spatule de nickel, après l'avoir essuyée : soit m_3 .
- ◆ Déterminer la masse de fines. $M = m_3 - m_2$.

Essai de stabilité au stockage par décantation (T 66-022)

L'échantillon doit être filtré sur un tamis de 630 μ m d'ouverture de mailles puis homogénéisé soigneusement par agitation. L'essai est effectué à la température de 25°C environ.

Mode opératoire

- ◆ L'émulsion à environ 25°C est introduite dans le bécher métallique jusqu'aux $\frac{3}{4}$ de sa hauteur et laissée au repos pendant 24h après que le bécher ait été d'un verre de montre.
- ◆ Immerger l'électrode avec précaution dans l'émulsion jusqu'au trait de repère.
- ◆ Relier l'électrode au pôle négatif et le bécher au pôle positif du générateur.
- ◆ Fermer le circuit pendant au moins **10s**. Ouvrir ensuite le circuit et retirer l'électrode avec précaution.
- ◆ Déterminer la distance **d** en millimètre qui sépare le trait de repère de l'électrode du niveau supérieur du dépôt de bitume.

Essai d'adhésivité d'une émulsion cationique Cas des émulsions stockables (NFT66-018)

L'échantillon doit être filtré sur un tamis de 630 μ m d'ouverture de mailles puis homogénéisé soigneusement par agitation.

MODE OPERATOIRE

- ◆ Peser dans une capsule 200g de granulat type et dans une autre capsule une autre quantité d'émulsion correspondant à 10g de bitume.
 - ◆ Verser le granulat dans l'émulsion.
 - ◆ Mélanger intimement au moyen d'une spatule.
 - ◆ Etaler le mélange sur un verre de montre et l'introduire dans l'étuve réglée à 60°C.
 - ◆ Au bout de 24h, placer le mélange dans un bécher, y verser 300ml d'eau distillée à 60°C et le recouvrir d'un verre de montre.

 - ◆ Placer le bécher dans l'étuve réglée à 60°C.
- Au bout de 16 à 24h, on apprécie les surfaces recouvertes d'un film de liant.

Résultats et interprétations

Les résultats d'identification de l'émulsion sont présentés dans le tableau (1-4)

Tableau (1-4) Caractéristiques de l'émulsion

Caractéristiques d'identification	Valeurs obtenus	Spécifications* pour enrobage	Qualité d'émulsion
Teneur en liant	64.25	60 à 65	-
Pseudo viscosité	5.37	2 à 15	fluide
Indice de rupture	142.5	>120	rupture Lente
Adhésivité	80	-	-
Stabilité au stockage	4.59	-	-

*NFT 65-011 et NFP 98-121

Commentaires :

L'émulsion analysée est une émulsion cationique à 65% de qualité fluide à rupture lente, elle est classée selon la norme NFT 65-011 comme une **ECL65**.

1.2.2.3 - Identification de bitume**Dosage des asphaltènes précipités par l'heptane normal (NFT 60-115)****Mode opératoire**

- Dans une fiole conique peser une quantité de prise d'essai $m_2 (<10g)$
- Ajouter de l'heptane normal dans la proportion de 30 ml par gramme de produit essayé ; faire bouillir le mélange à reflux pendant 1h
- Arrêter le chauffage, laisser refroidir, enlever la fiole et la fermer avec un bouchon rodé puis la placer dans l'obscurité pendant 2h.
- Sans agiter, filtrer le liquide à travers un papier filtre et de fine porosité.
- Faire passer le résidu de la fiole sur le filtre aussi complètement que possible en entraînant le précipité avec des quantités successives d'heptane normal chaud et en utilisant au besoin un agitateur en verre.
- Rincer la fiole avec de l'heptane normal chaud et verser le liquide de rinçage sur le filtre.
- Après filtration, placer le filtre dans l'extracteur en utilisant une fiole renfermant 50ml d'heptanes normales. Faire bouillir et régler le reflux de 2 à 4 gouttes par seconde jusqu'à quelques gouttes d'heptanes normale prélevées dans l'extracteur ne laissant aucun résidu par évaporation sur un verre de montre.
- Remplacer la fiole utilisée en premier, y verser 30 à 60ml de benzène et remettre en marche le chauffage à reflux jusqu'à dissolution de la totalité des asphaltènes retenus par le filtre.
- Verser le contenu de la fiole dans la coupelle d'évaporation préalablement nettoyée, séchée et pesée à 0.2mg près, en utilisant comme tare une coupelle semblable. Laver la fiole avec de petites quantités successives de benzène dont le volume global doit rester inférieur à 30 ml.

• Sécher la coupelle et son contenu dans un étuve à 100°C pendant 30min. Refroidir la coupelle dans un dessiccateur pendant 1 heure et la peser en utilisant le même chauffage et refroidissant que la coupelle contenant des asphaltènes. Noter l'augmentation de masse de la coupelle (m_1)

• La teneur en asphaltènes de la prise d'essai « A » est exprimée en pour cent en masse par la formule $A = \frac{m_1}{m_2} \times 100$

Pénétrabilité a l'aiguille (NFT 66-004)

Mode opératoire

• chauffer l'échantillon avec précaution, à la température la plus basse à laquelle il devient suffisamment fluide pour pouvoir être versé.

• agiter l'échantillon pour l'homogénéiser en évitant l'inclusion de bulles d'air, ensuite verser lentement dans le gobelet préchauffé.

• après refroidissement pendant 2h à la température de l'essai, placer le gobelet ainsi que le récipient de transfert dans le bain d'eau pendant 2h, le bain d'eau étant maintenu à 25°C±0.1°C

• après 2h placer la prise d'essai dans le récipient de transfert garni d'une quantité suffisante d'eau provenant du bain pour recouvrir complètement le Goblet. Placer ensuite ce récipient sur le plateau du pénétromètre.

• déplacer l'aiguille chargée pour qu'elle affleure exactement la surface de la prise d'essai.

• ramener à 0 l'aiguille du cadran, libérer l'aiguille pendant la durée spécifiée de 5s±0.1s, la bloquer aussitôt et mesurer la profondeur d'enfoncement en dixièmes de millimètre.

• effectuer trois mesures en des points de la surface de la prise d'essai distants d'au moins 10mm les uns des autres et du bord du gobelet.

Détermination du point de ramollissement, des produits bitumineux –méthode bille et anneau (NFT 66-008)

MODE OPERATOIRE

• chauffer l'échantillon en ayant soin d'éviter les surchauffes locales et en l'agitant constamment jusqu'à ce que soit assez fluide pour être versé.

• verser l'échantillon chauffé dans deux anneaux eux –même préchauffés à la même température. Pendant cette opération, les anneaux reposent sur une plaque enduite d'un mélange en parties égales de glycérides pour éviter l'adhérence du produit.

• laisser refroidir pendant 30 min au moins mais sans que ce temps ne puisse entraîner une durée totale de l'essai supérieure à 240min.

• après refroidissement, enlever l'excès de produit par arasement, en utilisant une spatule ou un couteau légèrement chauffé.

• assembler l'appareillage avec les anneaux, le thermomètre et les guides en position correcte, et remplir le vase avec de l'eau distillée récemment bouillie à 5±1°C, sur une hauteur comprise entre 102 et 108mm, maintenir pendant 15 min à une température de 5°C.

• placer une bille préalablement amenée à la température du bain, au centre de chaque guide.

• chauffer de façon à élever la température de 5°C par minute.

- noter pour chaque ensemble bille-anneau la température, indiquée par le thermomètre, à laquelle l'échantillon enveloppant la bille touche la plaque inférieure du support. Si la différence entre les deux valeurs obtenues dans un essai effectué en double dépasse 1°C, recommencer l'essai.

Détermination de la densité relative (NFT 66-007)

Mode opératoire

- remplir le pycnomètre avec de l'eau distillée portée à 25 °C, et l'immerger complètement pendant au moins 30 min, dans un bain d'eau réglé à cette même température.
 - Retirer ensuite le pycnomètre du bain d'eau, le peser sans délai après avoir enlevé toute trace d'humidité de la surface extérieure. Soit « b » la masse obtenue.
 - Introduire le produit au moins jusqu'à repère circulaire. Refroidir le pycnomètre et son contenu à la température ambiante et le peser muni de son bouchon. soit « c » la masse obtenue.
 - Retirer le pycnomètre de la balance, le remplir avec de l'eau distillée puis l'immerger complètement pendant au moins 30 min dans un bain maintenu à 25°C.
 - Retirer le pycnomètre et l'essuyer avec un chiffon propre et sec, le peser immédiatement avec son contenu. Et menu de son bouchon. Soit « d » la masse obtenue.
- La densité relative du produit est donnée par la formule :

$$\text{densité relative } 25^{\circ}\text{C} / 25^{\circ}\text{C} = \frac{c - a}{((b - a) - (d - c))}$$

« a » est la masse de pycnomètre et son bouchon propre et sec.

Détermination de la ductilité (NFT 66-006)

Mode opératoire

- chauffer le bitume pour qu'il soit complètement fluide. Le faire passer ensuite au travers d'un tamis de 315 micromètre d'ouverture de maille.
- après l'avoir soigneusement agité, emplir le moule supporté par une plaque de laiton et, pour éviter que le produit essayé ne colle, enduire la surface de la plaque et les surfaces intérieures des côtés de glycérine.
- laisser refroidir le moule garni à la température ambiante pendant 30 à 40 minutes, puis le placer pendant 30 min dans le bain d'eau maintenu à la température spécifiée. Eliminer ensuite l'excès de bitume avec une spatule, de façon à assurer à l'éprouvette l'épaisseur spécifiée.
- placer l'ensemble dans le bain d'eau sur une plaque perforée et les y maintenir à 25°C pendant 1h 30min. séparer ensuite l'éprouvette de la plaque, détacher les pièces latérales.
- relier les bagues qui se trouvent à chaque extrémité des pattes d'attache aux axes crochets de la machin d'essai et provoquer l'étirage en éloignant les deux pattes d'attache avec une vitesse uniforme de 50mm/min, jusqu'à rupture de l'éprouvette.
- mesurer en centimètre la distance dont il a fallu écarté les pattes d'attache pour provoquer la rupture.

Détermination des points d'éclair et de feu (ISO-2592 :1973)

Mode opératoire

- remplir le vase à n'importe quelle température convenable de telle sorte que le haut du ménisque atteigne exactement le niveau de la ligne de remplissage.
- Allumer la flamme d'essai, et chauffer de façon que la vitesse d'accroissement de la température de la prise d'essai soit de 14 à 17°C par minute.
- Faire passer la flamme par le centre du vase .le temps de passage de la flamme au – dessus du vase doit être d'environ 1s.
- Noter comme point de flamme point d'éclair, la température lue sur le thermomètre lorsqu'un éclair apparaît en un point quelconque de la surface du liquide.
- Continuer à chauffer de façon que la température de la prise d'essai augmente à une vitesse de 5°C à 6°C par minute.
- Faire passer la flamme jusqu'à ce que l'huile s'enflamme et continue de brûler pendant au moins 5s. noter la température à ce moment comme point de feu de l'huile.

Les résultats des différents essais effectués, sont donnés par le tableau (1-5)

Tableau (1-5) : caractéristiques du bitume pur

essais	pénétrabilité	TBA	ductilité	Point d'éclair	Point de feu	Densité Relative	% asphatènes
Valeurs Obtenues	65(1/10mm)	53°C	>100cm	320°C	340°C	1.031	15%
Spécification	50 à 70	46à 51	>80	>230	-	1 à 1,1	-

Commentaires :

Le bitume analysé répond aux spécifications.
Le pourcentage d'asphatènes est de l'ordre de 15%.

1.2.2.4 - Formulation de l'enrobé à froid

La démarche suivie pour la formulation de l'enrobé coloré à froid est la suivante:

- Choix de la formule granulaire,
- Détermination des teneurs bitume,
- Essais de performances mécaniques.

Choix de la formule granulaire

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minéral et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

Composition granulaire du mélange pour béton bitumineux ouvert 2/14

Celui-ci se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que le mélange s'insère dans un fuseau de référence.

A fin de faciliter l'évaporation de l'eau de l'émulsion, le fuseau de référence utilisé est celui d'un enrobé à froid ouvert dont les valeurs limites sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau (1-6) : Fuseau de référence 2/14

Tamis(mm)	14	12.5	10	8	2	1
Limite sup %	100	95	75	60	7	5
Limite inf %	90	75	60	30	3	0

Pour que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence, le mélange granulométrique retenu est le suivant :

Classe granulaire	Pourcentage des fractions (5%)
8/15	50
3/8	45
0/3	5

En effet, c'est grâce aux pourcentages de ces fractions que la courbe granulométrique s'insère parfaitement dans le fuseau de référence comme nous le montre le tableau (1-7) et son illustration à la figure (1-2)

Tableau (1-7) : Analyse granulométrique du mélange

Tamis	Passant % (mélange)	Paramètre de calcul de S
20	100	G=38%
16	98	
14	87.5	
12.5	79.5	
10	62	
8	48.9	g= 36,75%
6.3	37	
5	25.25	
4	15.8	S ₁ =23,85%
3.15	8.95	
2.5	6.3	
2	4.9	
1.6	4.5	
1	3.15	
0.63	2	
0.5	1.75	
0.4	1.55	
0.315	1.4	
0.25	1.3	S ₂ =0,5%
0.2	1.15	
0.16	1.05	
0.1	0.9	
0.08	0.8	f =0,8%
S		188
$\sqrt[5]{S}$		1.135

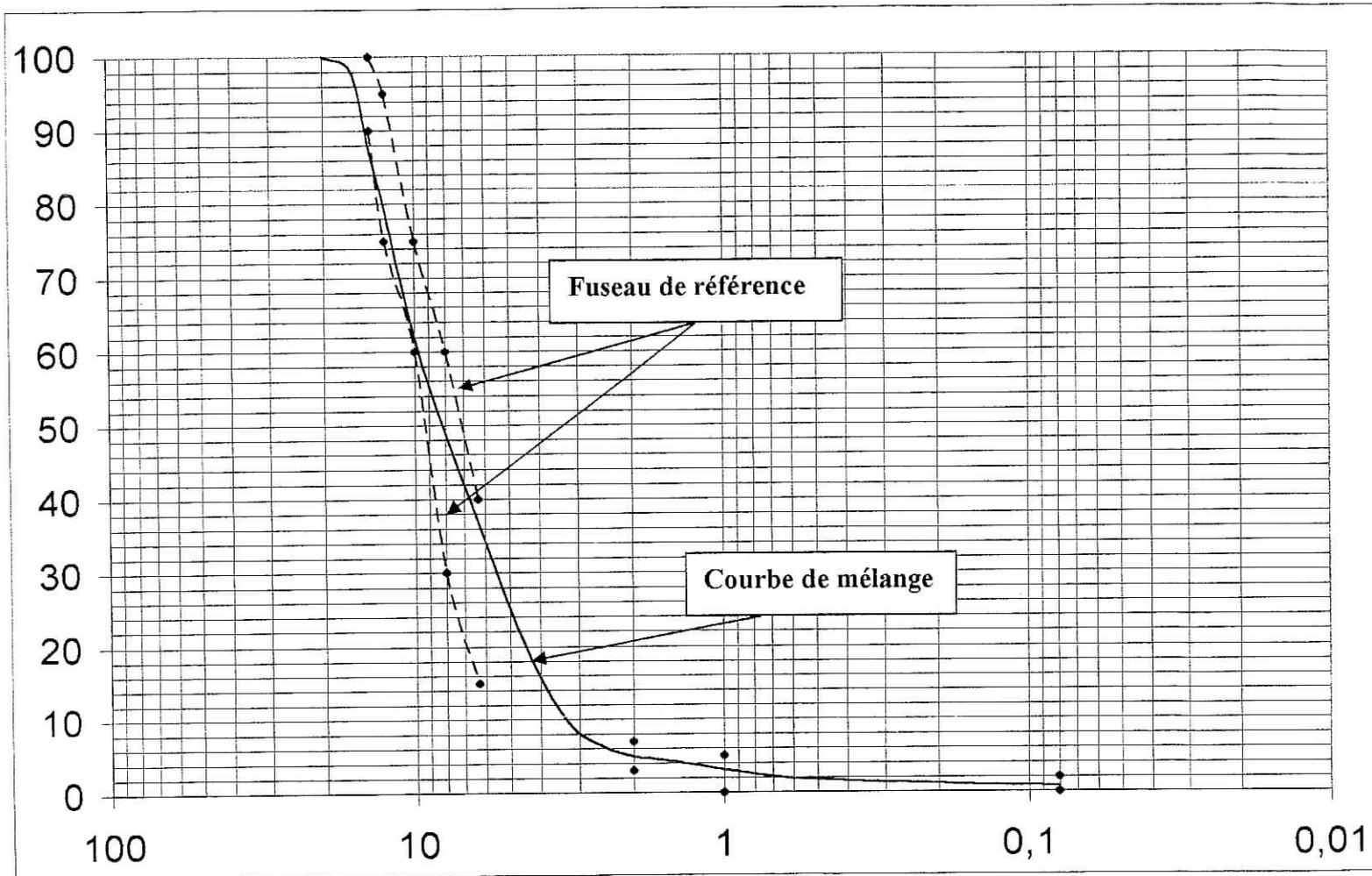


Fig. (1-2) : courbe de mélange pour béton bitumineux ouvert 2/14

Choix des teneurs en eau

La teneur en eau d'enrobage est estimée à partir du test d'enrobage qui a pour objectif d'évaluer visuellement les teneurs en eau idéales permettant d'obtenir les meilleurs enrobages et maniabilités des mélanges.

Ce teste consiste à :

- préparer dans une capsule 500g de mélange granulaire.
- malaxer à la cuillère 30 secondes le mélange granulaires.
- ajouter l'eau d'apport puis malaxer à nouveau 30 secondes.
- ajouter l'émulsion puis malaxer à nouveau 30 secondes à 1 minute afin d'obtenir une bonne répartition visuelle,
- pour une teneur en émulsion donnée, recommencer les essais à différentes teneurs en eau de façon à fixer plus précisément que possible la zone de teneur en eau totale (eau de l'émulsion + eau des granulats+ eau d'apport) pour laquelle on aura le meilleur enrobage et la meilleur consistance du mélange.

Les observations tirées du test d'enrobage réalisé à différentes teneurs en émulsion et en eau sont résumées dans le tableau (1-9)

Choix des teneurs en liants

Les teneurs en liants doivent être choisies de manière à permettre au mélange hydrocarboné d'atteindre en laboratoire les performances exigées par les normes.

La teneur en bitume résiduel est définie comme étant le rapport de la masse de bitume sur la masse des granulats secs exprimé en pour-cent.

Les différents modules de richesses ainsi que le pourcentage de bitume résiduel correspondant sont résumés dans le tableau (1-8):

Tableau (1-8) : choix des teneurs en liants

Module de richesse K	3,3	3,5	3,7	3,9
Teneur en bitume résiduel P %	3,75	3,97	4,2	4,43

Tableau (1-9) : test d'enrobage sur béton bitumineux 2/14

Teneur en bitume résiduel %	Teneur* en émulsion %	Teneur en eau d'apport %	Teneur en eau totale %	Observations
3.75	5.76	2	4.06	Bonne maniabilité, bon enrobage, excès d'eau
		1	3.06	Bonne maniabilité, bon enrobage
		0	2.06	Mauvaise maniabilité, mauvais enrobage
3.97	6.11	0	2.18	Maniabilité moyenne, bon enrobage
		1	3.18	Bonne maniabilité, bon enrobage
4.20	6.46	0	2.31	Maniabilité moyenne, bon enrobage
		1	3.31	Bonne maniabilité, léger excès d'eau
3,9	6,81	1	3,43	Bonne maniabilité, léger excès d'eau

- Commentaires :

le test d'enrobage résumé dans le tableau (1-9) a relevé que le meilleur enrobage et la meilleure maniabilité de notre béton bitumineux 2/14 avec les différents bitumes résiduels sont obtenus avec une teneur en eau d'apport de 1%.

- Temps de mûrissement et performances mécaniques des éprouvettes sans pigmentation

Après identification des matériaux, choix des modules de richesse et de la teneur en eau d'apport nous avons confectionnée des éprouvettes afin de les tester à l'essai DURIEZ selon le mode opératoire (NFP 98-251-4 octobre 1992), dans le but de déterminer la teneur en liant optimale.

- Temps de mûrissement avec k=3.3

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés par le tableau (1-10) et illustrés par la figure (1-3)

Tableau (1-10) temps de mûrissement d'éprouvette avec K=3,3				
	E1	E2	E3	E4
1 ^{er} jour	1032,0	1038,0	1053,0	1009,0
2 ^{eme} jour	1025,0	1032,0	1046,0	1001,0
3 ^{eme} jour	1017,0	1026,5	1040,5	954,00
4 ^{eme} jour	1012,5	1020,0	1034,5	947,50
5 ^{eme} jour	1006,0	1014,0	1027,0	942,00
6 ^{eme} jour	1003,0	1010,0	1002,5	939,00
7 ^{eme} jour	1001,0	1008,0	1019,5	936,50

- Temps de mûrissement avec $k=3.5$

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés par le tableau (1-11) et illustrés par la figure (1-4)

	E1	E2	E3	E4
1^{er} jour	1047,5	1067,0	1069,0	1037,5
2^{eme} jour	1041,5	1060,0	1062,0	1029,0
3^{eme} jour	1035,5	1052,0	1056,0	1020,0
4^{eme} jour	1029,5	1045,5	1050,0	1013,5
5^{eme} jour	1022,0	1038,0	1042,0	1003,5
6^{eme} jour	1015,0	1031,5	1035,5	996,00
7^{eme} jour	1012,0	1029,0	1032,0	993,50

- Temps de mûrissement avec $k=3.7$

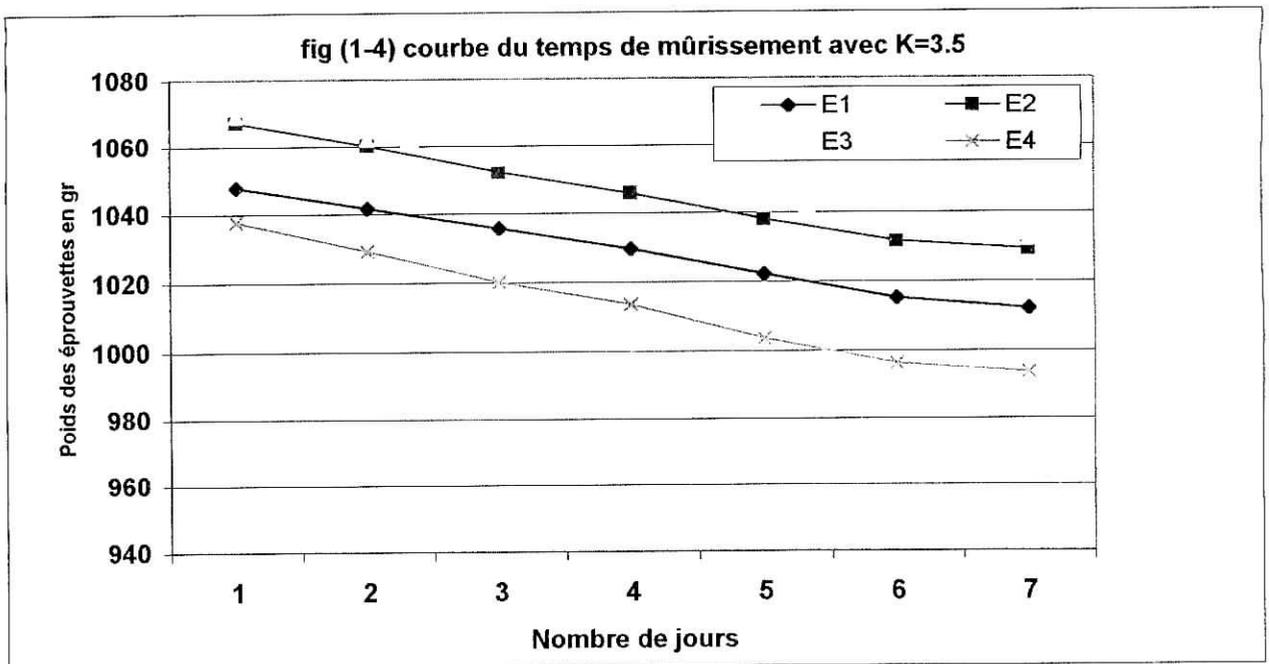
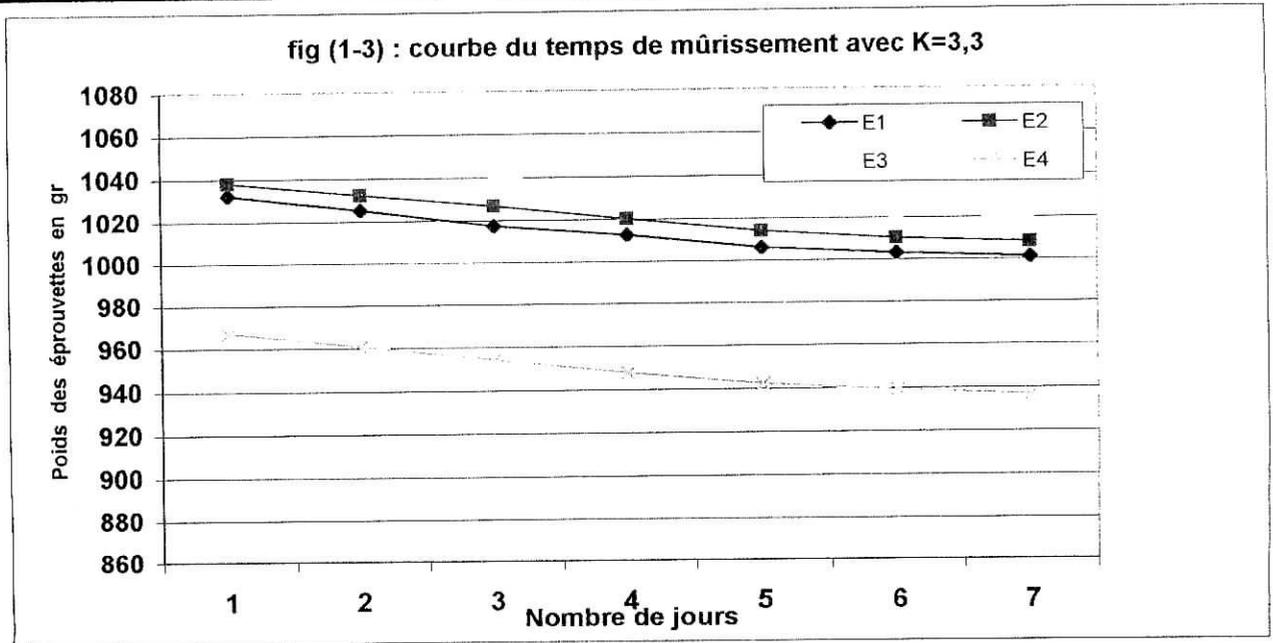
Les résultats du temps de mûrissement sont donnés par le tableau (1-12) et illustrés par la figure (1-5)

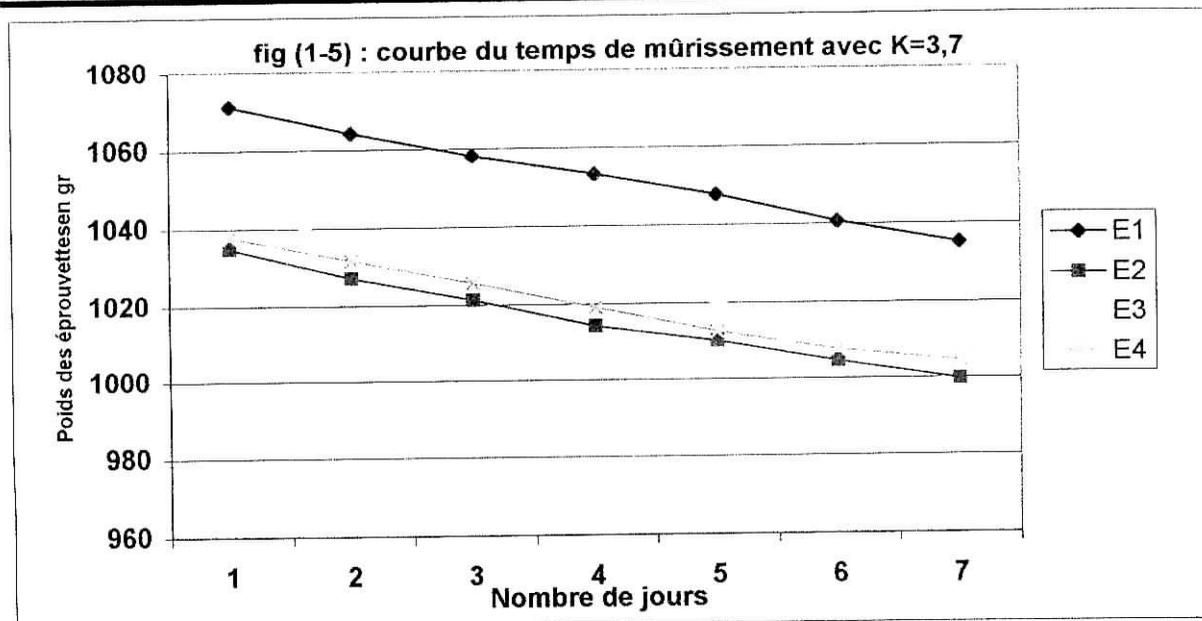
	E1	E2	E3	E4
1^{er} jour	1071,0	1034,5	1044,5	1037,5
2^{eme} jour	1064,0	1027,0	1037,0	1031,5
3^{eme} jour	1058,0	1021,0	1030,5	1025,5
4^{eme} jour	1053,0	1014,0	1025,0	1019,0
5^{eme} jour	1047,5	1010,0	1020,0	1012,5
6^{eme} jour	1040,5	1004,5	1014,5	1007,5
7^{eme} jour	1035,0	999,50	1010,5	1004,5

- Temps de mûrissement avec $k=3.9$

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés par le tableau (1-13) et illustrés par la figure (1-6)

	E1	E2	E3	E4
1^{er} jour	1049,0	942,00	1040,5	1052,5
2^{eme} jour	1042,5	937,50	1033,0	1045,5
3^{eme} jour	1036,5	931,50	1026,5	1041,5
4^{eme} jour	1031,0	926,00	1019,5	1034,0
5^{eme} jour	1026,5	919,00	1009,0	1022,5
6^{eme} jour	1020,5	914,50	1003,0	1015,0
7^{eme} jour	1017,5	912,00	1000,5	1012,5





Commentaires :

A partir de ces figures, on remarque que le temps de mûrissement (le temps d'évaporation de l'eau) des éprouvettes se limite à 7 jours pour l'ensemble des éprouvettes, comme il est exigé à travers la norme (NFP 98-121)

Essais de performances mécaniques

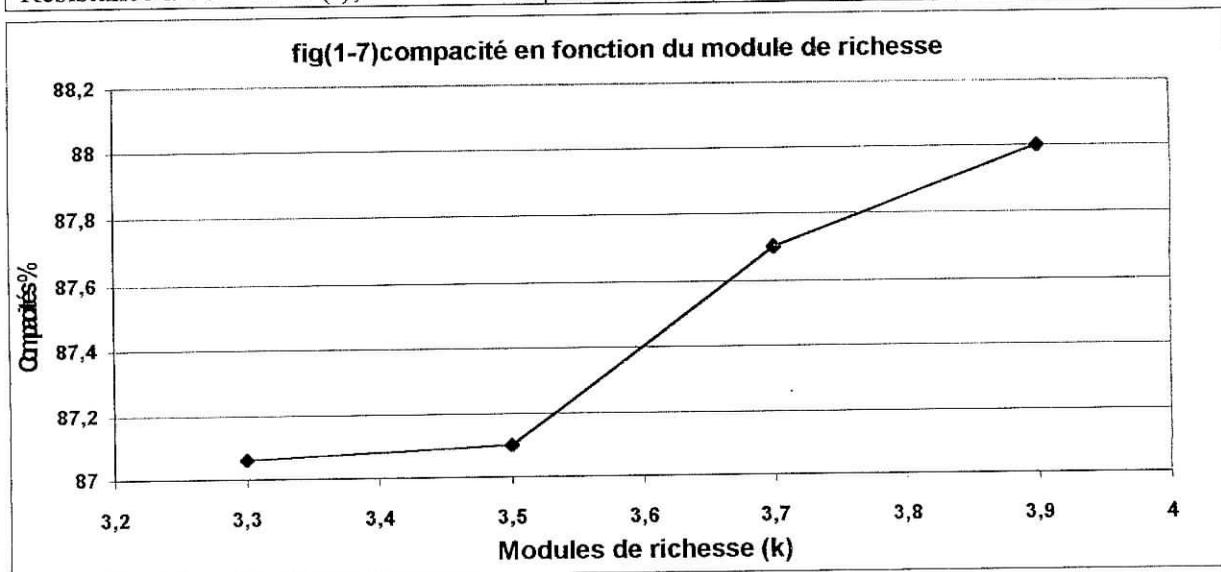
L'essai réalisé pour tester les performances mécaniques de l'enrobé coloré à froid est l'Essai Duriez selon la norme NFP 98-251-1.

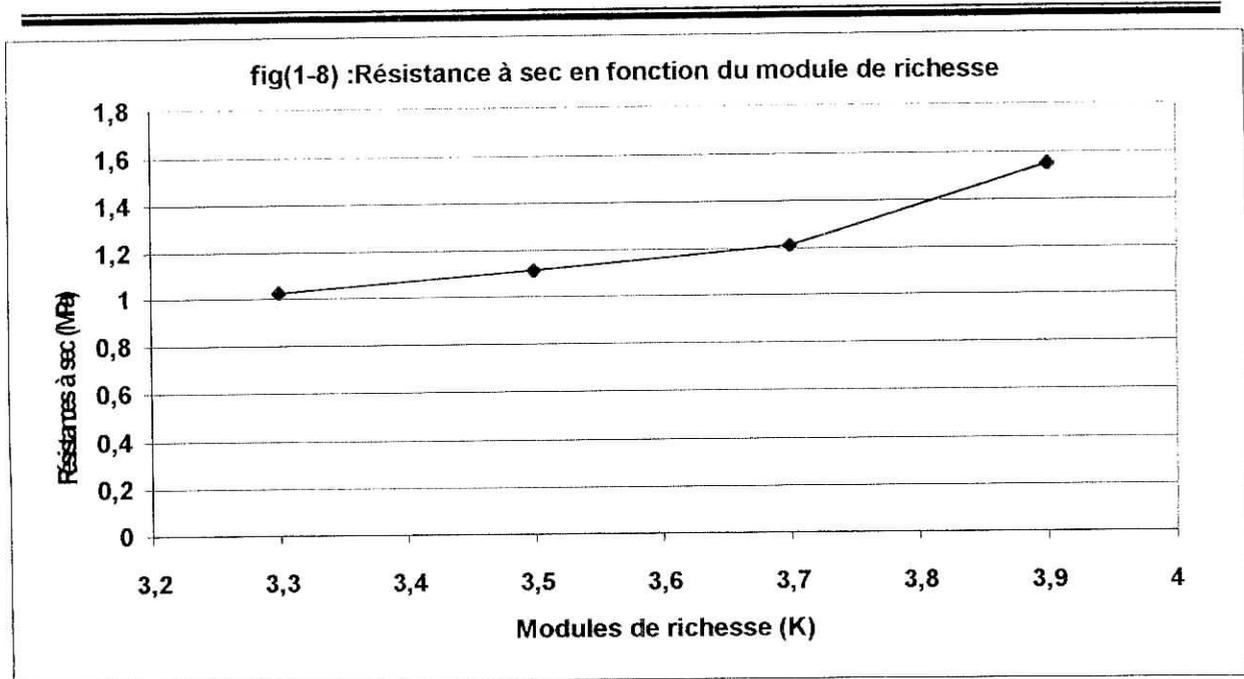
Cet essai a été réalisé sur UN enrobés 2/14 avec les différentes teneurs en liant et une teneur en eau d'apport égale à 1%.

Les résultats de cet essai sont résumés dans le tableau (1-14)

Tableau (1-14) Résultats de l'essai DURIEZ

Module de richesse (K)	3,3	3,5	3,7	3,9
Teneur en eau %.	3,06	3,18	3,31	3,43
Teneur en bitume résiduel %.	3,75	3,97	4,20	4,43
Teneur en émulsion %.	5,76	6,11	6,46	6,81
Densité apparente	2,22	2,22	2,23	2,23
Densité théorique	2,55	2,54	2,53	2,53
Compacité %.	87,07	87,10	87,78	88,0
Pourcentage des vides %.	12,93	12,90	12,22	11,92
Résistance à l'air 18°C (r), en MPa	1,02	1,11	1,21	1,55





Commentaires :

- ◆ On remarque que les compacités sont de l'ordre de 87 à 88, ceci correspond à un pourcentage de vide de 13 à 14% ce qui nous permet de dire que l'enrobé est un enrobé semi-dense.
- ◆ L'expérience Algérienne a montré que ce type de mélange donne généralement des résistances à la compression à sec inférieures à 2MPa (2^{em} congrée Algérien de la route Décembre 1996)
- ◆ On remarque aussi que la meilleure résistance est obtenue pour une teneur en émulsion de **6,81%** (**teneur en bitume résiduel 4,43 %**).

1.2.2.5- Formulation de l'enrobé à chaud

Une tentative expérimentale a consisté à utiliser un procédé d'enrobage à chaud, moyennant le même squelette minéral utilisé pour l'enrobé à froid à savoir les mêmes pourcentages pondéraux des différentes fractions granulaires utilisées.

Le procédé en question est de reprendre le mélange granulaire avec une teneur en bitume résiduel (ici bitume de classe 60/70) initialement faisant partie intégrante de l'émulsion.

Afin de pouvoir comparer la nuance de couleur, on a préféré travailler avec le même pourcentage en bitume résiduel du taux d'émulsion retenu.

La tenue à l'eau des granulats enrobés –essai d'immersion statique-

L'essai est effectué sur des granulats de classe granulaire 10-12mm

Mode opératoire

- Laver le gravier sous eau courant jusqu'à éliminer toute la poussière possible.
- Laisser sécher jusqu'à masse constante à 60°C.
- Peser 100g de gravier préparé dans une boîte de bitume.
- Ajouter 5 g de liant au gravier, mélanger pendant 2 minutes.
- Transférer le gravier revêtu dans un bocal de 500ml et laisse durcir. après 2h, plonger les pierres dans l'eau et stocker pendant 16h à 60°C.
- la portion de surface retenant le film de liant est évaluée.

Les résultats d'adhésivité sont donnés par la figure (3.6) du chapitre 3

chapitre2

les enrobés colorés à froid

2.1 – Introduction

Dans ce chapitre, après avoir déterminé les caractéristiques des granulats, de l'émulsion, la composition du squelette granulaire ainsi que la teneur en liant optimale, on va faire la pigmentation de l'émulsion et étudier les caractéristiques technologiques des émulsions pigmentées afin de détecter la nuance des couleurs à différents pourcentages du pigment et vérifier leur comportement mécanique.

Pour des raisons de prix et de facilité d'emploi (utilisable avec tout type de liant), l'oxyde de fer rouge sera utilisé dans cette étude.

2.2 – Caractéristiques technologiques et nuance couleur de l'émulsion avec l'oxyde de fer rouge

L'oxyde de fer n'est pas un matériau inerte, le mélange (émulsion + oxyde de fer) doit être préparé 24h avant l'essai pour que le mélange soit stable.

Les caractéristiques technologiques de l'émulsion avec différents pourcentages d'oxyde de fer rouge sont résumées par les tableaux (2-1), (2-2), (2-3), (2-4) et illustrées par les figures (2-1), (2-2), (2-3)

- Avec 0.25% d'oxyde de fer rouge

Tableau (2-1) : caractéristiques de l'émulsion avec 0.25%

Caractéristique de l'émulsion 0.25%	Valeurs obtenues	Spécifications* pour enrobage	Qualité d'émulsion
Teneur en liant %	65	60 à 65	-
Pseudo viscosité	9.05	2 à 15	
Indice de rupture	130	>120	rupture Lente
Adhésivité**	75%	-	-
Couleur de l'émulsion	Noir- pas de changement de couleur		

- Avec 0.5% d'oxyde de fer rouge

Tableau (2-2) : caractéristiques de l'émulsion avec 0.5%

Caractéristique de l'émulsion 0.5%	Valeurs obtenues	Spécifications* pour enrobage	Qualité d'émulsion
Teneur en liant%	66,5	60 à 65	-
Pseudo viscosité	8,79	2 à 15	Semi-fluide
Indice de rupture	121	>120	rupture Lente
Adhésivité**	70%	-	-
Couleur de l'émulsion	Noir- pas de changement de couleur		

- Avec 0.75% d'oxyde de fer rouge

Tableau (2-3) : caractéristiques de l'émulsion avec 0.75%

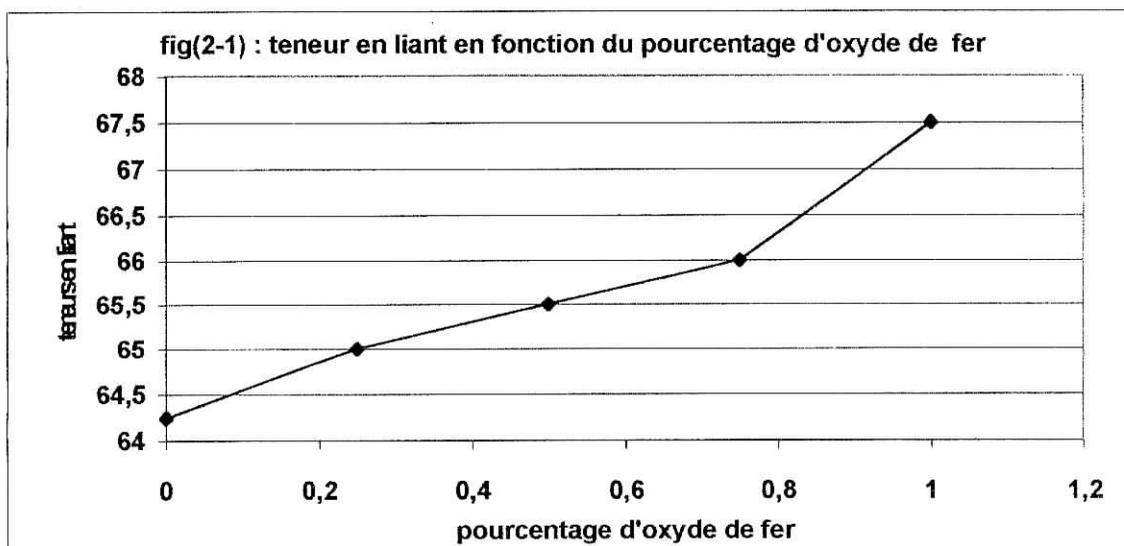
Caractéristique de l'émulsion 0.75%	Valeurs obtenus	Spécifications* pour enrobage	Qualité d'émulsion
Teneur en liant %	66	60 à 65	-
Pseudo viscosité	9,03	2 à 15	Semi-fluide
Indice de rupture	119	>120	rupture Lente
Adhésivité **	60%	-	-
Couleur de l'émulsion	Marron ocre		

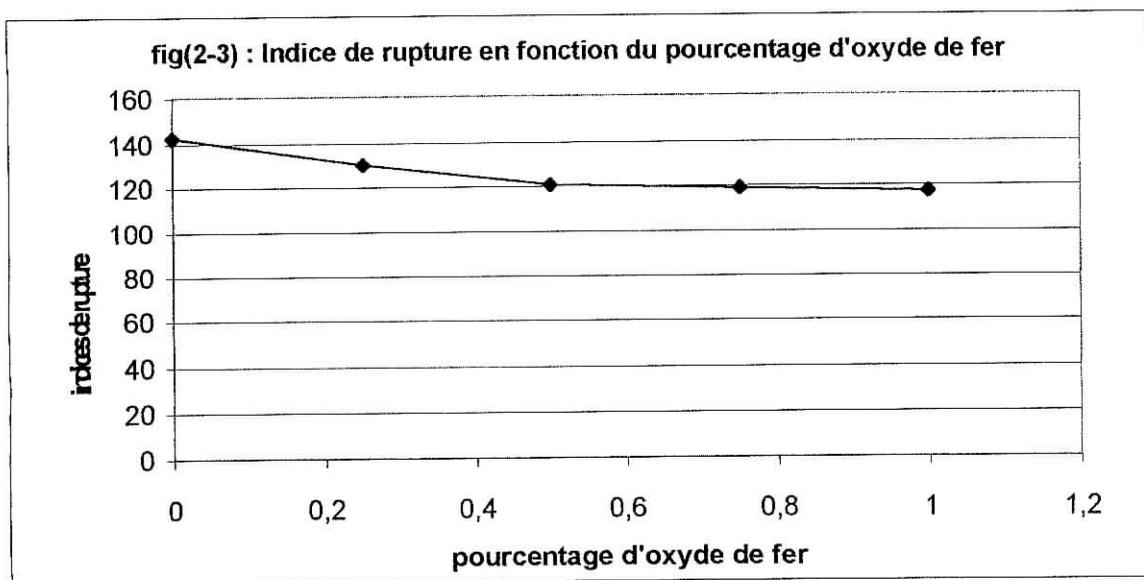
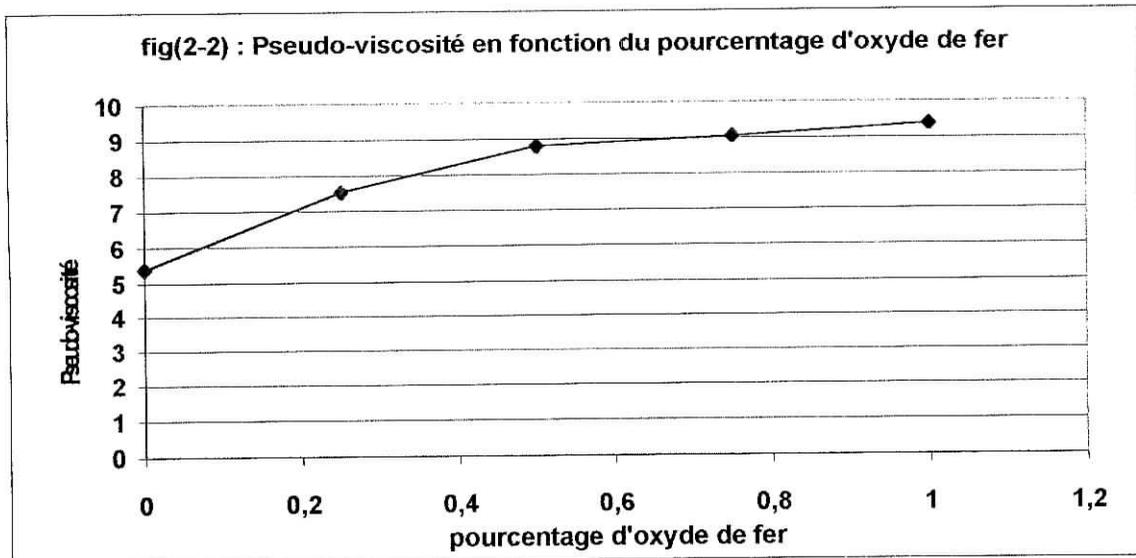
- Avec 1% d'oxyde de fer rouge

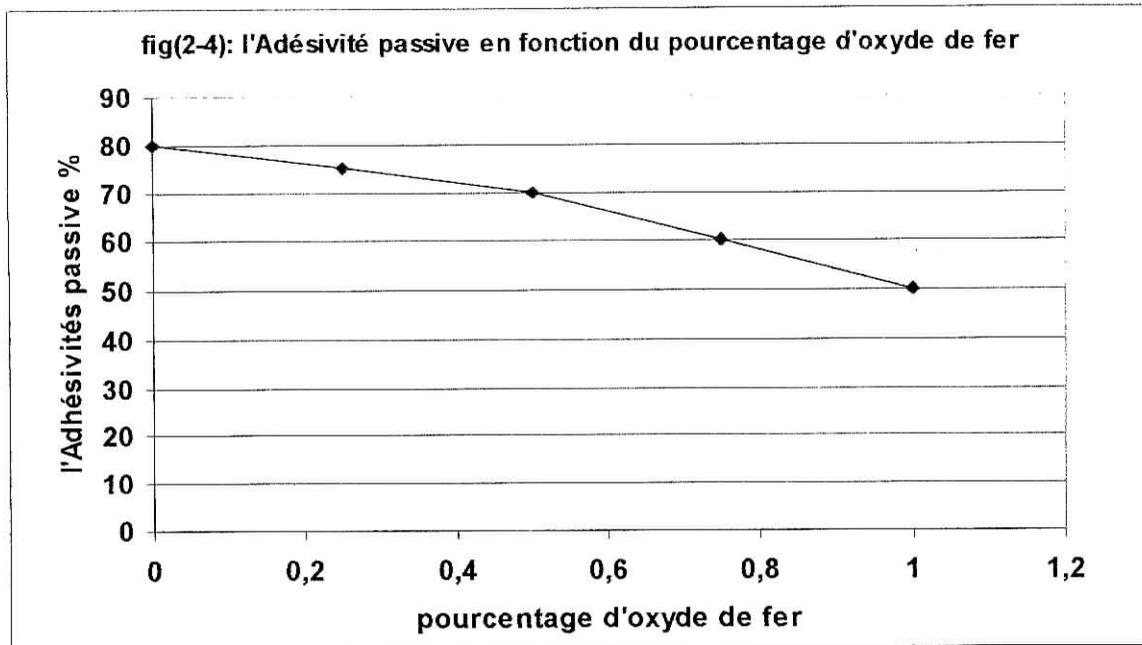
Tableau (2-4) : caractéristiques de l'émulsion avec 1%

Caractéristique de l'émulsion 1%	Valeurs obtenus	Spécifications* pour enrobage	Qualité d'émulsion
Teneur en liant %	67,5	60 à 65	-
Pseudo viscosité	9,35	2 à 15	Semi-fluide
Indice de rupture	117,5	>120	rupture Lente
Adhésivité**	50%	-	-
Couleur de l'émulsion	Marron ocre		

*NFT 65-011 et NFP 98-121, ** pourcentage d'enrobage







2.3 - Interprétations :

- Sur le graphe (2-1) on remarque que la teneur en liant est proportionnelle à la quantité d'oxyde de fer ajoutée dans l'émulsion. Des pesées successives sur une balance de précision nous ont permis de constater qu'il y'a une chute de la masse de l'échantillon ce qui peut être due à l'évaporation de l'eau de l'émulsion.

- La viscosité d'une émulsion croit avec la teneur en liant : ceci est constaté en analysant les graphes (2-1) et (2-2).

- Sur le graphe (2-3) on remarque que L'indice de rupture de l'émulsion diminue en fonction de la quantité d'oxyde de fer ajoutée. Ce qui peut être expliqué par le faite que L'oxyde de fer a une surface spécifique très élevée, ces poudres sont assimilées à des fines qui peuvent modifier le mécanisme de rupture de l'émulsion, en créant des ruptures prématurées et modifier par la suite l'indice de rupture de l'émulsion .

- sur la figure (2-4) on remarque que l'adhésivité de l'émulsion a chuté de 30% pour un pourcentage d'oxyde de fer de l'ordre de 1% par rapport à l'adhésivité initiale (émulsion sans pigment). Ce qui peut être du a un phénomène chimique (pH)

Le mélange émulsion - 1% d'oxyde de fer rouge par rapport au poids d'émulsion ne fait pas ressortir la couleur rouge voulue sur les granulats, l'indice de rupture est de l'ordre de 117 cette valeur ne répond pas à la spécification exigée pour enrobage (>120).

L'essai d'adhésivité avec ce mélange a donné une valeur inférieure de 30% par rapport à un essai d'adhésivité avec l'émulsion pure.

Afin de remédier à ces problèmes, il faut fabriquer une émulsion dont l'indice de rupture initial est très élevé c-à-d une émulsion qui contient une grande quantité d'émulsifiant (l'émulsifiant est un dope d'adhésivité), pour cela le CTTTP avec la collaboration de l'usine d'émulsion DBA-Chebli ont fabriqué une émulsion avec un indice de rupture de l'ordre de 195. Les caractéristiques technologiques de cette émulsion sont données par le tableau ci-dessous

Caractéristique de l'émulsion	Valeurs obtenues	Spécifications* pour enrobage	Qualité d'émulsion
Teneur en liant %	60	60 à 65	-
Pseudo viscosité	1.71	2 à 15	Visqueuses
Indice de rupture	195	>120	rupture très Lente

2.4- Temps de mûrissement et performances mécaniques des éprouvettes avec différents pourcentages de pigment

Après identification de l'émulsion qui va être utilisée pour la pigmentation, des éprouvettes ont été confectionnées afin de vérifier la nuance de la couleur et de les tester à l'essai DURIEZ selon le mode opératoire (NFP 98-251-4 octobre 1992) dans le but de déterminer l'effet des pigments sur les performances mécaniques. (Les pourcentages des oxydes sont donnés par rapport au poids du granulat)

A - Avec l'oxyde de fer rouge

- Temps de mûrissement avec 0.2% d'oxyde de fer

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés dans le tableau (2-5) et illustrés par la figure (2-5)

	E1	E2	E3	E4	E5
1 ^{er} jour	1005,0	997,0	1007,0	1006,5	1012,5
2 ^{eme} jour	991,5	980,5	990,0	990,0	999,5
3 ^{eme} jour	983,5	971,5	983,5	979,5	993,0
4 ^{eme} jour	982,0	970,5	982,5	978,5	992,0
5 ^{eme} jour	980,0	970,5	982,5	978,0	991,0
6 ^{eme} jour	980,0	970,0	981,5	978,0	991,0
7 ^{eme} jour	980,0	970,0	981,5	978,0	991,0

- Temps de mûrissement avec 0.4%, 0.6%, 0.8% d'oxyde de fer rouge

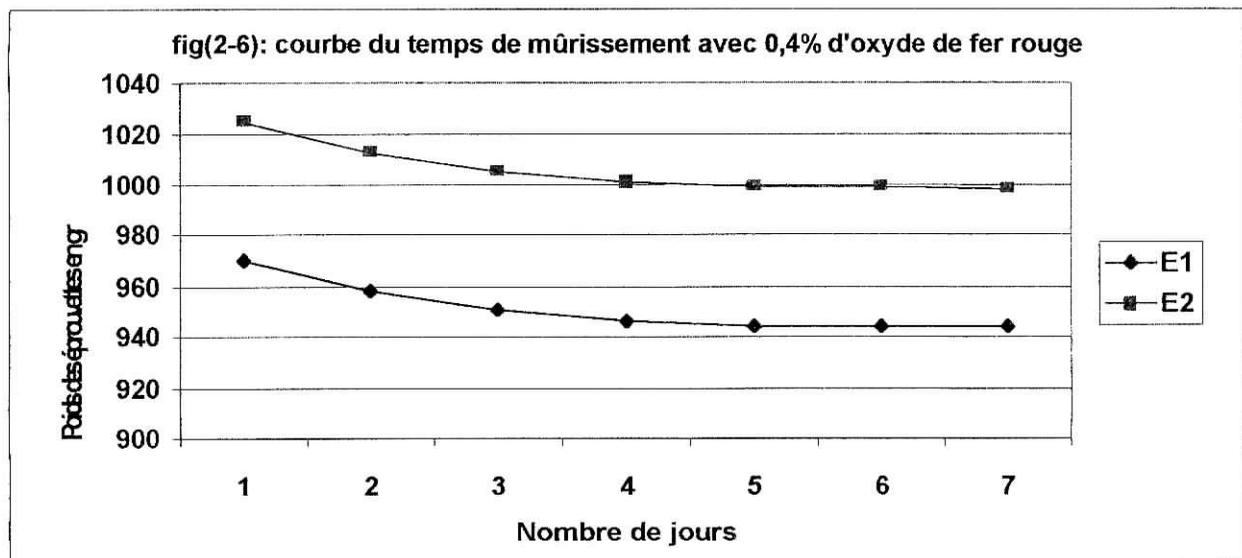
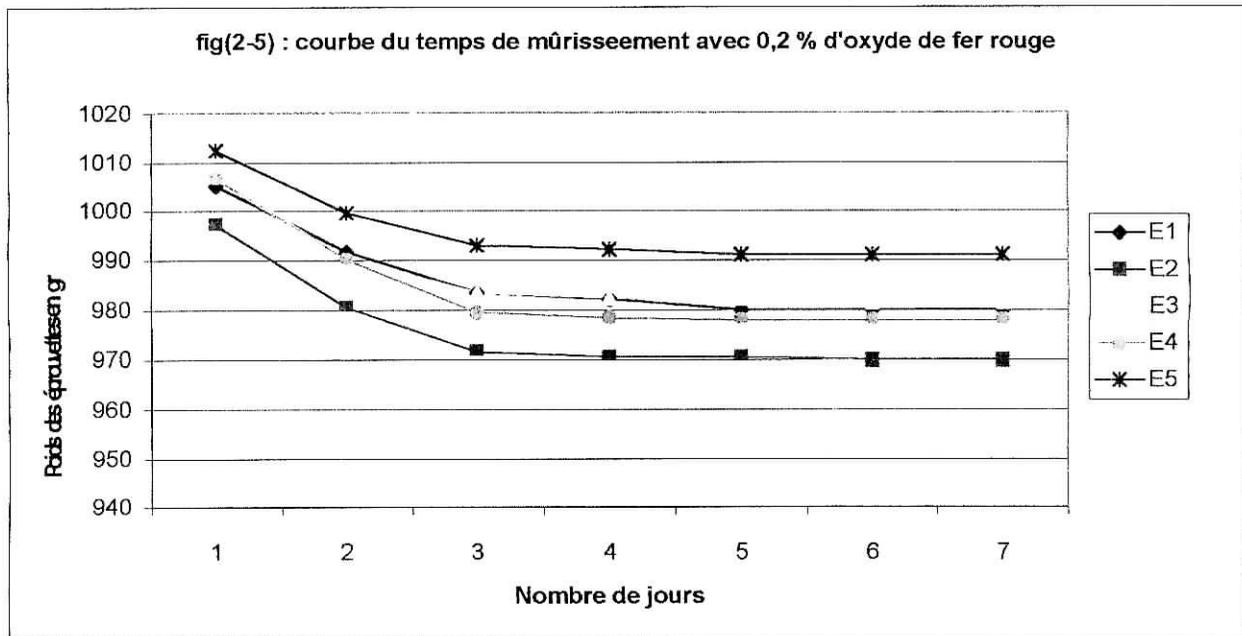
Les résultats du temps de mûrissement sont donnés dans le tableau (2-6) et illustrés par les figures (2-6),(2-7),(2-8)

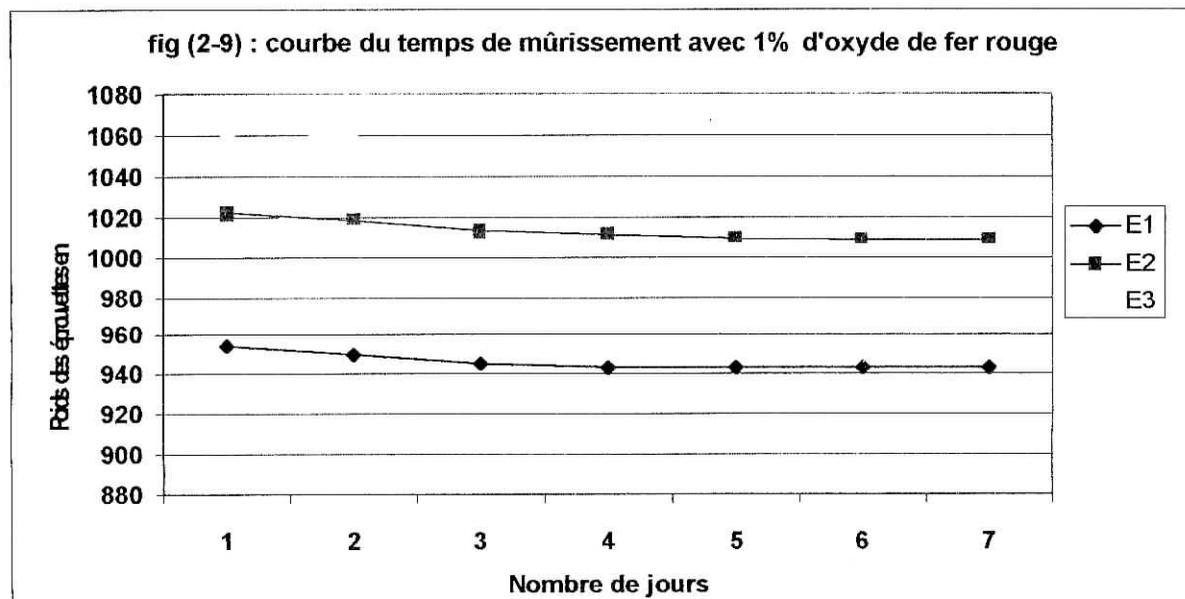
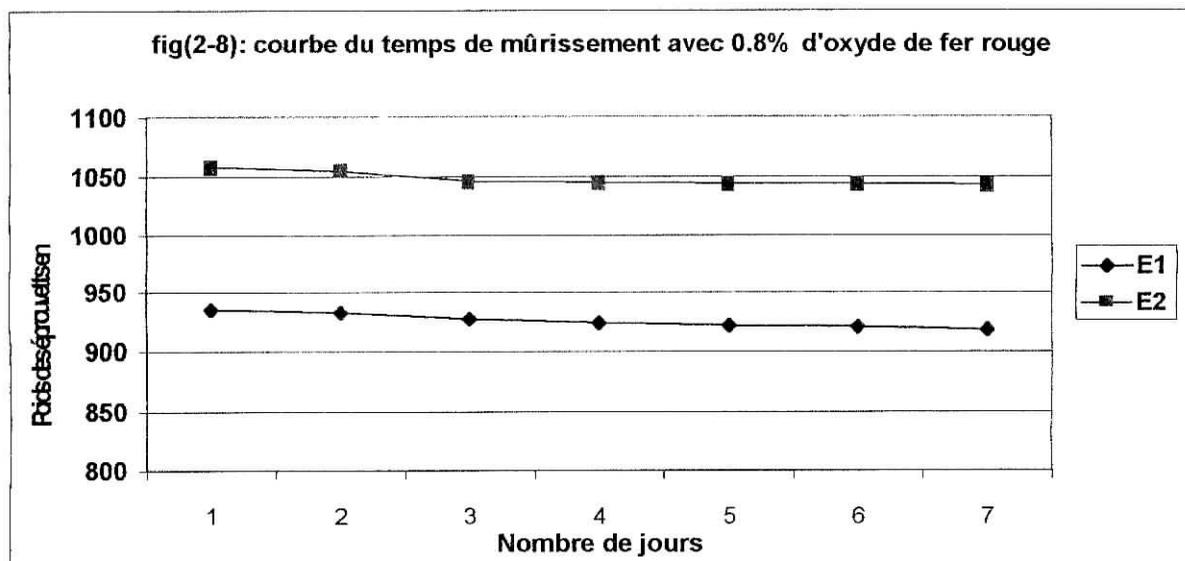
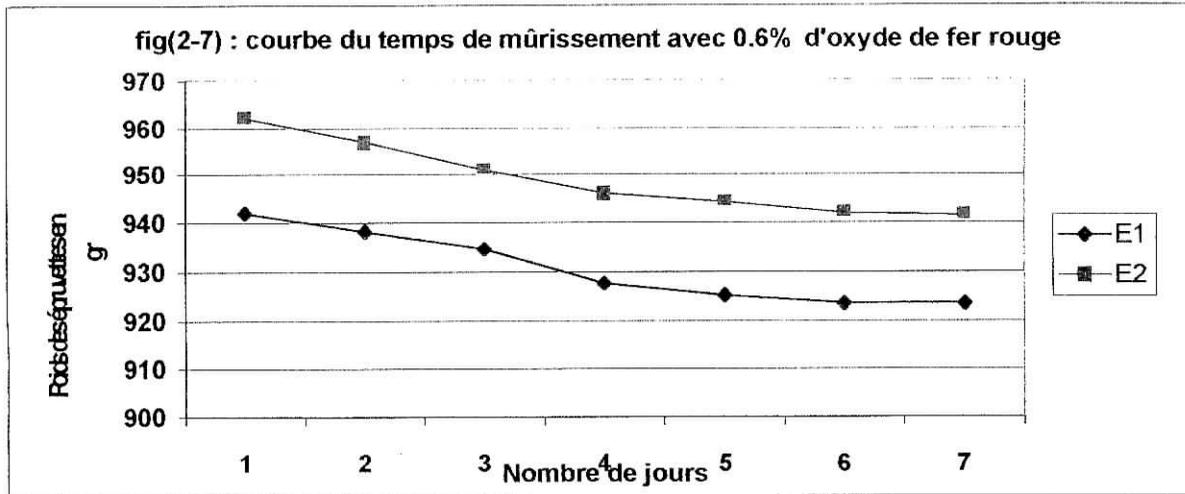
Avec	0,4%		0,6%		0,8%	
	E1	E2	E1	E2	E1	E2
1 ^{er} jour	970,0	1025,0	942,0	962,0	935,0	1058,0
2 ^{eme} jour	958,5	1012,5	938,0	957,0	932,0	1055,0
3 ^{eme} jour	950,5	1005,0	934,5	951,0	927,0	1046,0
4 ^{eme} jour	946,0	1001,0	927,5	946,0	923,5	1045,0
5 ^{eme} jour	944,0	999,0	925,0	944,0	921,0	1043,0
6 ^{eme} jour	944,0	999,0	923,5	942,0	920,0	1043,0
7 ^{eme} jour	944,0	998,0	923,5	941,5	918,0	1042,5

- Temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer rouge

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés dans le tableau (2-7) et illustrés par la figure (2-9)

	E1	E2	E3
1 ^{er} jour	954,0	1022,0	1063,0
2 ^{eme} jour	949,5	1018,0	1059,5
3 ^{eme} jour	944,5	1013,0	1054,0
4 ^{eme} jour	943,0	1010,5	1052,0
5 ^{eme} jour	943,0	1009,0	1051,0
6 ^{eme} jour	943,0	1008,0	1050,0
7 ^{eme} jour	943,0	1008,0	1050,0

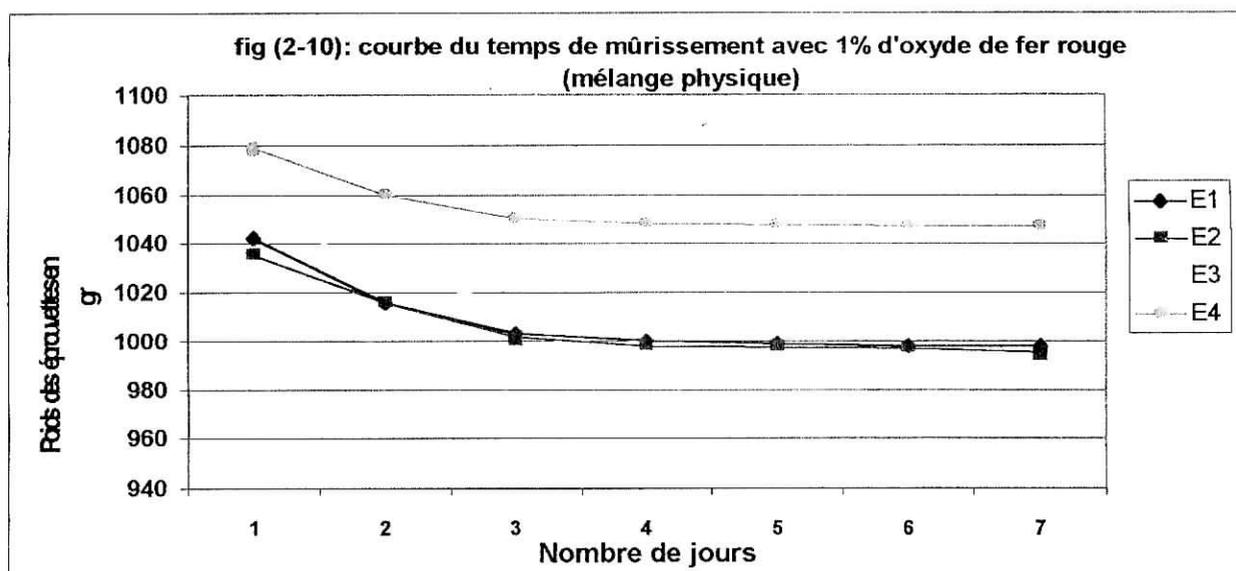




- Temps de mûrissement avec 1% d'oxyde de fer rouge (mélange physique)

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés dans le tableau (2-8) et illustrés par la figure (2-9)

	E1	E2	E3	E4
1 ^{er} jour	1042,0	1035,5	1056,0	1079,0
2 ^{eme} jour	1015,5	1016,0	1026,5	1060,0
3 ^{eme} jour	1001,5	1001,5	1015,5	1050,0
4 ^{eme} jour	1000,0	998,0	1012,0	1048,0
5 ^{eme} jour	999,0	997,0	1010,5	1047,5
6 ^{eme} jour	998,0	996,5	1010,0	1047,0
7 ^{eme} jour	997,5	995,0	1010,0	1047,0

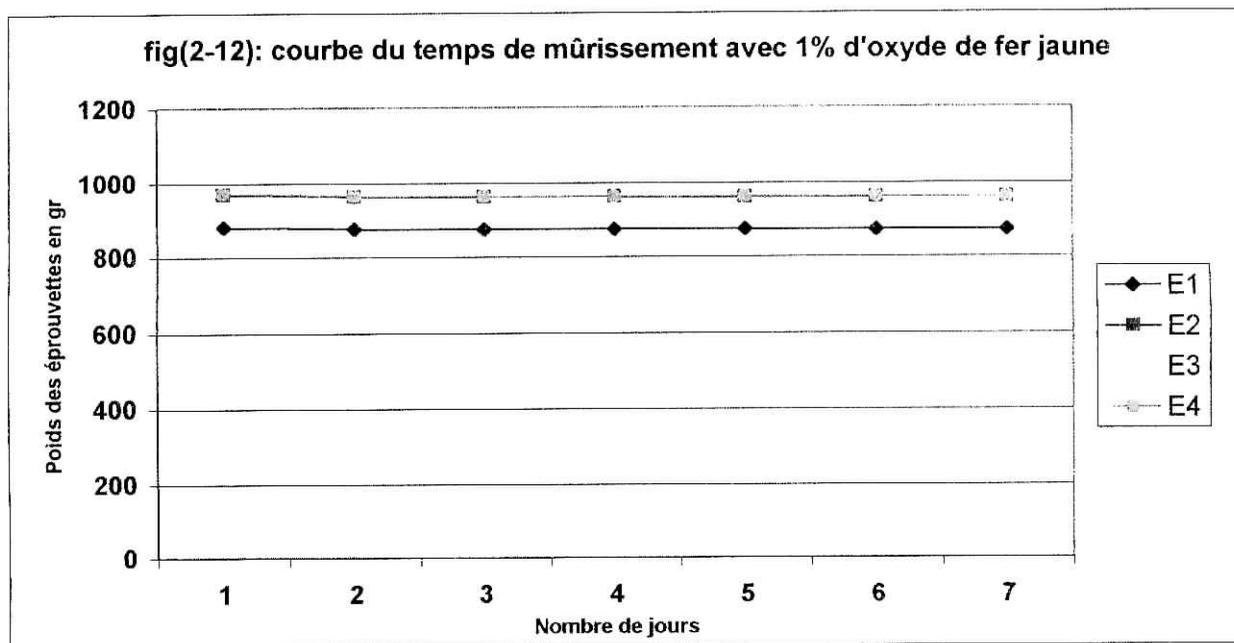
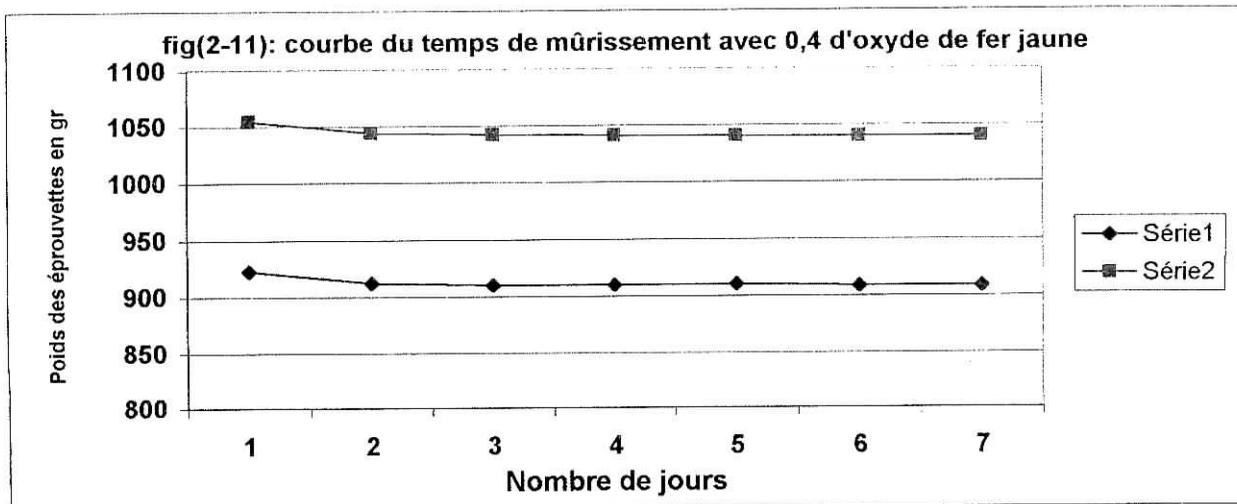


B - avec l'oxyde de fer jaune

-Temps de mûrissement avec 0.4% et 1% d'oxyde de fer jaune

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés dans le tableau (2-9) et illustrés par les figures (2-11) et (2-12)

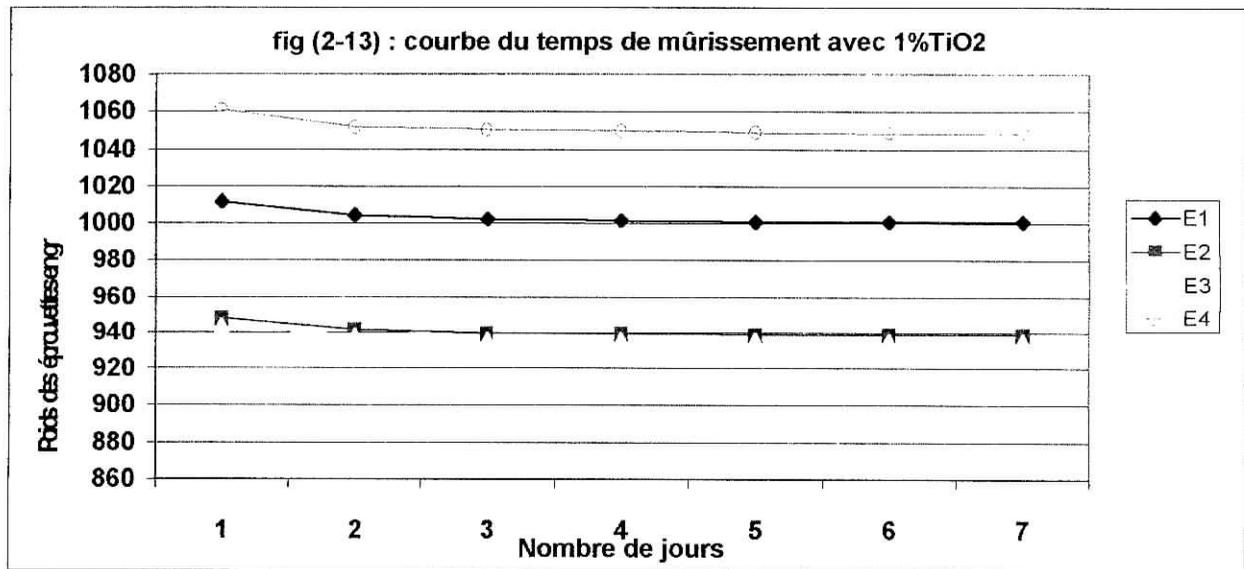
avec	0.4%		1%			
	1 ^{er} jour	922,0	1054,0	879,0	969,0	1096,0	971,5
2 ^{eme} jour	911,5	1043,0	875,5	964,0	1087,5	965,5
3 ^{eme} jour	909,5	1041,0	874,0	962,0	1085,0	963,5
4 ^{eme} jour	909,5	1040,0	873,5	961,0	1083,5	962,0
5 ^{eme} jour	908,5	1039,5	873,0	960,0	1082,0	961,5
6 ^{eme} jour	908,0	1039,0	872,0	960,0	1082,0	961,5
7 ^{eme} jour	908,0	1039,0	872,0	959,5	1081,5	960,0



C - Avec le Dioxyde de Titane TiO₂

Les résultats du temps de mûrissement sont donnés dans le tableau (2-10) et illustrés par la figure (2-13)

	E1	E2	E3	E4
1 ^{er} jour	1011,5	948,0	943,5	1061,0
2 ^{eme} jour	1004,0	941,5	937,5	1052,0
3 ^{eme} jour	1002,0	939,5	936,0	1050,0
4 ^{eme} jour	1001,5	939,0	935,5	1049,5
5 ^{eme} jour	1001,0	938,5	935,5	1049,0
6 ^{eme} jour	1001,0	938,5	935,5	1048,5
7 ^{eme} jour	1001,0	938,5	935,0	1048,5



Commentaire :

- L'utilisation de la 2^{eme} émulsion dont l'indice de rupture est de l'ordre de 195 nous a permis d'obtenir une bonne maniabilité et un bon enrobage et avec les différents mélanges chimiques.
- L'observation tirée avec le mélange physique est que la rupture est très rapide et que pour faire l'enrobage une teneur en eau d'apport de l'ordre de 1% est nécessaire.

2.5-Interprétation

-A partir des résultats présentés dans les tableaux (2-5), (2-6), (2-7), (2-8), (2-9) , (2-10), (2-11) et leurs illustrations par les figures (2-5),(2-6),(2-7),(2-8),(2-9),(2-10),(2-11), (2-12), (2-13), on remarque que le temps de mûrissement se limite à 5 jours et qu'il y' a une chute du poids des éprouvettes au début avec des pourcentages faibles (0,2%-0,4%-0,6%), en revanche avec des pourcentages plus élevés d'oxydes de fer la chute n'est pas vraiment importante. Ce phénomène peut être expliqué par le faite que l'évaporation de l'eau de l'émulsion est due essentiellement aux conditions climatiques c-à-d après confectionnement des éprouvettes et rupture de l'émulsion sur les granulats.

En ajoutant 0,8% et 1% d'oxyde de fer, l'évaporation de l'eau de l'émulsion provoquée par l'oxydation (l'oxyde de fer et l'émulsion) est importante, l'émulsion avec ce pourcentage ajouté contient peu d'eau comparé à l'émulsion avec 0,2% et 0,4% et on remarque que la chute du poids après rupture de l'émulsion n'est pas importante.

2.6-Performances mécaniques

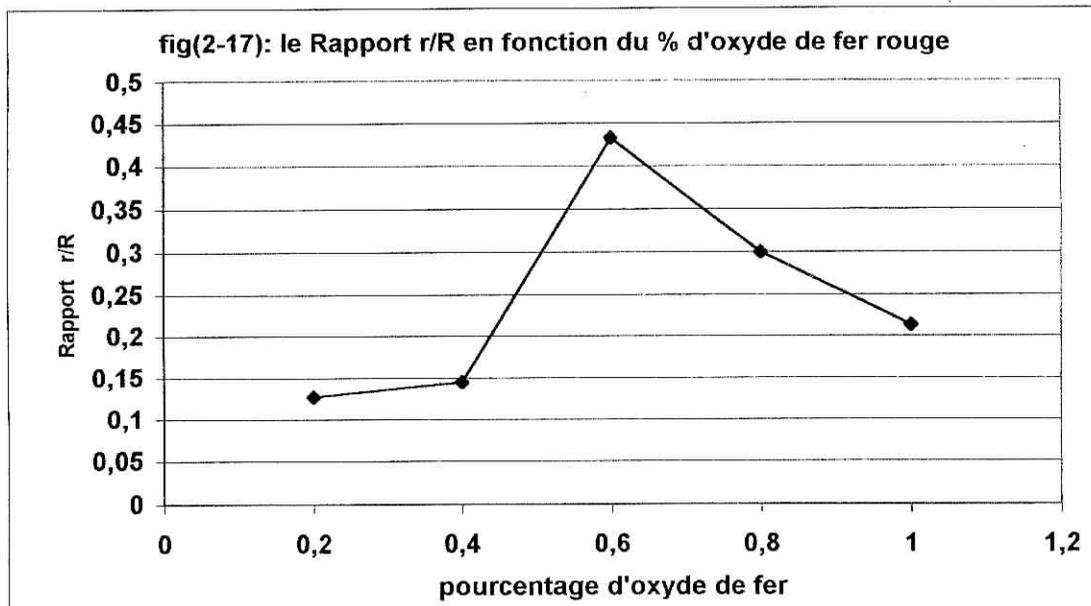
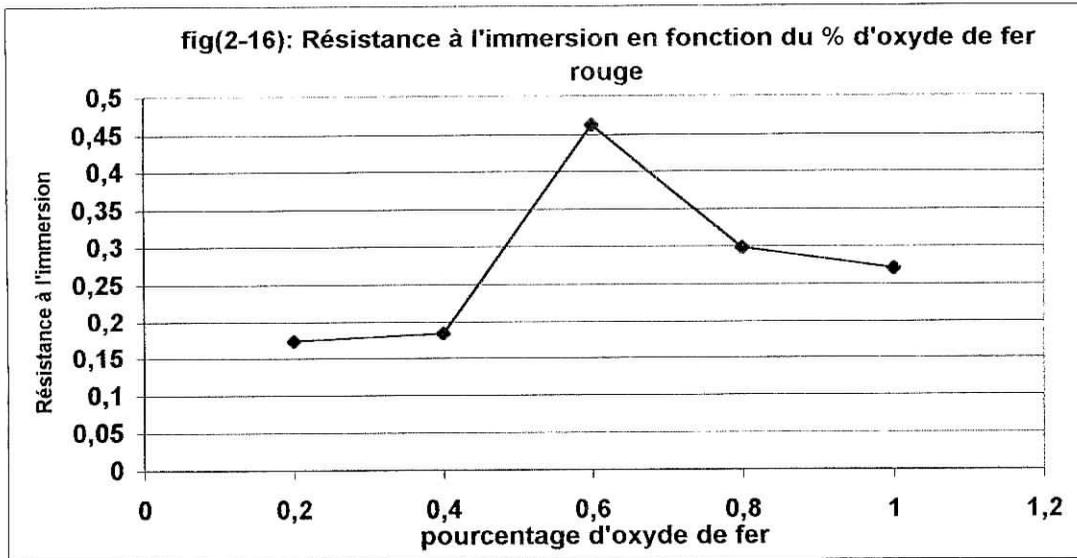
Les résultats de l'essai DURIEZ pour les mêmes pourcentages en pigment et avec les 3 couleurs sont représentés dans les tableaux (2-12) et (2-13)

**Tableau (2-11) : Résultats de l'essai DURIEZ
Pour les éprouvettes avec l'oxyde de fer rouge**

Teneur en pigment %	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1% mélange physique
Teneur en bitume %	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43
Teneur en émulsion %	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38	7,38
Densité apparente	2,40	2,41	2,43	2,45	2,45	-
Densité théorique	2,53	2,53	2,53	2,53	2,53	-
Compacité %	94,84	95,21	96,08	96,76	96,6	-
Pourcentage des vides %	5,16	4,79	3,92	3,24	3,31	-
Résistance à l'immersion 18°C (r), en MPa	0,173	0,183	0,462	0,299	0,271	0,598
Résistance à l'air 18°C (R), en MPa	1,369	1,267	1,07	0,999	1,27	1,9
Rapport (r/R)	0,126	0,144	0,432	0,299	0,213	0,315

Tableau (2-12) : Résultats de l'essai DURIEZ pour les éprouvettes avec oxyde de fer jaune et le Dioxyde de titane

Type de pigment	Oxyde de fer Jaune		Dioxyde de titane (TiO ₂)
	0,4	1	1
Teneur en pigment %	0,4	1	1
Teneur en bitume %	4,43	4,43	4,43
Teneur en émulsion %	7,38	7,38	7,38
Densité apparente	2,38	2,39	2,40
Densité théorique	2,53	2,53	2,53
Compacité %	94,19	94,46	94,78
Pourcentage des vides %	5,18	5,54	5,22
Résistance à l'immersion 18°C (r), en MPa	0,350	0,549	0,632
Résistance à l'air 18°C (R), en MPa	0,416	0,999	0,632
Rapport (r/R)	0,841	0,548	0,649



2.7-Interprétation

- On remarque que les compacités des éprouvettes avec différents pourcentages d'oxyde de fer sont relativement élevées par rapport aux éprouvettes sans oxyde de fer, ces valeurs sont dues à l'augmentation du pourcentage des fines (les pigments), nous avons donc obtenu un mélange plus dense que l'initial (sans pigment).
- A partir de la figure (2-15), on remarque que la résistance à sec minimale se trouve à 0,8% d'oxyde de fer.
- A partir de la figure (2-16), on remarque que la résistance à l'immersion maximale se trouve à 0,6% d'oxyde de fer à mon sens le problème d'adhésivité ne se pose pas avec cette émulsion (l'émulsifiant a joué son rôle comme dope d'adhésivité).
- Le rapport r/R est également maximum pour un pourcentage d'oxyde de fer égal à 0,6%.

2.8- Résultats de la coloration

Les résultats de la coloration des éprouvettes sont présentés ci-dessous

Tableau (2.13) : La nuance de couleur

Type de Pigments	Oxyde de fer rouge						Oxyde de fer jaune		Dioxyde de titane
	0.2%	0.4%	0.6%	0.8%	1%	1% *	0.4%	1%	1%
Couleur de l'émulsion	Rouge ocre	Rouge ocre	rouge clair	Rouge plus clair	Bonne coloration rouge	-	noir	Jaune à tendance verdâtre	
Couleur de l'éprouvette	noir	Rouge ocre	Légère amélioration de la couleur	Rouge clair	Bonne coloration Rouge clair	Bonne coloration Rouge clair	noir	Jaune à tendance Verdâtre	

*mélange physique (une légère amélioration de l'éprouvette par rapport au mélange chimique).

chapitre3

les enrobés colorés à chaud

3.1- Introduction

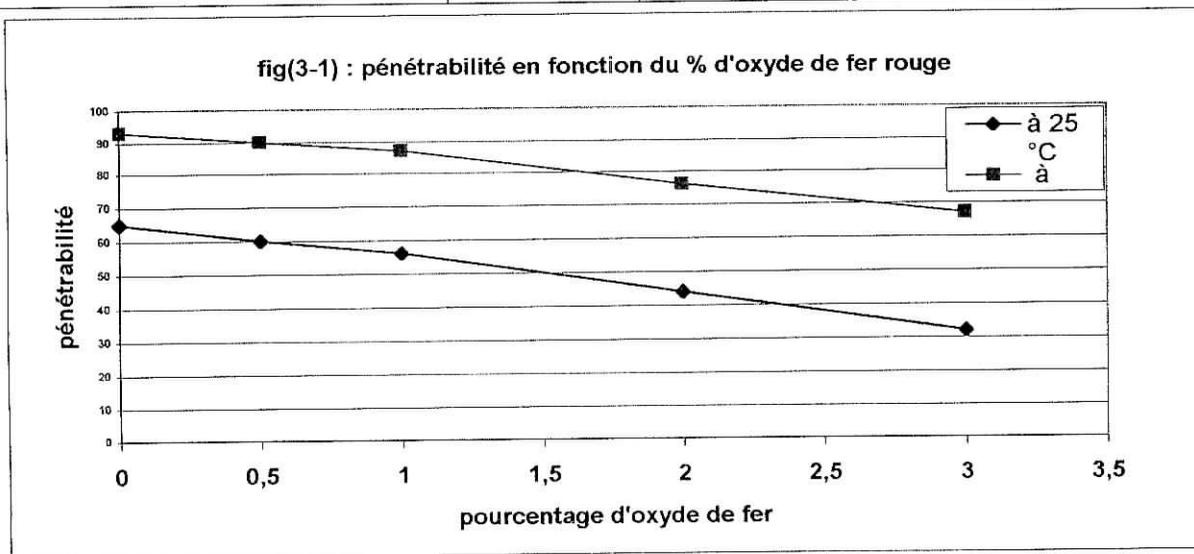
Dans ce chapitre, Nous allons faire la pigmentation de bitume pur classique, étudier les caractéristiques technologiques des bitumes pigmentés et détecter la nuance des couleurs à différents pourcentages du pigment.

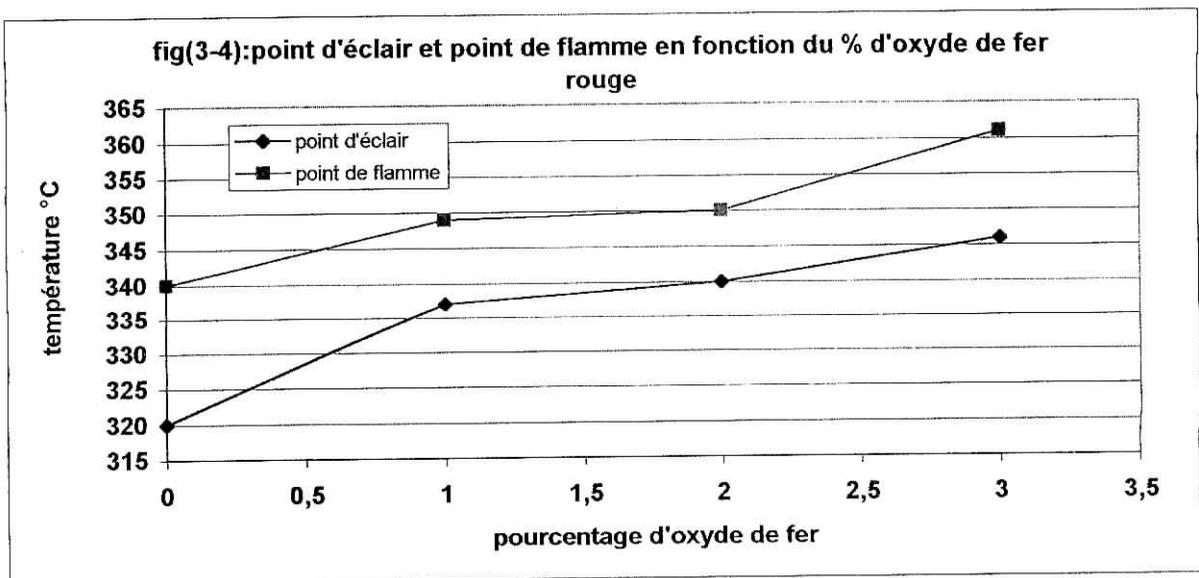
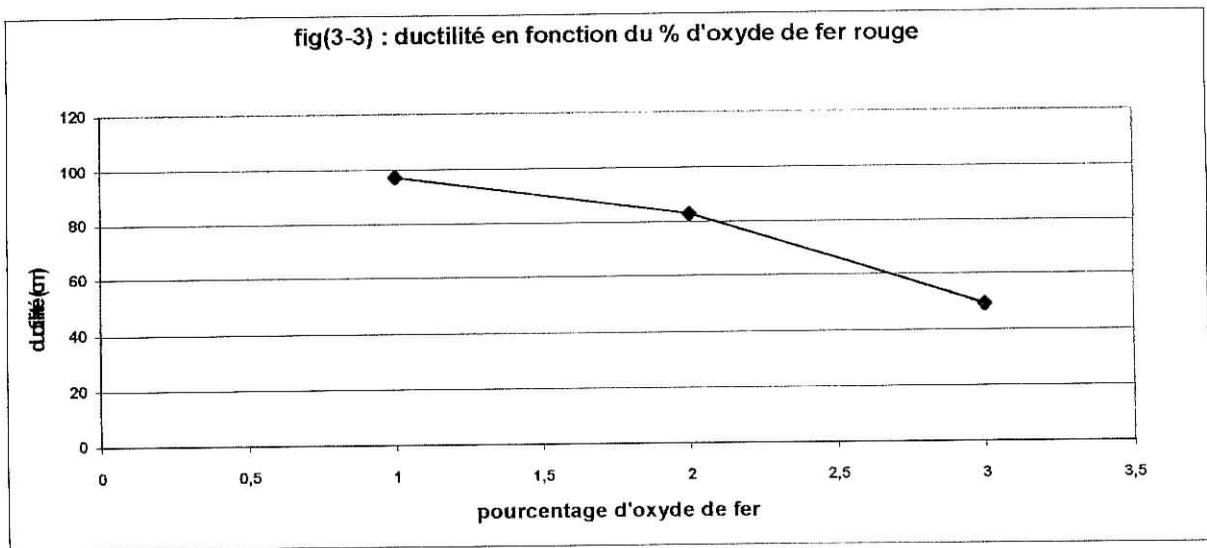
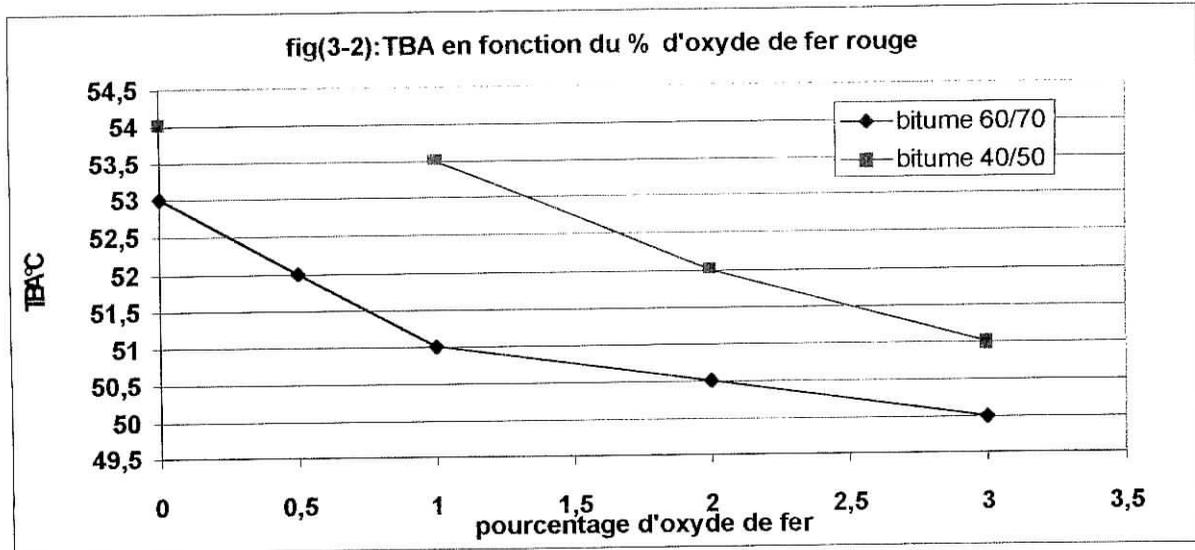
3.2- Caractéristiques technologiques et couleur de bitume avec l'oxyde de fer rouge

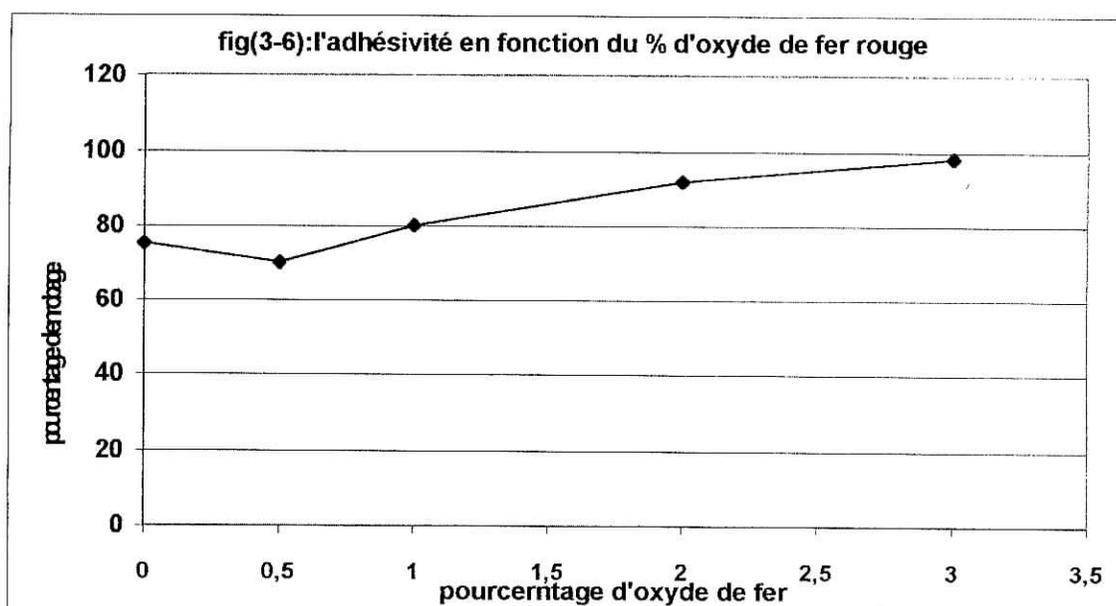
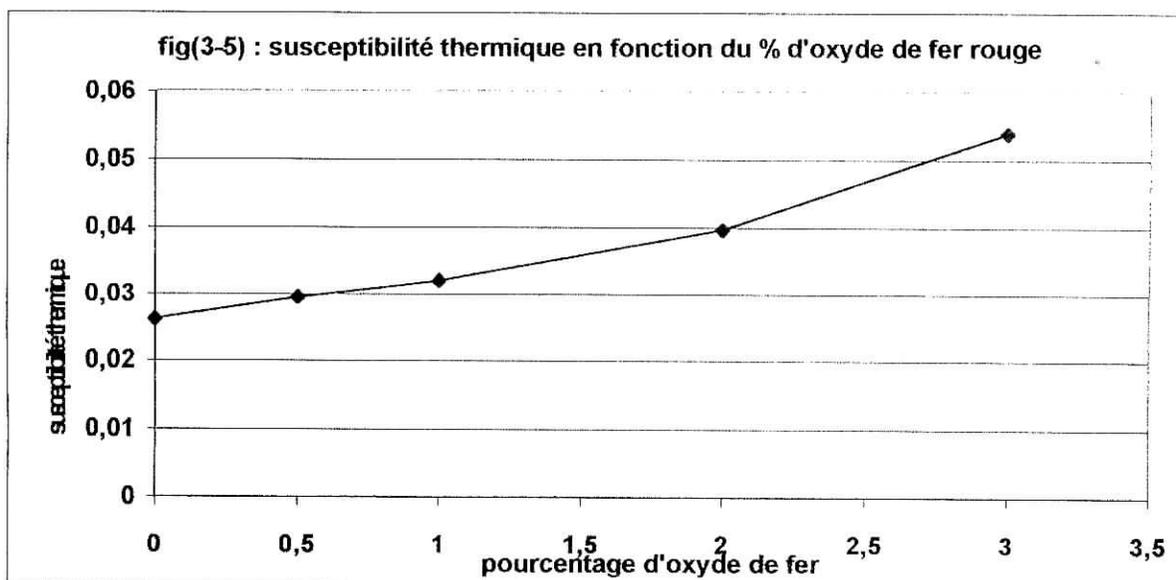
Les résultats d'identification de bitume modifié avec l'oxyde de fer sont résumés dans le tableau (3-1) et illustrés par les figures (3-1), (3-2), (3-3), (3-4), (3-5), (3-6)

Tableau (3-1) : caractéristiques technologiques des bitumes modifiés avec l'oxyde de fer

Pourcentage d'oxyde de fer %		0,5	1	2	3
Pénétrabilité	à 25°C	60	56	44	32
	à 31°C	90	87	76	67
Susceptibilité thermique		0,026	0,0293	0,0395	0,0534
TBA °C		52	51	50,5	50
Ductilité cm		>100	97	83	49
Point d'éclair °C		320	337	340	346
Point de flamme °C		340	349	350	360
Densité relative		-	1.281	1.36	-
Couleur de bitume		Rouge ocre	Rouge clair	Rouge clair	bonne coloration
Couleur de l'éprouvette		Rouge ocre	Amélioration de la couleur	Rouge clair	Rouge clair







3.3- Interprétation :

- Sur la figure (3-1), nous remarquons que la dureté de bitume exprimée par la pénétrabilité augmente avec le pourcentage de l'oxyde de fer qui est un élément durcisseur. Pour les pourcentages élevés (2 à 3%) la pénétrabilité est voisine voir inférieure à 40 ce qui correspond à une classe de bitume non utilisable en Algérie.

- Sur la figure (3-2), nous remarquons que la TBA diminue avec le pourcentage d'oxyde de fer, c'est à dire qu'elle est proportionnelle à la dureté de bitume, cette constatation reste valable avec un bitume 40/50 pour les mêmes pourcentages d'oxyde de fer. Ce qui n'est pas le cas avec les bitumes classiques (sans pigment).

- Sur la figure (3-3), nous remarquons que la ductilité diminue au fur et à mesure que nous augmentons le pourcentage d'oxyde de fer. Comme les bitumes classiques, la ductilité des bitumes pigmentés suit la même loi de variation.

- Comme pour les bitumes classiques, le point d'éclair est proportionnel à la dureté de bitume .figure (3-4).

- Sur la figure (3-5), nous remarquons que la consistance du bitume augmente avec le pourcentage d'oxyde de fer.

- Sur la figure (3-6), nous remarquons que l'adhésivité passive réalisée à différents pourcentages d'oxyde de fer augmente avec ce dernier contrairement à l'émulsion.

3.4- Performances mécaniques

Les résultats de l'essai DURIEZ et de l'essai MARSHALL avec un pourcentage de 0,5% et 1% en poids pondéral sont présentés dans les tableaux (3-2) et (3-3)

Tableau (3-2) : Résultats de l'essai DURIEZ

Teneur en pigment %	0,5	1
Teneur en bitume %	4,43	4,43
Densité apparente	2,385	2,378
Densité théorique	2,532	2,533
Compacité %	94,1	93,85
Pourcentage des vides %	5,9	6,15
Résistance à l'immersion 18°C (r), en MPa	0,93	1,11
Résistance à l'air 18°C (R), en MPa	2,81	2,62
Rapport (r/R)	0,332	0,423

Tableau (3-3) : Résultats de l'essai MARSHALL

Teneur en pigment %	0,5	1
Teneur en bitume %	4,43	4,43
Densité apparente	2,35	2,41
Densité théorique	2,532	2,533
Compacité %	92,81	95,11
Pourcentage des vides %	7,19	4,88
Stabilité MARSHALL (KN)	4,3	4,46
Stabilité MARSHALL corrigée (KN)	3,59	3,39
Fluage MARSHALL (mm)	3,9	3,8

Module de rigidité

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour différents pourcentages d'oxyde de fer rouge sont représentés dans les tableaux (3-6) et (3-7)

Tableau (3-4) : Résultats de module de rigidité avec 0,2% d'oxyde de fer rouge

Teneur en oxyde de fer rouge (%)	0,2
Teneur en liant (%)	4,43
Nombre de pulsation	2
Hauteur de l'éprouvette (mm)	72
Diamètre de l'éprouvette (mm)	101
température de l'essai (°C)	20
Charge verticale en (KN)	0,02
Contrainte horizontale (KPa)	1,5
Déformation horizontale (microns)	0,2
Temps de montée de charge (ms)	91
Coefficient de Poisson ν	0,35
Module de rigidité (MPa)	740

Tableau (3-5) : Résultats de module de rigidité avec %0,5 d'oxyde de fer rouge

Teneur en oxyde de fer rouge (%)	0,5
Teneur en liant (%)	4,43
Nombre de pulsation	2
Hauteur de l'éprouvette (mm)	71
Diamètre de l'éprouvette (mm)	10
température de l'essai (°C)	20
Charge verticale en (KN)	0,09
Contrainte horizontale (KPa)	7,70
Déformation horizontale (microns)	0,60
Temps de montée de charge (ms)	92
Coefficient de Poisson ν	0,35
Module de rigidité (MPa)	1280

Tableau (3-6) : Résultats de module de rigidité avec %1 d'oxyde de fer rouge

Teneur en oxyde de fer rouge (%)		1			
Teneur en liant (%)		4,43			
Hauteur de l'éprouvette (mm)		73			
Diamètre de l'éprouvette (mm)		10			
température de l'essai (°C)		20			
Coefficient de Poisson ν		0,35			
<i>1^{er} essai</i>					
N° pulsation	Charge verticale (KN)	Contrainte horizontale (KPa)	Déformation Horizontale (micron)	Temps de montée de charge (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	0,00	0,3	0,1	1	0
2	4,81	419,2	41,3	104	988
3	2,51	221,2	20,3	126	1058
4	0,42	36,8	2,3	114	1529
5	0,02	4	0,0	92	0
moyenne	156	135,8	12,8	87,4	715
<i>2^{eme} essai</i>					
N° pulsation	Charge verticale (KN)	Contrainte horizontale (KPa)	Déformation Horizontale (micron)	Temps de montée de charge (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	1,42	123,9	5,2	128	2334
2	1,46	127,0	5,3	125	2334
3	1,29	112,8	4,7	124	2330
4	1,3	113,4	4,7	121	2337
5	1,5	130,9	5,6	121	2259
moyenne	1,39	121,6	5,1	123,8	2319

Commentaire :

- Lors du compactage des éprouvettes MARSHALL, nous avons constaté qu'il y a fragmentation des grains même à l'intérieur de l'éprouvette. Ceci peut être expliqué par le fait que le compactage dynamique n'est pas adapté pour les enrobés ouverts où la surface de contact entre les grains est relativement réduite par rapport à un enrobé dense.
- L'hétérogénéité des résultats (tableau (3-7)) et les difficultés d'exécution de l'essai de module de rigidité (le NAT n'a pas pu appliquer les cinq pulsations) peuvent être expliqués par le fait que l'essai au NAT n'est pas adapté pour les enrobés ouverts. Comme les enduits superficiels on ne tient pas compte de l'épaisseur de la couche réalisée avec un enrobé ouvert

Conclusion Générale et Recommandations

Conclusion générale et recommandations

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'influence du pourcentage d'oxyde de fer, dans la coloration des liants hydrocarbonés (bitume et émulsion) et sur leur caractéristiques technologiques, ainsi que sur les performances mécaniques du béton bitumineux fabriqué avec un liant pigmenté

D'après les résultats obtenus, nous pouvons conclure que les émulsions peuvent être colorées par des pigments tels que ceux utilisés (rouge, jaune, blanc). La coloration dans un mélange d'enrobé à l'émulsion est envisageable en ajoutant 1% d'oxyde de fer rouge pour la couleur ou 1% de Dioxyde de Titane pour la couleur Grise en poids pondéral.

Il faut noter qu'il a été impossible d'obtenir la couleur jaune même avec des pourcentages supérieurs à 1% d'oxyde de fer jaune. D'autre part, nous avons trouvé une difficulté de malaxage (émulsion + pigment) due au fait que la densité du pigment jaune est plus faible relativement à l'oxyde de fer rouge et par suite une surface spécifique plus élevée, ce qui à poser un problème de rupture prématurée de l'émulsion qui était plus importante pour un pourcentage supérieur à 1%. Le prix de ce pigment est relativement élevé par rapport à l'oxyde de fer rouge ce qui limite son domaine d'utilisation dans la technique des enrobés colorés. Il peut être utilisé comme ajout en faible pourcentage avec l'oxyde de fer rouge ou le Dioxyde de Titane pour obtenir d'autre nuance de couleur.

Du point de vue caractéristiques technologiques de l'émulsion pigmentée (indice de rupture, viscosité,...), nous avons remarqué que l'oxyde de fer rouge incorporé dans l'émulsion peut modifier ces caractéristiques, par une chute importante de l'adhésivité, le PH de l'émulsion est mis en cause. Pour chaque émulsifiant il y'a un intervalle de PH de celui ci où l'adhésivité est plus grande, il est donc intéressant de suivre l'évolution du PH en fonction du pourcentage d'oxyde de fer et de déterminer l'intervalle de «PH» où l'adhésivité est la plus grande

En ce qui concerne les performances mécaniques, la variation de la résistance à sec en fonction du pourcentage d'oxyde de fer n'est pas linéaire ; il est intéressant de faire une formulation en fixant le pourcentage d'oxyde de fer dans le mélange. La couleur finale de l'enrobé sera fonction de la teneur en liant optimale.

Les résistances à sec avec l'émulsion pigmenté ne sont pas loin des résistances à sec sans pigment. Mais il faut noter que nous avons remarqué un effritement des éprouvettes au jeune

âge dû à l'utilisation d'une émulsion trop stable. Le recours à une émulsion à base de bitume pigmentables reste la meilleure solution du point de vue coût et coloration.

L'étude des caractéristiques technologiques des bitumes modifiés par le pigment rouge, nous a permis de constater que l'addition de l'oxyde de fer dans le bitume provoque un changement radical dans leur comportement. D'autres études afin d'affirmer ou infirmer ces constatations s'avèrent indispensables.

Les résultats de la coloration sont très satisfaisants, nous pouvons dire qu'il est plus facile de faire la coloration à chaud qu'à froid.

Nous avons remarqué aussi, que pour une même teneur en liant et pigment, un enrobé à froid a donné une couleur claire, l'enrobé à chaud quant à lui a donné une couleur plus foncée (rouge ocre). Donc l'émulsifiant et la température d'enrobage sont des paramètres qui influent sur la nuance de la couleur, il est donc intéressant de mener d'autres études avec d'autres types d'émulsifiant ou d'acide, et un bitume plus mou (température d'enrobage plus faible)

L'emploi des résines (résine époxyde disponible en Algérie) est intéressant du fait qu'il nécessite un pourcentage de pigment faible et donne des performances mécaniques intéressantes.

Enfin cette étude nous a permis d'acquérir une expérience et un apprentissage dans le domaine des enrobés colorés, nous pouvons donc recommander d'autres études afin de mieux caractériser l'enrobé coloré soit en terme de résistance, soit en terme de coloration.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **G.JEUFFEROY**. Conception et construction des chaussées, TOME2 .édition EYROLLES 1985
- [2] méthode de formulation et contrôle de qualité des enrobes bitumineux- séminaire résidentiel, olivet (France) septembre 1986
- [3] **MINISTRE DES TRANSPORTS**, spécifications relatives aux granulats pour chaussées
- [4] **MINISTRE DES TRANSPORTS. Direction des Routes**. Mémento des spécifications françaises chaussées. FEVRIER 1984.
- [5] **M.HaRLIN**. couche de roulement : choix et évolution des techniques .Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées. PARIS 1992
- [6] **NADIR LARADI**. caractéristiques de bitumes utilisés en Algérie. **bulletin de liaison. LCPC. N°225.mars-AVRIL2000.PP3-11**
- [7] **Direction des Routes .CTTP**. Recommandation sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud. Novembre 2000
- [8] Bitumes Techniques et utilisations. **SHELL BITUME 1991**
- [9] **Direction des Routes. CTTP**. vulgarisation de l'emploi des émulsions .rapport final de la phase 1.2 définition des chantiers et essais sur matériaux. Juillet 1998
- [10] les émulsions de bitume. **bulletin de liaison. LCPC. spécial W –Juin 1974**
- [11] **J.HUET**. la rupture des émulsions bitumineuses. définition et essai. Centre de Recherche Routières, Belgique. **BITUEMINFO 54/1988**.
- [12] service d'études technique des routes et autoroutes (SETRA). Le savoir –faire français en matière d'émulsion de bitume. Edition Montreuil offset1989.
- [13] **JEAN BERTHIER**. Granulats et liants routiers. Technique de l'ingénieur, traité construction. **C903-1 AVRIL 2002**
- [14] **M. COTTOT, E. GODARD**. Asphaltes clairs la ville en couleurs. RGRA. N°784.mai 2000
- [15] **M. COTTOT, E. GODARD** .traitement de surface et association avec d'autres matériaux. RGRA. N°784.mai 2000
- [16] **J.J. DOMEQ, D.SICARD**. Les produits colorés à base de bitume ou de résines pour revêtement de voirie urbaine. RGRA. N° 730.juin1995.
- [17] **PH. ZUNDEL**. Espace public voies piétonnes : une place de choix pour l'asphalte. Asphalte –information 2000.
- [18] **SETRA. CSTR**. note d'information : coloration des revêtements routières et sécurité routière. Mars 1998
- [19] **H. RIBIERRE**. la place de Biscarosse plage : un espace vivre. Le Liant N°25. Automne2001
- [20] Guide technique « Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en techniques routières »- AIPCR, comité technique des routes souples (C8)- LCPC- septembre 1999- rédaction par un groupe de travail du comité 8
- [21] « Quand la sécurité et esthétiques se conjuguent » Route Actualité. N°58 octobre 1996
- [22] **G.Paul-Claud, j.LESAGE**. Sécurité et esthétiques pour les chaussées urbaines, perspectives nouvelles »-RGRA décembre 1992
- [23] « les revêtements clairs, une solution lumineuse » Route Actualité. N°56 .JUIIET - AOUT 1996
- [24] « chaussée claire à base de Mexphalte C pour une tranchée couverte en suisse » Route Actualité. N°21-FEVRIER 1993
- [25] « les voies express sous la ville : la circulation urbaine du XXI^e siècle Route Actualité. N°32. MARS 1994

- [26] « sécurité routière renforcée, consommation électrique réduite : LES TUNNELS GENEVOIS ADOPTENT UN REVETMENT EN ENROBES BLANCS ». Le Liant N°11
- [27] « MEXPHALTE C pour étanchéité de Barrage : une première mondiale ». le liant N°14
- [28] «une nouvelle réalisation d'accotements différenciés cyclables dans la zone commerciale d'Aubagne : BOUCHES –DU-RHÔNE : la couleur, c'est la vie ». Le Liant N°15
- [29] **BONDIL ROBERT, NICOLAS ANDRE** « renforcement de la sécurité du tunnel de Las Planes »-RGRA JUIN 1999.
- [30] CIGRAY JC, GENARDINI C, JANICOT L. « bétons bitumineux clairs sur le périphérie parisien » RGRA N°735-1995
- [31] « le liant de synthèse translucide à son Zénith » Route Actualité août 1999
- [32] **RAURE Bernard, SERRES Anne-Marie** « couleur et clarté des surfaces routières » RGRA JUILLET 1993.
- [33] **J.P. CHRISTORY** « phénomène de monde : les revêtements bitumineux colorés »Revue Génie Urbain N°402-décembre 1993
- [34] **P.BENES, J.P.SERFASS** « enrobés modifiés par incorporation de particules de verre : propriétés visuelles et photométriques »
- [35] **J.CONAN –J.P.MARCHARD** « des revêtements routiers urbains innovant » .eurobitume congress 1996
- [36] **M.BRAILLY, C.RENNESSOU** « coloration des revêtements routières et sécurité routière » RGRA
- [37] **MCORFDIR** « produit de marquage de chaussée visibles de nuit par temps de pluie » RGRA
- [38] **P.LAYE, M.BOUBILA** « des enrobés colorés à Cavaillon pour l'esthétique et la sécurité » RGRA N°699, septembre 1992
- [39] **PAUL DE CLERK** « couleur aspect esthétiques et fonctionnels de l'art à l'industrie » centre de recherche routières
- [40] **B.MANDAGARAN** « la couleur au service de la sécurité » RGRA N°694, mars 1992
- [41] **M.St.JACQUES, Y.BROSSEAUD** « REVETEMENT COLORES : EXPERIENCES FRANÇAISES ET DEVELOPPEMENT POSSIBLE Au CANADA » **2^e conférence spécialisée en génie des matériaux de la société canadienne de génie civil –Montréal, Québec, Canada – 5à 8 juin 2002**
- [41] **DANIEL WTART** « colorants liquides à base de dispersions pigmentaires » technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites **AM3 235-1** AVRIL 2002
- [42] **ROBERT DEFOSSE** « adjuvants des plastiques : colorant et pigments » technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites **A 3 233-1** AVRIL 2002
- [43] **GUY SCHNIDER** « résines vinylestrs » technique de l'ingénieur, traité matériaux non métalliques **A 3 450-1** AVRIL 2002
- [44] **PIERRE BARDONNET** « résines époxydes composantes et propriétés » » technique de l'ingénieur traité plastiques **A 3 465-1**
- [45] **J.C.BULLAS** « The BBA Assessment of SightGRIP coloured aggregate» highways & transportation JANUARY/FEGRURAY 1998
- [46] **G. BÜCHNER** « revêtements colores : pigments pour la coloration des matériaux de construction » **CRR** Février 2000
- [47] **J.HORCMANS** « revêtements colores : produits de revêtement routière colores en béton qualité –normalisation –certification »
- [48] **Z. AFIR** « les enrobés colorés » mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Nationale Polytechnique d'Algérie. 2002

ANNEXES

Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à froid à l'émulsion de bitume

NFP 98-251-4 OCTOBRE 1992

1-domane d'application

La présente norme spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à froid à l'émulsion de bitume à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes.

Il permet également de déterminer le pourcentage de vides du mélange hydrocarboné dans les conditions de compactage définies et d'appréhender une forme de susceptibilité thermique. La présente norme s'applique aux mélanges hydrocarbonés à froid à l'émulsion de bitume fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier de dimension D au sens de la norme P18-101 inférieure ou égale à 31,5cm

2-principe de l'essai

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique pour calculer le pourcentage de vides.

Les autres éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres.

L'essai se pratique généralement à 18°C, ce pendant il peut être aussi réalisé à trois températures : à 0°C, à 18°C, et à 50°C, pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné.

3-appareillage

3-1-appareillage spécifique

Moules et pistons :

-mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$

Un minimum de 12 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur $80\text{mm} \pm 0,1\text{mm}$ et de hauteur minimale de 190mm. Des pistons de diamètre extérieur $79,8\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$.

3-2 appareillages non spécifiques

Presses :

- presse permettent le compactage à double effet et le maintien d'une charge de 60KN $\pm 0,5\%$ pendant 5 min pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$.
- 1 presse à vitesse d'avancement moyen à vide réglé à la valeur de $1\text{ mm/s} \pm 0,1\text{mm/s}$, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort en cours d'essai d'exactitude relative $\pm 1\%$.

4-préparation des éprouvettes

Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué en une seule fois pour les mélanges de $D < 14\text{mm}$ et peut être fabriqué en deux fois pour les autres mélanges selon la norme NFP 98-250-13 « fabrication des mélanges hydrocarbonés en laboratoire »

4-1 remplissage des moules

Les éprouvettes ont une masse de 1000g (1+W) $g \pm 1g$ dans le cas des mélanges

hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$.

4-2 compactages des éprouvettes

Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet. Pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$: $60\text{KN} \pm 0,5\%$. La charge doit être atteinte en 60 s maximum et maintenue entre 300 et 305s. Au bout de ce temps, l'application de la charge est interrompue

Les éprouvettes sont démoulées entre 12 et 24 h après confection soit le jour $j+1$

5-mode opératoire

5-1 vérification des éprouvettes

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1g près essuyage rapide soit M_{j+1}

5-2 Maturation des éprouvettes

Les éprouvettes sont conservées pendant 7j à 18°C et à $50^\circ\text{C} \pm 10\%$ d'humidité relative.

Au jour $j+8$, les éprouvettes sont pesées à 1g près, soit M_{j+8}

La hauteur et le diamètre mesuré à 0.1mm près sur trois zones différentes. On calcule ensuite MVA des éprouvettes à partir des mesures géométriques. Si la MVA d'une éprouvette s'éloigne de la moyenne de $\pm 2\%$ elle est rejetée. Si la MVA de plus de deux éprouvettes s'en éloigne, la série complète est rejetée.

5.2.1-répartition des éprouvettes

A partir des masses volumiques apparentes géométriques mesurées pour chaque température d'essai, les éprouvettes sont réparties en trois lots homogènes d'éprouvettes. La MVA moyenne de chaque lot doit être la plus proche possible de la MVA moyenne de la totalité des éprouvettes.

-deux éprouvettes sont destinées à la mesure des masses volumiques apparentes hydrostatiques.

-cinq éprouvettes sont destinées à la conservation sans immersion dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$, quatre dans le cas de ceux de $D \geq 14\text{mm}$.

-les éprouvettes restantes sont destinées à la conservation en immersion pour les essais à 18°C et 50°C .

5.2.2-conservation des éprouvettes

-conservation sans immersion

J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jours $J+1$, les éprouvettes sont conservées à $18^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ et dans une ambiance à $50\% \pm 10\%$ d'humidité relative pendant 7 jours.

-conservation avec immersion :

À partir de $J+8$, les éprouvettes sont immergées dans l'eau à $18^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ pendant 7j.

5.2.3-essai de compression simple

Au jour $j+15$, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion.

La vitesse du plateau de la presse est réglée à 1mm/s. la résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai.

6-expression des résultats

la résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Elle est exprimée en méga pascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant la dimension D du mélange hydrocarboné soumis à l'essai.

On établit également le rapport de la résistance avec immersion (r) à la résistance sans immersion (R) ; le rapport r/R est exprimé avec deux chiffres significatifs.

Essai Marshall

1.1. Généralités

1.1.1. Définition et but de l'essai

L'essai Marshall a pour but de déterminer, pour un compactage donné, la stabilité et le fluage Marshall d'une éprouvette de dimensions déterminées. Il est applicable à tous les enrobés à chaud ne comportant pas de granulats de dimension supérieure à 20mm.

1.1.2. Principe de l'essai

- La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale obtenue par un essai de compression exercée suivant une génératrice de l'éprouvette cylindrique préalablement compactée.
- Le fluage Marshall est l'affaissement de cette même éprouvette au moment de la rupture par compression.

1.2. Appareillage

Un essai MARSHALL nécessite :

- des moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, un hausse ; la Base et la hausse s'adaptent aux deux extrémités du corps de moule.
- des pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule.
- une dame de compactage comportant un marteau pesant (4536 ± 5) g . Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de (457 ± 5) mm sur la base de la dame.
- un bloc support de moule en chêne de dimensions suivantes : largeur 300mm, longueur 300mm, hauteur 450mm. Ce bloc est muni de deux boulons servant pour le calage du moule.
- des mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi-mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre $(50.9$ et $51)$ mm.
- un dispositif de mesure du fluage à 0,1mm près.
- une presse à avancement moyen à vide réglée à la vitesse de $(0,85 \pm 0,1)$ mm/s, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai.
- un bain thermostatique.

1.3. Fabrication de l'enrobé

1.3.1. Préparation des prises d'essais

Cette préparation consiste à :

- Prélever chacun des granulats entrant dans la composition de l'enrobé à partir de lots de granulats secs parfaitement homogénéisés. La quantité prélevée doit permettre de confectionner une gâchée de 6kg de granulats.
- Préparer dans un récipient métallique, la quantité de liant nécessaire à l'enrobage de cette gâchée plus 50g environ, par sécurité.

- Au moment du malaxage, pour les enrobés à chaud à base de bitume pur, les températures des granulats, du bitume et du matériel sont définies comme suit :
 - L'enrobé à base de bitume 80/100: 1400C
 - L'enrobé à base de bitume 60/70 : 1500C
 - L'enrobé à base de bitume 40/50 : 1600C
- Placer tous les granulats prélevés y compris le filler dans un récipient. L'ensemble devra séjourner au moins 4 heures dans une étuve à la température de malaxage définie plus haut.
- Les différents matériels, récipients, cuve de malaxeur, moules de compactage, pistons doivent être mis à la même température et cela s'effectue par un séjour minimal de 2 heures à l'étuve.
- Effectuer le chauffage du liant à la température de la mise en oeuvre.

1.3.2. Malaxage

- Verser la quantité nécessaire du liant dans le récipient des granulats puis mettre tout le mélange dans la cuve du malaxeur. Cette cuve est centrée sur le malaxeur.
- La durée du malaxage n'est pas imposée l'apprécier visuellement jusqu'à homogénéisation correcte.

1.3.3. Remplissage des moules et compactage

Le remplissage des moules s'effectue comme suit :

- Sortir de l'étuve les moules de compactage et les graisser.
- Effectuer les pesées du mélange correspondant au poids d'une éprouvette.
- Introduire cette quantité d'enrobé dans un moule en une seule fois, après avoir déposé au fond de ce moule un disque en papier (afin de numéroter l'éprouvette).
- Pour assurer un bon état de surface latérale de l'éprouvette et pour éviter une dispersion trop grande des résultats, introduire la spatule (chauffée préalablement à la température de malaxage) le long de la paroi du moule et effectuer environ trente fois un mouvement de haut en bas, en décrivant trois fois le tour et ceci sur toute la hauteur de l'enrobé.
- Assurer le surfaçage supérieur à l'aide du piston extracteur chaud, en faisant pivoter celui-ci trois ou quatre fois au contact de l'enrobé.
- La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en (55 ± 5) s. Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage. L'opération précédente est renouvelée.
- La durée de compactage ne doit pas excéder 3 min.
- Le moule est placé pendant au moins 15 min, sous un jet circulaire d'eau froide maintenu de telle façon qu'il ne mouille pas l'éprouvette. Le moule est conservé une (1) heure au moins à température ambiante (150C à 25°C) avant démoulage.

Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

1.3.4. Mode opératoire

- Après démoulage, les éprouvettes sont pesées à 1g près. Les dimensions des éprouvettes sont mesurées à 0,1mm près, en trois zones différentes.
- La masse volumique apparente MVA est calculée à partir des mesures géométriques. On effectue les pesées hydrostatiques pour déterminer la masse volumique apparente. Si la MVA d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de $\pm 2\%$ la série est rejetée. Pour chaque éprouvette la moyenne des mesures de hauteur doit être comprise entre (62,5 et 65)mm avec une tolérance pour chaque mesure de $\pm 1,5$ mm par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée.
- Les éprouvettes sont conservées 5 heures au moins à température ambiante après le compactage.
- Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $(60 \pm 1) ^\circ\text{C}$ pendant (30 ± 1) min.
- Les éprouvettes sont placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de l'essai est réglée à $(0,85 \pm 0,1)$ mm/s. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.
- La stabilité Marshall est la valeur maximale de l'effort à la rupture de l'éprouvette.
- Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical au moment de la rupture.

1.3.5. Expression des résultats

$$MVR_g = \frac{100}{\frac{P_1}{MVR_1} + \frac{P_2}{MVR_2} + \dots + \frac{P_n}{MVR_n}}$$

MVR_g : masse volumique réelle du mélange granulaire.

P_i : pourcentage en poids des différentes fractions du mélange.

MVR_{gi} : masse volumique réelle des différentes fractions du mélange.

$$MVR = \frac{100 + P_1}{\frac{100}{MVR_g} + \frac{P_1}{MVR_1}}$$

MVR : masse volumique réelle de l'enrobé.

P₁ : pourcentage en poids du liant.

MVR₁ : masse volumique réelle du liant.

$$C = 100 \times \frac{MVA}{MVR} \quad C : \text{compacité de l'éprouvette.}$$

$V_R = 100 - C$

V_R : pourcentage des vides.

$$MVA_g = MVA \times \left[1 - \frac{P_1}{100 + P_1} \right]$$

MVA_g : masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette.

- La stabilité Marshall est exprimée en décanewtons (daN).
- Le fluage Marshall est exprimé en dixièmes de millimètre (1/10 mm).

Granulats**Analyse granulométrique par tamisage**

p 18-560

1 -objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la granularité des granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 80 mm.

2- domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

3- généralités**3.1 -définitions**

Granularité : distribution dimensionnelle des grains.

Refus sur un tamis : matériau qui est retenu sur le tamis.

Tamisât (ou passant) : matériau qui passe à travers le tamis.

3.2 -principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

4 -appareillage**4.1- appareillage d'usage courant**

Appareillage spécifique à la norme p 18-553.

Bacs, brosses, pinceaux.

Balance dont la porte limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toute les pesées avec une précision relative de 0,1 %.

Étuve ventilée réglée à $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$

Un dispositif de lavage.

4.2- Appareillage spécifique

Tamis dont l'ouverture est conforme à la norme nf x 11-501 et de diamètre $\square 250\text{ mm}$.

Parmi les tamis de contrôle définis dans cette norme, on utilise généralement ceux donnés par la norme nf p 18-101 pour la classification des granulats.

Le contrôle des tamis sera effectué suivant les indications données dans la norme nf x 11-504.

5- préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme p 18-553. La masse m de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2d$, avec m exprimé en kilogrammes et d plus grande dimension spécifiée en millimètres.

6 -exécution de l'essai**6.1 -détermination de la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique**

L'essai s'effectue sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant l'analyse afin d'éviter un séchage qui présente des inconvénients : perte de temps due au séchage

avant tamisage, risque d'agglomération des particules par séchage. à partir de l'échantillon pour laboratoire, il est donc préparé deux échantillons pour essai.

L'un de masse m_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique, l'autre de masse m_h pour effectuer l'analyse granulométrique.

- pesée des deux échantillons m_{1h} et m_h

- séchage à l'étuve jusqu'à masse constante (c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1 %) du premier échantillon m_{1h} et pesée, soit m_{1s} sa masse sèche.

La masse sèche (m_s) de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique est calculée de la manière suivante :

$$m_s = (m_{1s} / m_{1h}) * m_h$$

6.2- lavage

Dans le cas de matériaux particulièrement argileux, l'échantillon est trempé préalablement au lavage, pendant plusieurs heures.

L'échantillon humide, avec éventuellement les eaux de trempage, est versé sur un ou plusieurs tamis de décharge protégeant le tamis de lavage.

La maille du tamis de lavage correspond à la plus petite maille de la colonne utilisée lors du tamisage. On doit veiller à ce que l'eau ne déborde pas du tamis de lavage.

Cette opération peut se faire à l'aide d'un vibro-tamis à vibrations non verticales. On considère que le matériau est correctement lavé lorsque l'eau s'écoulant sous le tamis de lavage est claire.

Le tamisât est :

- soit éliminé avec les eaux de lavage,
- soit éventuellement récupéré pour d'autres analyses.

Le refus est récupéré et séché jusqu'à masse constante. Soit m_{s1} la masse correspondante.

6.3 -tamisage

Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'empilement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.

Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture. D'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.

Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.

6.4-pesées

Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : 100 g si $d < 1$ mm, 200 g si d compris entre 1 et 4 mm et 700 g si $d > 4$ mm.

- peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit r_1 la masse de ce refus.
- reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur ; ajouter le refus obtenu à r_1 et peser l'ensemble. soit r_2 la masse des deux refus cumules.
- poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumules $r_3, r_4, \dots, r_i, \dots, r_n$.
- peser s'il y en a, le tamisât au dernier tamis. Soit t_n sa masse.

- si après essai, les résultats montrent qu'un (ou plusieurs) tamis a (ont) été surcharge(s), l'essai doit être refait manuellement à partir de ce tamis.

7- expression des résultats

7.1- calculs

Les résultats des différentes pesées cumulées sont portés sur une feuille d'essai
Les masses des différents refus cumules r_i , sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec m_s et les pourcentages de refus cumules ainsi obtenus,

$(r_i / m_s) 100$

Inscrits sur la feuille d'essai. les pourcentages de tamisats correspondants sont égaux à :

$100 - (r_i / m_s) 100$

7.2- présentation des résultats

Les pourcentages de tamisats cumules ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableau (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

Trace de la courbe :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats ou des différents refus cumules sur la feuille de papier semi-logarithmique.

- en abscisse : les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique.

- en ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe représentant la distribution granulométrique des éléments doit être tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

7.3 -validité de l'analyse granulométrique

la somme des masses, m et m_n , ne doit pas différer de plus de 2 % de la masse m_{s1} ,

8 -précision

La reproductibilité (r) et la reproductibilité (r) ont été déterminées à partir de deux répétitions d'essais effectués sur chaque matériau dans 18 laboratoires. L'interprétation est effectuée conformément à la norme iso 5725.

Sables : les relations linéaires obtenues sur le 0/2 mm sont les suivantes :

- reproductibilité $r = 0,56 + 0,017 x$

- reproductibilité $r = 0,056 x$

x étant la moyenne des passants en pourcentage sur les tamis de contrôle.

Gravillons : les valeurs ne sont connues que pour le 4/6,3 et le 10/14 mm.

- valeurs a_d et d : $r = 3,5$ et $r = 7,7$

- valeurs aux tamis intermédiaires : $r = 8$ et $r = 16$.

Mesure du coefficient d'aplatissement**P 18-561****1 -objet**

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm.

2- domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

3 -généralités**3.1 -définitions**

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

- **longueur l** = le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- **épaisseur e** = le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.
- **grosseur g** = dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

Le coefficient d'aplatissement a d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage des éléments tels que :

G/e >1.58**3.2 -principe de l'essai**

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

- tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/d (avec $d = 1,25 d$), suivant leur grosseur g.
- puis tamisage des différentes classes granulaires d/d, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement :

d/1.58

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/d correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement d/1,58, exprime en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/d composant l'échantillon.

4- appareillage**4.1- appareillage d'usage courant**

Appareillage courant et spécifique de la norme p 18-553.

La détermination des classes granulaires s'effectue sur les tamis à mailles carrées utilisés pour l'analyse granulométrique définie par la norme p 18-560. On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de :

50 - 40 - 31,5 - 25 - 20 - 16 - 14 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 et 4 mm.

4.2 -appareillage spécifique

Pour la détermination du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire, on utilise une série de grilles, constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré. Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de :

31,5- 25 - 20 - 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 - 3,15 et 2,5 mm.

Pour chaque grille, l'ouverture des fentes ainsi définies doivent satisfaire aux conditions suivantes ;

-il ne doit pas y avoir plus de 10 % de la longueur totale des fentes dont l'écartement diffère de 0,25 mm de l'écartement nominal.

-en aucun point des fentes, la largeur de fente ne doit s'écarter de 0,5 mm de la dimension nominale.

5 -préparation de l'échantillon pour essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme p 18-553. la masse m de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2d$, avec m exprime en kilogrammes et d , plus grande dimension spécifique, exprime en millimètres.

L'échantillon est passé sur un tamis de 4 mm, la masse m_0 du refus est déterminée avec une précision relative de 0,1 %.

6- exécution de l'essai

6.1- tamisage sur tamis à mailles carrées

Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme p 18-560.

Recueillir les différentes fractions d/d ; peser chaque classe granulaire avec une précision relative de 0,1 %.

6.2 -tamisage sur grilles à fentes

Tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement e entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous :

Dimensions en millimètres

classe granulaire d/d			écartement e
		>50	31.5
40	-	50	25
31.5	-	40	20
25	-	31.5	16
20	-	25	12.5
16	-	20	10
12.5	-	16(1)	8
10	-	12.5	6.3
8	-	10	5
6.3	-	8	4
5	-	6.3	3.15
4	-	5	2.5
(1) ou 14 pour le 10-14			

Le tamisage sur les grilles se fait manuellement.

Peser avec une précision relative de 0,1 % le passant sur la grille correspondante à chaque classe granulaire d/d .

7- expression des résultats

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai. Les notations suivantes sont utilisées :

M_g = masse de chaque classe granulaire d/d , en grammes.

$m = \square mg$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à m_0 mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %).

m_e = masse des éléments de chaque classe granulaire d/d passant sur la grille correspondante, définie par le tableau du paragraphe 7.2.

le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$(m_e/m_g)*100$$

le coefficient d'aplatissement global a est donne par :

$$a = \sum m_e / m$$

8- précision

La repetabilite (r) et la reproductibilité (R) sont déterminées a partir de deux répétitions d'essais effectues sur chaque matériau dans 18 laboratoires. L'interprétation est effectuée conformément à la norme nf iso 5725.

Pour des niveaux de valeurs compris entre 8 et 20 : repetabilite $r = 2,8$ et reproductibilite $R = 5$.

Mesure du coefficient de friabilité des sables**NFP 18-576**

1- objet: la présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la résistance à la fragmentation des sables.

2- domaine d'application

la présente norme s'applique aux sables contenus dans les granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

3- généralités**3.1-but de l'essai**

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produits dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies, par fragmentation à l'aide d'une charge en présence d'eau.

Les éléments fins du sable, inférieurs à 0.1mm, ne sont pas étudiés. Le sable est écarté à 2mm.

3.2-définition

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0.05mm produits au cours de l'essai.

Si m est la masse de matériau soumis à l'essai et m_1 la masse des éléments inférieurs à 0.05mm produits au cours de l'essai, par définition de coefficient de friabilité du sable sera

$$FS = 100 (m/m)$$

4.1-appareillage spécifique

-l'appareil Micro-Deval.

-une charge abrasive constituée par des billes sphériques en acier inox **z 30 c13** conformément à la norme nf a35-572 de diamètre (30 mm, +1mm, 0.5mm) et (10mm ± 0.5)mm

4.2-appareillage d'usage courant

Le matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau (2) et une analyse granulométrique par tamisage (3) dont un jeu de tamis de 0.05-0.1-0.2-1-2-8mm de 200mm de diamètre au moins.

5- matériau soumis à l'essai

-la masse du matériau envoyé au laboratoire sera d'au moins 2000g.

-l'échantillon sera préparé suivant les prescriptions de la norme nf 18-553.

-l'essai sera effectué sur un sable 0.1/2mm.

5.2-préparation de l'échantillon pour essai

-préparer l'échantillon pour essai de la façon suivante :

- tamiser par voie humide les 2kg de matériau sur les tamis 0.1 et 2mm.
- sécher à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante.
- homogénéiser et peser l'échantillon pour essai de 500 grammes, à deux grammes près.

-préparer la charge constituée par des billes d'acier de façon suivante:

- prendre 9 billes de 30mm de diamètre, dont la masse doit être de (975, +10, -50) g.
- ajouter 21 billes de 18mm de diamètre, dont la masse doit être de (490, +10, -50) g.

- compléter avec des billes de 10mm de diamètre, de façon que la masse totale de la charge soit de (2500 ± 4) g

Note : l'usure de la charge doit être contrôlée périodiquement. Les billes de 18 et 30mm sont contrôlées par pesée de l'ensemble et remplacement des plus usées par pesées élémentaires jusqu'à se retourner à l'intérieur des tolérances. Les billes de 10mm sont contrôlées en faisant passer sur deux barreaux parallèles de 9.5mm d'écartement.

6- execution de l'essai

-introduire la charge dans le cylindre d'essai, dispose ouverture vers le haut, puis les 500 grammes de matériau préparé suivant les dispositions du chapitre 5;

- ajouter 2.5 litres d'eau, mettre le couvercle;

- mettre le cylindre en rotation à la vitesse de (100 ± 5) tr/min pendant 1500 tours ou 15 min.

- verser ensuite le matériau et la charge abrasive dans un bac, en évitant toutes les pertes. Laver soigneusement l'intérieur du cylindre et recueillir l'eau et les parties minérales entraînées.

-verser lentement la totalité du contenu du bac sur trois tamis superposés de 8mm (pour recueillir la charge abrasive), de 0.2mm (pour soulager le tamis de 0.05mm) et de 0.05mm;

-laver l'ensemble sous un jet d'eau jusqu'à eau claire puis enlever le tamis de 8mm;

-sécher les tamis de 0.2 et 0.05mm à l'étuve à 105 °c jusqu'à masse constante ;

-tamiser à sec simultanément les refus à 0.2 et 0.05mm;

-peser au gramme près l'ensemble des refus sur les deux tamis, recueillis avec soin, soit m' cette masse.

7 -expressions des résultats

la masse des éléments inférieurs à 0.05mm produits durant l'essai, à partir des 500 grammes initiaux est égale à

$$m = 500 - m'$$

Le coefficient de friabilité mesure est alors:

$$FS = 100 * (m/500) \text{ arrondi à l'unité près}$$

(2) NFP18-553 "granulats- préparation d'un échantillon pour essai".

(3) NFP 18- 560 "analyse granulométrique par tamisage"

Détermination de propreté superficielle

1-objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la propreté superficielle des granulats supérieurs à 2mm.

2-domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

3-reference

p 18 – 553

4- généralités

4.1 Définition

La propreté superficielle est définies comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0.5mm (ou 1.6mm pour les ballasts) mélanges ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2mm.

4.2 Principe de l'essai

Ces particules sont séparées par lavage sur tamis correspondant.

5- appareillages

-tamis de 0.5mm ou 1.6mm

-éventuellement un tamis de décharge.

-balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0.1%.

-étuve ventilée réglée à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$.

6 -détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai

-peser les deux échantillons m_{1h} et m_h .

-sécher le premier échantillon m_{1h} à l'étuve à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de la masse sèche m_s de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

$$m_s = (m_{1s}/m_{1h}) * m_h$$

7 -Détermination de la masse sèche des éléments inférieurs à 0.5mm ou 1.6mm

-effectuer l'essai sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant essai.

-tamiser sous eau l'échantillon m_h sur le tamis de 0.5mm ou 1.6mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.

-récupérer le refus et sécher à l'étuve à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. le tamiser à nouveau sur le tamis de 0.5mm ou 1.6mm pendant une minute et le peser, soit m' sa masse sèche.

La masse sèche m des éléments inférieurs à 0.5 mm ou 1.6mm est égale à :

$$m = m_s - m'$$

8-expression des résultats

la propreté superficielle est donnée par:

$$p = (m/m_s) * 100$$

9-precision

La reproductibilité (r) et la reproductibilité (r) ont été déterminées à partir de deux répétitions d'essais effectués sur chaque matériau dans 18 laboratoires. L'interprétation est effectuée conformément à la norme nf iso 5725.

Pour les niveaux de valeurs comprises entre 0.2 et 3:

- repetabilite $r= 0.39 +0.08x$
 - reproductibilite $r= 0.28 + 0.45x$
- (Où x est la nouvelle valeur)

1- objet: la présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour déterminer la pseudo-viscosité des émulsions de bitume.

2- domaine d'application

La présente norme s'applique aux émulsions de bitume quelle qu'elle soit leur catégorie

3- définition

La viscosité des émulsions se mesure dans la pratique courante à l'aide de viscosimètres à écoulement elle n'a qu'une valeur relative car ces produits ne se comportent pas comme des liquides newtoniens on doit donc utiliser le terme de "pseudo-viscosité "

4- principe

Selon la limite de viscosité utiliser pour déterminer la pseudo-viscosité, le viscosimètre Engler ou si elle est supérieure à 15° le viscosimètre STV.

5- appareillage et réactifs

5-1 appareillage spécifique

5.1.1 Viscosimètre Engler

Le viscosimètre Engler est formé essentiellement par un réservoir (A) en laiton dont la paroi est cylindrique et dont le fond est callote sphérique munie en son centre d'un tube d'écoulement calibré (B) légèrement conique en métal inoxydable soigneusement poli à l'intérieur. Le réservoir (A) destiné à recevoir l'émulsion porte sur sa paroi intérieure trois petites pointes métalliques (C) fixant le niveau du liquide (capacité correspondante: 250mm environ) le réservoir (A) est fermé par un couvercle (D) comportant une ouverture centrale pour le passage d'un pointeau en bois (E) et une autre ouverture pour le passage du thermomètre (T1)

Tout ce dispositif est entouré d'un réservoir concentrique (F) en laiton. Destiné à recevoir de l'eau pour constituer un bain à température constante le bain marie (F) est chauffé par une résistance électrique un petit agitateur à palette (G) permet d'uniformiser la température du bain.

L'ensemble est supporté par un trépied (H) muni de trois vis calantes permettant de rendre horizontalement le plan défini par les trois pointes métalliques (C).

5.1.2 Thermomètre Engler

Ce thermomètre est muni d'une bague en laiton qui vient s'appuyer sur un renflement de la tige la bague est scellée à la tige.

Autre caractéristiques

- échelle 0 à +55°C
- Graduation par 0.2°C
- précision ± 0.2 °C
- immersion 90 mm
- remplissage au mercure

5.1.3 Pointeau

les pointeaux (E) sont tournés dans des tiges de bois dur (buis par exemple) d'une longueur totale de 190 à 200mm ils comprennent une partie cylindrique (diamètre de la petite base 1.5 à 2mm longueur 70 à 80 mm) tronconique du tube d'écoulement (B) se fait en enfonçant la pointe du pointeau dans le tube. Sans forcer l'ouverture du tube se fait en soulevant le pointeau. un fil de laiton inséré dans le pointeau suivant une génératrice du tronc de cône (entre la grande base et le milieu de cette génératrice). Forme ressort et permet de bloquer le pointeau en position haute dans l'ouverture centrale du couvercle (D).

L'un des pointeaux est réservé aux étalonnage de viscosimètre avec l'eau distillée l'autre pointeau réserve aux émulsion doit être nettoyé après chaque essai et peut servir à d'autre mesures.

5-1.4 fiole jaugée

Cette fiole de mesure en verre est munie de deux traites de jauge à 100 ml et 200ml sa capacité est telle qu'elle puisse contenir la totalité du liquide s'écoulant du viscosimètre (250ml environ)

Mode opératoire

Laver l'intérieur du réservoir (A) et le tube d'écoulement: cette opération de nettoyage doit être effectuée très soigneusement en particulier:

-pour nettoyer à fond l'intérieur du tube d'écoulement se servir de papier filtre doux enroulé et imbibé de trichloréthylène.

-ne pas oublier de nettoyer l'extrémité inférieure du tube d'écoulement.

-ne jamais utiliser de fils métalliques, de substances abrasives ou corrosives.

Rincer à l'eau distillée sécher soit avec du papier filtre soit de préférence à l'air comprimé sec et dépoussiéré

Laver et sécher de la même façon le thermomètre T1, et le pointeau réservé aux mesures sur émulsions. Le pointeau réservé à l'étalonnage à l'eau distillée reste toujours propre s'il est conservé à la l'abri des poussières et des salissures.

La fiole jauge doit être propre et sèche

Remplir d'eau le réservoir extérieur (F) et régler la température de ce bain à $25^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

Le viscosimètre est alors prêt à l'emploi.

Etalonnage de l'appareil

Obturer le tube d'écoulement en y introduisant verticalement et sans forcer le pointeau réserver à l'étalonnage.

Enlever le couvercle (D) et verser de l'eau distillée à 20°C dans le réservoir (A) jusqu'au sommet des trois pointes métalliques (C). Le plan de ces pointes doit être rendu horizontal au moyen des vis calantes. Le niveau de l'eau est exactement avec une pipette.

-
Essuyer avec du papier filtre la base du tube d'écoulement et le fond du réservoir (F) - pour enlever l'humidité qui aurait pu s'y déposer (une condensation se produit souvent soit en cas de chauffage au gaz,soit lorsque l'air ambiant est humide et une température supérieure à 25°C)

Soulever franchement le pointeau et déclencher le chronomètre au moment ou la premier goutte de liquide touche le fond de la fiole .a partir de ce moment la rampe à gaz ne doit plus être allumée. La température du bain sera maintenue, si nécessaire à l'aide d'un brûleur dirigé vers la paroi cylindrique externe du réservoir (F) ou mieux à l'aide d'une régulation électrique .bloquer le pointeau par son ressort dans l'ouverture du couvercle (D).

Noter le temps t_0 d'écoulement de 200ml d'eau distillée. Lorsque les 200ml se sont écoulés le thermomètre T1 doit indiquer $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

Recommencer l'essai ay moins trois fois .lorsque trois résultats ne diffèrent pas entre eux de plus de 0.5 seconde. La moyenne de ces résultats, arrondis à 0.2 seconde représente la valeur en eau t_0 du viscosimètre.

Mesure de temps d'écoulement de l'émulsion

Après étalonnage le viscosimètre et ses accessoires sont séchés .le bain thermostatique est réglé comme pour l'étalonnage

Obturer le tube d'écoulement avec le pointeau réservé aux émulsions.

Le mode opératoire avec l'émulsion tamisée ne diffère de celui utilisé pour l'étalonnage à l'eau par les points suivants:

- les déterminations seront poursuivies dans un temps assez court après l'introduction de l'émulsion dans le viscosimètre pour éliminer la possibilité de formation de dépôt.
- l'agitation de l'émulsion par rotation du couvercle doit être presque continue, mais très douce pour éviter la formation de mousse.
- noter le temps t_1 d'écoulement des 100ml premiers millilitres, puis le temps t_2 d'écoulement des 200ml .si l'écoulement régulier le temps t_2 doit être à 5 secondes près:

$$t_2 = t_1 * 2.353$$

-moyennant la condition ci –dessus, deux essais sont suffisants .la moyenne des deux résultats représente le temps t_2 d'écoulement de 200ml d'émulsion.

Si la condition ci –dessus n'est pas réalisée dans un essai, celui –ci doit être recommencé.

Calculs et expression des résultats

La pseudo-viscosité de l'émulsion, exprimée en degrés Engler est égale à:

$$t_2 / t_0$$

Arrondir le résultat à la demi unité la plus proche.

Si la viscosité dépasse 15° Engler déterminer ensuite la viscosité STV

**Détermination de l'indice de rupture d'une émulsion cationique T66-017
Décembre 1983**

1- objet et domaine d'application

La présente norme a pour objet l'évaluation de la rupture d'une émulsion cationique vis-à-vis de fines minérales de référence. Elle s'applique aux émulsions de bitumes purs et aux émulsions de bitumes purs fluidifiés ou fluxés.

2- principe

Introduire régulièrement, suivant un mode opératoire conventionnel, la quantité de fines de référence qui provoque la rupture de 100g d'émulsion.

Calculer alors l'indice de rupture.

3- réactifs

3.1 Fines de siliceuses

- silice fine naturelle, non broyer de couleur blanche
- teneur en SiO₂ supérieure à 98
- masse volumique réelle 2.65g/cm³
- pH neutre
- fuseau granulométrique

Refus sur tamis de	Pourcentage
100µm	1 à 5 %
80µm	5 à 10 %
63µm	15 à 25 %
50µm	10 à 20 %
40µm	25 à 35 %
passant à 40µm	17 à 30 %

-indice de finesse AFS=210 à 250

-les fines siliceuses devront être, préalablement à l'essai, séchées à l'étuve à 120 °C conservées dans un récipient étanche.

4-appareillage

4.1 une trémie à surface non adhérente munie d'ouverture de 2.5mm de diamètre, telle que le débit de fines soit de 0.3 à 0.5g/s ou tout autre dispositif permettant d'obtenir le même débit. Un exemple d'appareillage utilisable est donné en annexe.

4.2 Une capsule émaillée de 20cm de diamètre intérieur et de 10cm de hauteur.

4.3 Une spatule en nickel de 20 cm de longueur

4.4 Un bain thermostatique.

4.5 Une balance précise au décigramme.

5 préparations de l'échantillon pour essai

Travailler sur un échantillon passé au tamis de 630µm d'ouverture de mailles.

Homogénéiser soigneusement par agitation.

La quantité de fines de référence nécessaire à l'essai est prélevée dans un stock préalablement homogénéisé.

6 modes opératoires

6.1 conserver dans un bain thermostatique, réglé à la température de 25°C ± 1°C, l'émulsion à essayer et 1 kg de fines de référence dans des récipients bouchés hermétiquement pendant 1h environ avant la réalisation de l'essai.

6.2 déterminer à 0.1 g près la masse, m_1 de la capsule émaillée contenant la spatule de nickel.

6.3 peser à 0.1g près dans la capsule environ 100g de l'émulsion à essayer, soit m_2 la masse à 0.1 près de l'ensemble capsule + spatule +émulsion.

La masse d'émulsion ajoutée est égale à :

$$E = m_2 - m_1$$

6.5 placer la capsule émaillée dans le bain thermostatique dont l'eau est maintenue à $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

6.6 remplir la trémie avec les fines de référence maintenues à 25°C .

6.7 placer la trémie contenant environ 250g de fines de référence sur son support.

6.8 ouvrir la trappe de la trémie ; les fines tombent alors régulièrement dans la capsule. Simultanément, mélanger intimement de façon régulière (1 tour /s) l'émulsion et les fines au moyen de la spatule.

6.9 refermer la trappe lorsque le mélange devient pâteux et que se forme un caillot isolé et non adhérent à la capsule, caractéristique de l'émulsion.

6.10 peser de nouveau la capsule de nickel à 0.1g près, après l'avoir essuyée : soit m_3

6.11 La masse de fines ajoutée est égale à: $m = m_3 - m_2$

7 expressions des résultats

L'indice de rupture de l'émulsion est calculé de la façon suivante:

$$I_c = (m/E) * 100$$

Où :

E Est la masse d'émulsion

m Est la masse de fines de référence introduites.

Pour la présentation des résultats: indice de rupture vis – à –vis des fines silencieuses.

L'indice de rupture est la moyenne T des résultats de 3 essais.

8 fidélités

répétabilité, $r = 0.03 T$

T est la moyenne des 3 essais.

Les premiers essais de laboratoire ont conduit à cette valeur de répétabilité, d'autres essais sont à mener pour confirmer cette valeur et la compléter par valeur de reproductibilité.

9 procès verbal d'essai

le procès-verbal d'essai doit faire référence à la présente norme et indiquer:

-le type d'émulsion essayée.

- les résultats obtenus, notamment si la formation du caillot est difficile et ne permet pas de donner un résultat d'essai.

Les détails non prévus dans la norme et les incidents susceptibles d'avoir agi sur les résultats.

Essai d'adhésivité d'une émulsion cationique NF T 66-018

1- objet et domaine d'application

La présente norme a pour objet la description d'une méthode d'évaluation de l'adhésivité d'une émulsion cationique de bitume vis – à – d'un granulat de référence en présence d'eau.

Elle s'applique aux émulsions de catégories rapides, semi rapide et lente.

2- définition

Cette adhésivité s'exprime par une note correspondant au pourcentage de surface du granulat recouverte d'un film de bitume.

Si le granulat est entièrement recouvert de bitume l'adhésivité est égale à 100. Si le bitume est séparé du granulat, elle est égale à 0.

3 -principes

Malaxer un mélange d'émulsion et de granulat type. Après rupture complète de l'émulsion dans des conditions déterminées, le mélange est immergé dans de l'eau placé dans un récipient en verre au bout d'un temps donné et dans des conditions déterminées. On évalue d'une manière visuelle le pourcentage de surface recouverte de liant.

4-reactif

4.1- un granulat type de couleur aussi claire que possible passant au tamis d'ouverture de maille 10 mm et retenue au tamis d'ouverture de maille 6.3mm.

le granulat devra être convenablement lavé, séché et conservé dans un récipient étanche.

4.2 Eau distillée

5 -appareillages

5.1 -Une étuve à température réglable munie d'un système de ventilation

5.2 -Une spatule.

5.3 -Deux capsules émaillées de 15 à 20 cm de diamètre.

5.4 -Un chronomètre

5.5 -Deux béchers de 400ml

5.6 -Une série de cinq verres de montre de 10 à 15 cm de diamètre.

5.7 -Une balance précise au gramme près.

5.8 - Une éprouvette de 250 ml à 500ml graduée

5.9 -Thermomètre de 0 à 150 °C

5.10 -Une plaque chauffante.

6 –préparation de l'échantillon

a partir l'échantillon arrivé au laboratoire, filtrer sur un tamis en acier inoxydable de 630 µm d'ouverture de mailles selon le mode opératoire de la norme NF T 66 -016

7- mode opératoire

Suivre l'un des modes opératoires suivants que l'on est en présence d'émulsion stockables ou d'émulsions à stockage limité

7.1 -Cas des émulsions stockables

-peser dans un capsule 200g de granulat type et dans une autre capsule une quantité d'émulsion correspondant à 10g de bitume.

-verser le granulat dans l'émulsion

-mélanger intimement au moyen d'une spatule.

-étaier le mélange sur un verre de montre et l'introduire dans l'étuve égale à 60°C.

- au bout de 24 h placer le mélange dans un bécher ,y verser 300ml d'eau distillée chauffée à 60°C et le recouvrir d'un verre de montre.

- placer le bécher dans l'étuve réglée à 60°C.

- au bout de 16h à 24h on apprécie les surfaces recouvertes d'un film de liant en donnant une note:

- 100: aucune surface découverte.
90: plus de 90 environ des surfaces sont recouvertes.
75: 75 à 90 environ des surfaces sont recouvertes.
50: 50 à 75 environ des surfaces sont recouvertes.
<50: moins de 50 des surfaces sont recouvertes.
0: le liant est séparé des granulats.

7.2- Cas des émulsions à stockage limité

- peser dans une capsule 100g de granulat type et 150g d'émulsion dans une autre capsule.
- verser le granulat dans l'émulsion et laisser en contact pendant une minute sans aucune agitation. On pourra néanmoins chasser les bulles d'air qui peuvent gêner un mouillage correct du granulat en secouant légèrement la capsule.
- éliminer l'excès d'émulsion et laver le granulat à la température ambiante en maintenant la capsule inclinée sous un faible courant d'eau distillée jusqu'à obtention d'une eau de lavage limpide.
- introduire le mélange dans un bécher et recouvrir par 300ml d'eau distillée à température ambiante.
- apprécier immédiatement les surfaces recouvertes d'un film de liant comparativement à un granulat non traité en donnant une note comme il est indiqué en 7.1
- si la note obtenue est supérieure ou égale à 90, on continue l'essai de la façon suivante:
 - placer le bécher recouvert d'un verre de montre, pendant 16h à 18h atmosphère ventilée à 60°C.
 - apprécier une nouvelle fois les surfaces recouvertes d'un film de liant en donnant un pourcentage comme précédemment.

8-expression des résultats

Donner un résultat dans le cas des émulsions stockables (7.1) et (1^{ère} et 2^e parties de l'essai) dans le cas des émulsions à stockage limité (7.2)

9-fidélités

Étant donné le caractère qualitatif des résultats obtenus, il n'est pas possible de chiffrer la fidélité de la méthode.

Cependant les essais effectués par un même opérateur montrent que une émulsion de bitume donnée on obtient généralement le même résultat.

10- procès verbal

Le procès-verbal d'essai doit faire référence à la présente norme et indiquer outre les résultats obtenus. Les détails opératoires non prévus dans la norme et les incidents susceptibles d'avoir agi sur les résultats.

En particulier, il doit indiquer la nature du granulat type qui été utilisé.

Détermination de la teneur en eau NF T 66-023 janvier 1984**1-objet et domaine d'application**

La présente norme a pour objet de décrire une méthode de détermination de la teneur en eau des émulsions de bitume par entraînement à l'aide d'un solvant.

2- principe

L'eau contenue dans la prise d'essai est entraînée par distillation à reflux d'un solvant non miscible à l'eau .après condensation l'eau se sépare du solvant et c'accumule dans un tube de recette gradué. De forme convenable. Le liquide d'entraînement retourne dans le récipient de distillation.

3- appareillage

L'appareil est décrit en annexe; il comprend essentiellement:

- un récipient de distillation.
- un dispositif de chauffage.
- un réfrigération droite.
- un tube de recette de 25ml selon figure2,ou à défaut selon figures 3 ou 4.

4-réactif

Toluène pur

5-préparation de l'échantillon pour essai

La quantité d'échantillon à prélever est de l'ordre de deux litres placés dans un récipient en polyéthylène à large col. A bouchon vissé préalablement rincé à l'aide de la phase dispersante utilisée pour l'émulsification.

L'échantillon doit être filtré sur un tamis de 630 µm d'ouverture de mailles puis homogénéisé soigneusement par agitation.

6-mode opératoire

Peser 40 g environ d'émulsion dans le ballon à 0.1g près.

Ajouter 70 à 80 ml de toluène et un peu de poudre de talc sec ou de pierre ponce contenue dans une boîte très étanche

Agiter légèrement et assembler le différent élément de l'appareil selon la figure 1 après s'être assuré que le tube de recette et le tube intérieur du réfrigérant sont chimiquement propres.

Faire circuler l'eau froid dans le réfrigérant.

Chauffer le récipient de distillation en réglant l'ébullition de manière à éviter l'engorgement du réfrigérant.

Poursuivre la distillation jusqu'à ce que le volume d'eau recueilli dans le tube de recette reste constant et qu'il n'y ait plus d'eau visible en aucun autre point de l'appareil .si des gouttelettes d'eau restent dans le réfrigérant. Augmenter momentanément la vitesse de distillation.

Arrêter le chauffage .laisser le tube recette et son contenu refroidir à la température ambiante. Lire le volume de l'eau rassemblée au fond du tube de recette. à la division de l'échelle la plus voisine de l'interface eau- solvant.

Il arrive que de fines gouttelettes d'eau adhèrent aux parois du tube de recette ou restent en suspension dans le solvant .dans ce cas, on se servira d'une baguette à braser ou d'une tige en laiton de 2 mm de diamètre environ ou de tout autre dispositif approprié pour favoriser la séparation de l'eau et du toluène.

7-calcul et expression des résultats

Exprimer la teneur en eau de l'échantillon en pourcentage, en masse, au moyen de la formule suivante:

$$\frac{\text{Volume d'eau en millilitres, dans le tube de recette} \times 100}{\text{Masse en grammes de la prise d'essai}}$$

Remarque : les matières volatiles solubles dans l'eau entraînées dans le tube de recette sont comptées comme eau.

8- fidélité

répétabilité $r=0.9$
Reproduction $R=1.8$

9-procès – verbal d'essai

Le procès – verbal d'essai doit faire référence à la présente norme et donner:

- les références permettant l'indentification de l'échantillon.
- les résultats d'essai.
- les incidents ou les détails opératoires non mentionnés dans la norme et susceptibles d'avoir influencé les résultats.

Essai de stabilité de stockage par décantation T 66-022 janvier 1984

1-objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la décantation d'une émulsion de bitume en vue de la caractérisation de sa stabilité au stockage.

2 -domaines d'application

La présente norme s'applique aux émulsions anioniques et cationiques de toutes catégories qu'il s'agisse d'une émulsion dite "à stockage limité" ou d'une émulsion dite "stockable".

3 -définitions

la stabilité au stockage est défini comme étant l'épaisseur de la couche superficielle de solution aqueuse qui se forme lorsque l'émulsion est laissée au repos pendant 24h, cette épaisseur s'exprimant en pourcentage par rapport à la plus petite dimension du récipient qui contient l'émulsion.

4- principe

L'essai consiste à mesurer l'épaisseur de la couche décantée au moyen d'une électrode immergée dans l'émulsion et reliée à un pôle positif ou négatif d'un générateur de courant continu (l'autre pôle étant relié au récipient métallique contenant l'émulsion). après passage du courant, il se produit un dépôt de bitume sur l'électrode par électrophorèse. La distance qui sépare ce dépôt de la surface de l'émulsion est égale à l'épaisseur de la couche de solution aqueuse décantée.

5 -APPARILLAGE

- électrode cylindrique de cuivre de diamètre 12mm environ montée sur un support isolant (voir schéma) sur laquelle est gravé un trait de repère à 60mm environ de son extrémité.
- un bécher en aluminium ou en métal inoxydable de contenance de 500 à 1000 et de diamètre intérieur D de 80 à 100 mm.
- un générateur de courant continu de force électromotrice comprise entre 6 et 12V.
- un verre de montre de diamètre supérieur à celui du bécher.

6-préparation de l'échantillon pour essai

L'échantillon d'émulsion est prélevée à la sortie de l'engin de dispersion et filtré sur un tamis en acier inoxydable d'ouverture de maille 630µm puis homogénéisé soigneusement par agitation.

7-mode opératoire

L'essai est effectué à la température de 25°C environ.

L'émulsion à environ 25°C est introduite dans le bécher métallique jusqu'aux 3/4 de sa hauteur et laissée au repos pendant 24h après que le bécher ait été recouvert d'un verre de montre.

L'électrode est ensuite immergée avec précaution dans l'émulsion jusqu'au trait de repère. Dans le cas d'une émulsion cationique relier l'électrode au pôle négatif et le bécher au pôle positif du générateur. Fermer le circuit pendant au moins 10s.

Ouvrir ensuite le circuit et retirer l'électrode avec précaution. Déterminer la distance **d** en millimètres qui sépare le trait de repère de l'électrode du niveau supérieur du dépôt de bitume

8- expressions des résultats

La stabilité au stockage de l'émulsion de bitume est donnée par la formule:

$$(d/D)*100$$

Ou :

d: est la distance en millimètre qui sépare le trait de repère de l'électrode du niveau du dépôt de bitume.

D:est le diamètre intérieur en millimètre du bécher.

9- fidélité

répétabilité $r = 1$

Les premiers essais de laboratoire ont conduit à cette valeur de répétabilité, d'autres essais sont à mener pour confirmer cette valeur et la compléter par une valeur de reproductibilité.

10- procès verbal d'essai

Le procès –verbal d'essai doit faire référence à la présente norme et mentionner:

- les indications permettant l'identification de l'échantillon.
- les résultats obtenu.
- les incidents ou les détails opératoires non mentionnés dans la norme et peuvent avoir influencé les résultats