

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

THÈME

**AMÉLIORATION DES PERFORMANCES
D'UN BÉTON BITUMINEUX**

Fait par :

- M. OULD- HENIA
- S. SOUAMI

Proposé et dirigé par :

- E. KETTAB
- N. BAUCHE



Promotion 1998-1999

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



THÈME

AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UN BETON BITUMINEUX

Fait par :

- M. OULD- HENIA
- S. SOUAMI

Proposé et dirigé par :

- R. KETTAB
- N. BAUCHE

Promotion 1998-1999

Dédicaces

à ma mère,
à mon père,
à mes soeurs,
à mes frères,
à toute ma famille,
ainsi qu'à tous mes amis.

Sofiane

à ma mère,
à mon père,
à ma sœur,
à la grande famille,
à Salim, Sofiane et Amine,
à tous les amis.

Mehdi

Remerciements

On remercie toutes les personnes qui nous ont aidé à finaliser ce modeste travail et surtout l'équipe du laboratoire central de la SONATRO, et en particulier : Messieurs M. BEDRICI et A. BOUKERROU.

On remercie Mesdames R. KETTAB et N. BAOUICHE pour leur disponibilité et leur aide durant cette année et les années précédentes.

On remercie Monsieur K. DOUKALI du GTTP pour son aide précieuse.

On tient à remercier encore une fois Monsieur A. BOUKERROU pour sa disponibilité et son engagement et tous les efforts consentis pour faire aboutir ce travail.

Finalement, on remercie nos familles respectives ainsi que tous les amis pour leur soutien moral durant toute cette période.

ملخص

في إطار عملنا هذا، لقد حاولنا تحسين مقومات الخرسانة الزفتية المستعملة في تعبيد الطرق و المطارات، و هذا بأخذ بعين الاعتبار عامل الثمن لأنه له علاقة مباشرة على الجانب الاقتصادي للمشروع. و لهذا، لقد قمنا بأقحام رماد ناتج من إعادة استعمال بعض المواد المطاطية مباشرة في هيكل الخرسانة الزفتية. نتائج جد مشجعة تم التحصل عليها، فبا لإضافة الى الجانب الايكولوجي للمشروع (استرجاع المواد المطاطية) لقد لاحظنا تحسين في مقومات عدة لهذه المواد الزفتية؛ هذا التحسين يجعل بإمكاننا التقليل من سمك هذه المواد في الطرق و المطارات دون المساس بنوعيتها أو مدة استعمالها وهذا ما يؤدي مباشرة الى الانخفاض التكلفة و التسعيرة وهذا هو الهدف المرجو من استرجاع هذه المواد المطاطية التي سمحت لنا بالتحصل على هذه النتائج المشجعة.

RESUME

Dans notre travail , nous avons essayé d'améliorer les caractéristiques d'un béton bitumineux semi-grenu pour couche de roulement, et cela, en tenant compte du facteur coût qui à son impact sur l'aspect économique du projet . Et pour cela , nous avons incorporé une poudre de caoutchouc directement dans le squelette solide du béton bitumineux . Des résultats satisfaisants ont été enregistrés car en plus de la valeur écologique du projet (recyclage des produits à base de caoutchouc) on a constaté une amélioration appréciable des résistances à la compression, de la stabilité, de la compacité du matériau ainsi que la diminution de son fluage .

ABSTRACT

In this research we tried to improve some characteristics of a bituminous concrete . We kept a count of the factor cost which have a direct impact on the economic aspect of the project that's why we in corporate a rubber powder in the solid skeleton of the bituminous concrete. In addition to the ecological impact, (recycling rubber products) a improvement of some characteristics of the bituminous concrete was notified .

LISTE DES MOTS CLES :

Enrobés - Bitume - Béton bitumineux - Poudre de caoutchouc – polymère – adhésivité – chaussée .



Sommaire :

Chapitre I	Introduction	1
Chapitre II	Le bitume	2
II.1	Origine du bitume	2
II.2	Définition des liants bitumineux	2
II.3	Historique du bitume	3
II.4	Propriétés des bitumes et de leurs dérivés	4
II.5	Principes généraux de fabrication	5
II.6	Classification des bitumes	6
II.7	Constitution des bitumes	7
II.8	Les essais de laboratoire relatifs au bitume	7
II.8.1	Détermination du point de ramollissement des produits bitumineux - Méthode bille et anneau	7
II.8.2	Pénétrabilité à l'aiguille	9
II.8.3	Détermination du point d'éclair et du point de flamme à vase ouvert par l'appareil de CLEVELAND	10
Chapitre III	Le béton bitumineux	12
III.1	Généralités - Différents types de bétons bitumineux	12
III.2	Propriétés générales des bétons bitumineux	15
III.3	Essais de laboratoire	19
III.3.1	Essai MARSHALL	19
III.3.2	Essai DURIEZ	26
III.3.3	L'orniéreur type LPC	31
III.4	Facteurs influençant un béton bitumineux	33
Chapitre IV	Formulation du béton bitumineux	37
IV.1	Principes généraux de formulation	37
IV.2	Méthodologie d'une étude de formulation	42

Chapitre V	Identification des constituants	47
V.1	Squelette minéral	47
V.2	Bitume	57
V.3	Ajout : Poudrette de caoutchouc	59
Chapitre VI	Formulation du béton bitumineux ordinaire	60
VI.1	Méthode proposée	60
VI.2	Formulation	60
VI.2.1	Composition granulométrique	60
VI.2.2	Teneur en liant	68
Chapitre VII	Caractéristiques mécaniques du béton bitumineux avec ajout	72
VII.1	Détermination des caractéristiques mécaniques du béton bitumineux avec ajout	72
VII.2	Interprétation des résultats et conclusion	76
VII.3	Vérification des résultats avec les granulats de CAP-DJINET	78
Chapitre VIII	Module de rigidité	80
VIII.1	Détermination indirecte du module de déformation des mélanges bitumineux	80
VIII.2	Calcul de l'épaisseur optimale de la couche de la couche de roulement par la méthode des équivalences	83
Chapitre IX	Conclusion générale	85
Annexe 1	Résultats détaillés de l'étude DURIEZ	86
Annexe 2	Résultats détaillés de l'étude MARSHALL	93

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Chapitre I

Introduction

I. INTRODUCTION

L'agressivité du trafic routier continuant à croître, et les crédits disponibles amoindris par la crise économique actuelle favorisent de plus en plus l'adoption de procédés de réalisation de chaussées nouveaux, assurant un comportement mécanique convenable et durable, et présentant un coût de mise en œuvre et d'entretien économique.

On a assisté depuis une vingtaine d'années dans les pays développés, à un intérêt particulier pour les nouveaux liants hydrocarbonés (bitumes modifiés). Le liant est amélioré par l'ajout d'additifs tel que les caoutchoucs ou les polymères dans le but de le faire travailler dans des conditions de plus en plus sévères : augmentation du trafic, variation de la température et réduction de l'épaisseur des couches d'enrobés.

Généralement ces possibilités ne peuvent pas être exploitées en pratique, du fait de leur coût de mise en œuvre élevé, et du problème de faisabilité à échelle industrielle (fabrication, transport et stockage).

Le présent travail consiste à apporter cet ajout en additifs non pas au liant mais directement dans le squelette solide d'un béton bitumineux ordinaire (couche de roulement de la chaussée). L'additif en question provient de déchets à base de polymères ou de caoutchouc (pneus usagés, semelles de chaussures, tapis de voitures ...) broyés sous forme de poudre. On va noter par la suite une éventuelle amélioration des performances mécaniques en recherchant le dosage optimal en poudre (amélioration de la stabilité, réduction de l'épaisseur de la couche de roulement nécessaire).

Dans le cas où les résultats obtenus sont satisfaisants, ce procédé permettra de répondre aux nouvelles exigences mécaniques (stabilité, vieillissement..) ,de faire des économies appréciables en matériaux à la mise en œuvre (réduction de l'épaisseur du corps de chaussée), et d'apporter une solution intéressante pour l'environnement (recyclage des déchets).

Chapitre II

Le bitume

II.1 ORIGINE DU BITUME

Le bitume est un constituant naturel des nombreux pétroles où il se trouve en solution. C'est le résidu obtenu après élimination des huiles servant de solvant par évaporation ou par distillation du pétrole brut.

De tels processus ayant eu lieu dans la nature ont donné naissance à des gisements de bitume. Certains de ces derniers sont pratiquement exempts de matières étrangères et dans lesquels le bitume est associé à des quantités variables de substances minérales et végétales.

Les gisements naturels où le bitume se trouve à l'intérieur d'une roche poreuse sont connus sous le nom de roches asphaltiques.

On désigne sous le nom de bitume l'élément résineux agglutinant des liants hydrocarbonés, qu'il soient d'origine houillère ou pétrolifère.

II.2 DEFINITIONS DES LIANTS BITUMINEUX

II.2.1 Définition générale

Le bitume est une substance visqueuse de couleur sombre, parfois presque solide à la température ordinaire. Complètement soluble dans le sulfure de carbone, il est constitué d'hydrocarbures et de leurs dérivés et est obtenu après évaporation artificielle ou naturelle des fractions volatiles de certains pétroles bruts.

II.2.2 Bitumes raffinés

Quand les composants volatils sont séparés des pétroles bruts par des méthodes artificielles (habituellement par distillation), le résidu porte l'appellation de *bitume raffiné*.

II.2.3 Bitumes soufflés ou oxydés

L'élimination des composants volatils des pétroles bruts est parfois suivie d'une oxydation. Celle-ci est produite dans des conditions bien déterminées, par soufflage d'air dans le produit bitumineux de base. Les bitumes ainsi fabriqués s'appellent *bitumes soufflés* ou *oxydés*. Ils se caractérisent par une plus faible ductilité par rapport aux bitumes de distillation ainsi qu'une plus faible susceptibilité aux variations de température (donc une plus grande résistance à l'oxydation).

II.2.4 Cut-backs et bitumes fluidifiés

Ce sont des bitumes auxquels on a ajouté des solvants plus ou moins volatils tel que le kérosène, afin de réduire leur viscosité. Ceci permet notamment de les utiliser à une température nettement plus basse que celle nécessaire à la mise en œuvre du bitume pur.

II.2.5 Vernis bitumineux

Ce sont des solutions bitumineuses dont les caractéristiques dépendent non seulement des bitumes mais aussi des solvants et des différents produits spéciaux incorporés dans ces mélanges. Ils sont employés notamment comme couche d'accrochage, d'étanchéité ou de protection contre la corrosion.

II.2.6 Emulsions de bitume

Ce sont des dispersions de bitume dans l'eau (émulsions directes : cas le plus fréquent) ou d'eau dans le bitume (émulsions inverses). Dans le premier cas, la phase dispersée est le bitume et la phase continue est l'eau. Tandis que dans le second cas, c'est évidemment l'inverse. Ces dispersions sont réalisées au moyen d'agents émulsifiants ou émulseurs.

II.3 HISTORIQUE DU BITUME

- Temps préhistoriques : squelettes d'animaux conservés intacts jusqu'à nos jours dans des gisements superficiels de bitume.
- 3200 à 540 avant J.C. : des fouilles archéologiques récentes ont révélé l'emploi du bitume sur une grande échelle en Mésopotamie et dans la vallée de l'Indus comme ciment pour la maçonnerie et la construction des routes, et comme couche d'imperméabilisation dans les réservoirs d'eau.
- 300 avant J.C. : utilisation considérable du bitume pour la conservation des momies.
- 1802 : utilisation en France de la roche asphaltique pour les revêtements de sols, de ponts et de trottoirs.
- 1832 : importation de la roche asphaltique et son utilisation à Philadelphie dans la construction des trottoirs.
- 1876 : premier revêtement posé à Washington en sheet-asphalt à base de bitume importé.
- 1902 : environ 20.000 tonnes de bitume de pétrole sont raffinées seulement aux Etats-Unis.

II.4 PROPRIETES DES BITUMES ET DE LEURS DERIVES

II.4.1 Propriétés physiques

Les bitumes réunissent les propriétés physiques suivantes :

- Ce sont de véritables matières thermoplastiques ; sous l'influence de la chaleur, ils se ramollissent, se liquéfient et deviennent suffisamment fluides pour être mis en œuvre. Ils reprennent leurs caractéristiques originales dès qu'ils se refroidissent. La viscosité des liants bitumineux est donc fonction de la température ;
- Ils sont de couleurs sombres et même, dans la plupart des cas, nettement noirs ;
- Leur densité à 25°C varie avec la dureté de : 0,99 à 1,07 ;
- Les bitumes sont des « *liants* », leur pouvoir collant est grand et leur adhésivité à la plupart des matériaux (pierres - bois - métal - verre) est excellente ;
- Ils sont insolubles dans l'eau et ne sont pas toxiques ;
- Leur perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau est pratiquement nulle, l'étanchéité est donc une des qualités principales des bitumes ;
- Ils sont de bons isolants thermiques ;
- La résistance au vieillissement est très bonne.

II.4.2 Propriétés chimiques

Les bitumes présentent les propriétés chimiques suivantes :

- Ils sont très peu réactifs à température ordinaire, ils n'attaquent pas les corps avec lesquels ils sont mis en contact ;
- Ils sont solubles dans de nombreux solvants organiques ;
- Ils ne sont pas altérés par la plupart des agents chimiques.

II.4.3 Propriétés électriques

Les bitumes possèdent les propriétés électriques suivantes :

- Ce sont de bons isolants électriques, leur résistivité augmente légèrement avec la viscosité ;
- Leur rigidité diélectrique est très bonne, elle s'accroît avec la dureté du bitume et décroît lorsque la température s'élève.

II.4.4 Propriétés mécaniques

- Module de rigidité : Pour un corps élastique donné, le module d'élasticité est une constante à une température donnée.

VAN DER POEL a étendu cette notion au cas des bitumes. Il a étudié les variations du rapport de l'effort à la déformation et l'a appelé *module de rigidité*. Il a constaté que ce module dépend de trois variables, et qui sont :

1. La différence entre la température du bitume et la température de ramollissement anneau et bille.
2. L'indice de pénétration du bitume qui se définit par l'équation :

$$\frac{\text{Log}800 - \text{Log}P}{AB - 25} = \frac{20 - PI}{10 + PI} \times \frac{1}{50}$$

- P : Pénétration à 25°C.
 AB : Température de ramollissement anneau et bille.
 PI : Indice de pénétration.

3. La durée d'application de l'effort.

II.5 PRINCIPES GENERAUX DE FABRICATION

Quelque soit le produit fabriqué à partir du pétrole brut, la première phase du raffinage est la distillation.

Le pétrole brut, préalablement chauffé dans un four, est introduit dans la partie inférieure de la colonne de fractionnement dont l'intérieur est garni de plateaux horizontaux percés d'ouvertures par lesquelles les compartiments communiquent. A la sortie du four, la température du pétrole brut est supérieure à la température d'ébullition de certaines fractions.

Dans la colonne de distillation, ces fractions se vaporisent et s'élèvent en empruntant les ouvertures ménagées dans les plateaux. En faisant ce chemin, elles perdent une partie de leur chaleur. Chacune des fractions rencontre ainsi un plateau dont la température est très légèrement inférieure à celle correspondant à son point d'ébullition, elle s'y liquéfie. Les ouvertures des plateaux sont coiffées d'une cloche qui force les vapeurs à barboter dans le liquide se trouvant déjà sur le plateau.

Si les vapeurs appartiennent à la fraction que recueille ce plateau, le barbotage active leur condensation. La chaleur produite à la base de la colonne favorise l'ascension vers des plateaux supérieurs de toute autre vapeur qui se trouve mélangée au liquide. Le trop-plein de chaque plateau s'écoule par des tuyauteries sur le plateau situé immédiatement au-dessous où il sera à nouveau chauffé. Des conduites branchées sur la colonne évacuent les fractions recueillies aux différents étages. Ces différentes fractions subissent ensuite les traitements de raffinage nécessaires pour leurs usages ultérieurs.

Ce fractionnement permet notamment d'obtenir les produits suivants classés dans l'ordre de volatilité décroissante : gaz, essence, white spirit, kérosène, gasoil, fuel oil, des produits de base pour huiles de graissage, bitume.

Il apparaît ainsi une autre définition très courante du bitume, à savoir qu'il est la fraction la plus lourde de certains types de pétroles bruts.

II.6 CLASSIFICATION DES BITUMES

On peut classer les bitumes selon leur origine et selon leur dureté.

II.6.1 Classification suivant leur origine

Les bitumes sont classés du point de vue de leur origine en plusieurs catégories :

- Les bitumes naturels ;
- Les bitumes d'extraction de roches ou de sable ;
- Les bitumes obtenus par calcination de certaines roches contenant des hydrocarbures ;
- Les bitumes asphaltiques de distillation ou brais de pétrole ;
- Les bitumes asphaltiques soufflés ;
- Les bitumes asphaltiques de cracking.

II.6.2 Classification suivant leur dureté

On distingue comme bitumes routiers :

- Les bitumes durs de pénétration 40/50
- Les bitumes semi-durs de pénétration 80/100
- Les bitumes semi-mous de pénétration 180/220
- Les bitumes mous de pénétration 280/300
- Les bitumes très mous de pénétration 300/350
- Les bitumes fluides de pénétration >350

Ainsi, un bitume désigné par l'appellation '*bitume 40/50*' est un bitume caractérisé par une pénétration comprise entre 40 et 50 (1/10^e de millimètre). L'essai de pénétration à l'aiguille sera expliqué en détail (§ II.8.2).

II.7 CONSTITUTION DES BITUMES

Le bitume est constitué de :

- carboïdes : qui sont insolubles dans le sulfure de carbone.
- carbènes : solubles dans le sulfure de carbone, mais insolubles dans le tétrachlorure de carbone.
- asphaltènes : solubles dans le sulfure de carbone et tétrachlorure de carbone, mais insolubles dans l'éther de pétrole.
- maltènes : solubles dans le sulfure de carbone, le tétrachlorure de carbone et l'éther de pétrole. Ils composent la partie huileuse du bitume.

II.8 LES ESSAIS DE LABORATOIRE RELATIFS AU BITUME

II.8.1 Détermination du point de ramollissement des produits bitumineux Méthode bille et anneau (NF T 66-008)

A) Définition

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

B) Principe

Une bille d'acier d'une masse de 3,5g et d'un diamètre de 9,53mm est placée sur une prise d'essai du produit, contenue dans un anneau de métal de dimensions normalisées. L'ensemble est chauffé dans un vase cylindrique en verre à une vitesse constante déterminée.

La température à laquelle la prise devient assez molle pour que la bille, ayant pénétré le produit bitumineux, tombe enveloppée de celui-ci, d'une hauteur déterminée, est prise comme le point de ramollissement du produit étudié.

C) Préparation de l'échantillon

Chauffer l'échantillon en prenant soin d'éviter les surchauffes locales et en l'agitant constamment jusqu'à ce qu'il soit assez fluide pour être versé. La température voulue doit être atteinte en deux heures au plus et ne doit pas dépasser le point de ramollissement présumé de plus de 110°C. Eviter l'introduction dans l'échantillon.

Verser l'échantillon chauffé dans deux anneaux, eux mêmes préchauffés à la même température. Pendant cette opération, les anneaux reposent sur une plaque enduite d'un mélange en parties égales de glycérine et de dextrine pour éviter l'adhérence du produit. Laisser refroidir pendant 30min au moins mais sans que ce temps ne puisse entraîner une durée totale de l'essai supérieure à 240min.

Les échantillons mous à température ambiante doivent être refroidis pendant 30min au moins à une température inférieure de 8°C ou plus du point de ramollissement présumé.

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

D) Mode opératoire

1. Pour les produits de point de ramollissement inférieur ou égal à 80°C

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 $5\pm 1^\circ\text{C}$ sur une hauteur comprise entre 102 et 108mm. Maintenir pendant 15min à une température de 5°C, en plaçant si nécessaire le vase cylindrique dans de la glace fondante. Ensuite, à l'aide d'une pince, placer une bille préalablement amenée à la température du bain, au centre de chaque guide.

Chauffer de façon uniforme tel qu'on élève la température de 5°C par minute. Noter pour chaque ensemble anneau-bille 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.

2. Pour les produits de point de ramollissement supérieur à 80°C

Suivre le même mode opératoire que précédemment à l'exception des points suivants :

- utiliser pour le liquide dans le vase de la glycérine au lieu d'eau ;
- utiliser le thermomètre « échelle haute » ;
- porter le bain liquide à la température initiale de 32°C.

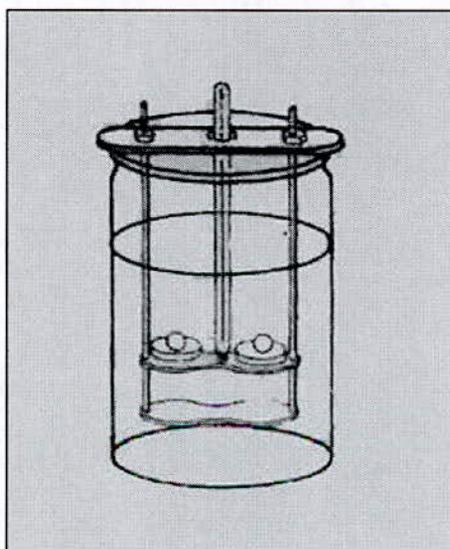


Figure II.1 - Ensemble de l'appareillage de la méthode Bille-Anneau monté
 Pour les bitumes, les valeurs obtenues doivent être comprises dans l'intervalle correspondant à la classe du bitume utilisé (voir tableau II.1).

Bitume	180/220	100/120	80/100	60/70	40/50	20/30
Point de ramollissement (Méthode bille et anneau)	34 à 43	39 à 48	41 à 51	43 à 56	47 à 60	52 à 65

Tableau II.1 - Point de ramollissement de quelques bitumes routiers

II.8.2 Pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-004)

A) Définition

La pénétration est l'expression de la profondeur à laquelle pénètre une aiguille type, de dimensions déterminées, dans un échantillon de bitume sous des conditions définies de charge, de temps et de température.

B) Mode opératoire

L'échantillon sera complètement fondu à la plus basse température possible, et agité jusqu'à ce qu'il soit homogène et exempt de bulles d'air. Il sera ensuite coulé dans la coupelle jusqu'à une hauteur d'au moins 30mm. L'échantillon sera protégé des poussières et on laissera refroidir dans l'air à une température qui ne sera pas inférieure à 18°C pendant une heure. Il sera alors placé dans le bain-marie maintenu à une température de 25°C en même temps que le récipient extérieur et y restera au repos pendant une heure. Le récipient extérieur contenant la coupelle sera alors placé sur le plateau du pénétromètre. L'aiguille chargée à 100g sera placée pour être mise en contact avec la surface de l'échantillon ; ceci sera obtenu en faisant coïncider la pointe de l'aiguille avec son image réfléchiée sur la surface de l'échantillon, image produite par une source lumineuse convenablement placée. On notera alors, soit la position de l'aiguille du cadran, soit on la ramène au zéro.

L'aiguille de pénétration sera alors déclenchée pendant la période de temps spécifiée (5 sec) ; après on mesurera, au pénétromètre, la profondeur d'enfoncement (en dixième de millimètres).

On fera au minimum trois essais à des points distants d'au moins un centimètre du bord de la coupelle et à un centimètre les uns des autres. Après chaque essai, l'échantillon et le récipient extérieur seront placés dans le bain d'eau, et la pointe de l'aiguille sera soigneusement essuyée avec un chiffon propre et sec pour enlever le bitume qui y adhère.

La pénétration sera la moyenne à une unité près de trois essais au moins. L'écart entre les différentes valeurs ne devra pas être supérieur à la tolérance calculée à une unité près selon la formule :

$$\text{Tolérance} = \frac{\text{Pénétration}}{100} + 1$$

II.8.3 Détermination du point d'éclair et du point de flamme à vase ouvert par l'appareil de CLEVELAND (ASTM D 92-72)

A) Définition

Cette méthode permet la détermination du point d'éclair et du point de flamme de tous les produits pétroliers à l'exception des huiles combustibles et ceux ayant un point d'éclair à vase ouvert inférieur à 79°C.

B) Principe

L'échantillon est versé dans le vase de l'appareil CLEVELAND jusqu'au niveau spécifié par une rainure. Il sera chauffé, dans un premier temps, jusqu'à une température inférieure mais proche de la température du point d'éclair. Ensuite, on réduit l'énergie de chauffage pour que l'augmentation de la température soit plus lente.

A des intervalles déterminés, une petite flamme d'essai est passée au dessus du vase. La plus basse température à laquelle la flamme d'essai provoque l'inflammation des vapeurs au dessus de la surface du liquide est prise comme point d'éclair.

Pour déterminer le point de flamme, l'essai est poursuivi jusqu'à ce que l'application de la flamme d'essai provoque une inflammation des vapeurs dégagées pour une durée spécifiée.

C) Préparation de la prise d'essai

Les prises d'essai doivent être chauffées jusqu'à ce qu'elles deviennent suffisamment fluides avant d'être soumises à l'essai. Cependant, la température ne devra jamais dépasser une valeur inférieure de 17°C de celle du point d'éclair présumé.

D) Mode opératoire

- Nettoyer et sécher soigneusement toutes les parties du vase et de ses accessoires, avant de commencer l'essai.
- Remplir le vase avec l'échantillon jusqu'au minimum indiqué par la marque de remplissage.
- Placer le vase dans le dispositif de chauffage, placer le thermomètre, et régler le chauffage à un régime tel que la température indiquée par le thermomètre s'accroisse dans un premier temps de (14 à 17°C) / min. jusqu'à atteindre 56°C, puis de (5 à 6°C)/min.
- Allumer la flamme et la régler à la grosseur d'une perle.

- Présenter la flamme à l'échantillon aux températures multiples de 2°C, en commençant à une température inférieure d'au moins 28°C du point d'éclair présumé.
- Noter comme point d'éclair la température lue sur le thermomètre au moment où l'application de la flamme d'essai provoque un éclair distinct.
- Noter comme point de flamme la température lue sur le thermomètre au moment où l'application de la flamme d'essai provoque une inflammation d'au moins 5 sec.

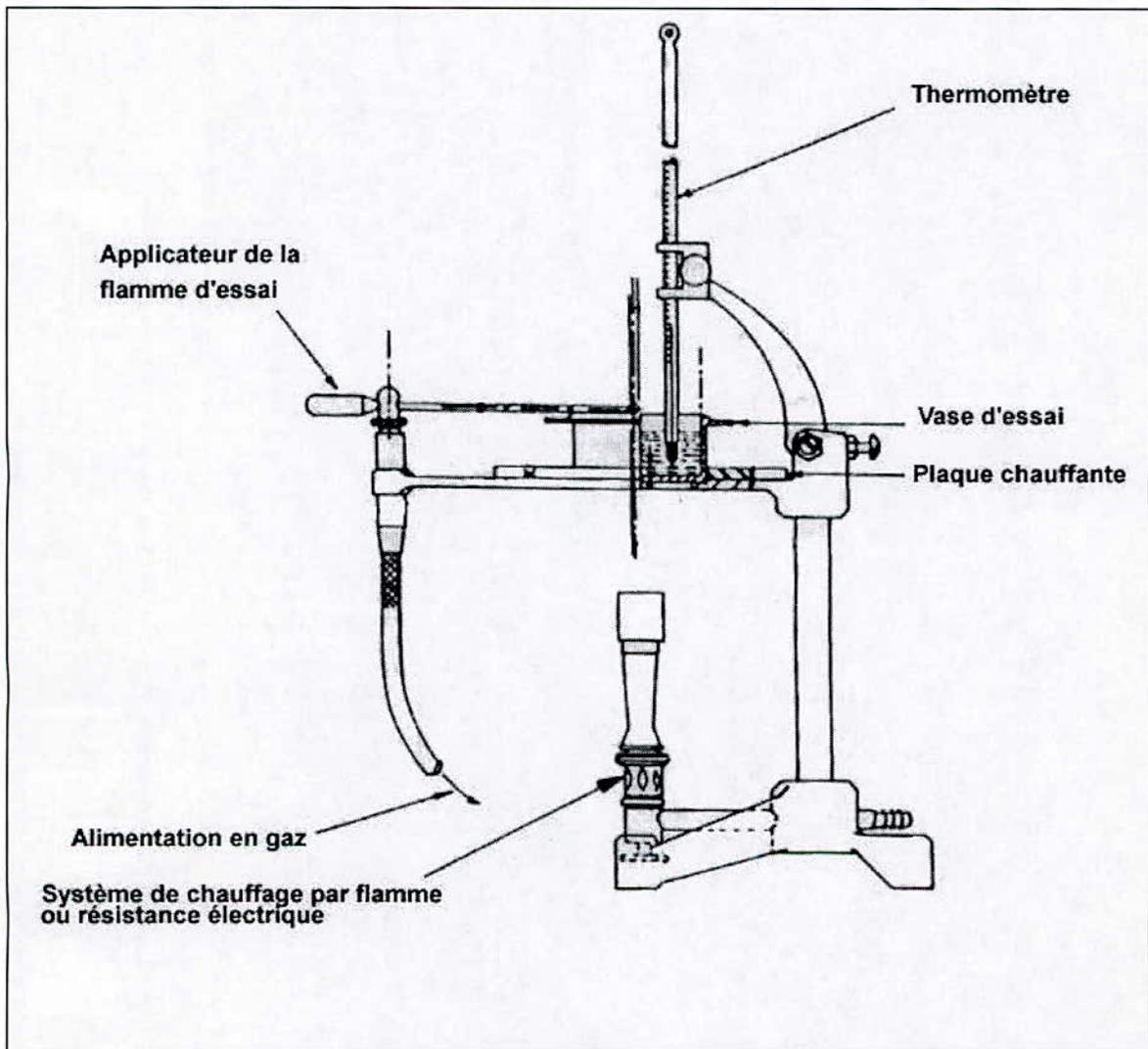


Figure II.2 - Appareil CLEVELAND

Chapitre III

Le béton bitumineux

III.1 GENERALITES - DIFFERENTS TYPES DE BETONS BITUMINEUX

III.1.1 Généralités

Les enrobés hydrocarbonés employés en couche de roulement des chaussées doivent, par leurs propriétés, répondre du mieux possible aux problèmes qui sont posés par le trafic et la circulation en général, et par les contraintes que leur imposent le climat et l'exploitation du réseau.

Les principaux matériaux utilisés en couche de roulement de chaussées sont les suivants :

- les enrobés denses à chaud, comprenant :
 - les enrobés denses proprement dits ;
 - les bétons bitumineux 0/10 et 0/14 ;
 - les bétons bitumineux 0/10 cloutés ;
 - les enrobés d'entretien 0/6, 0/10 et 0/14 appliqués en couches minces ;
 - les enrobés fins : sable enrobé, micro béton bitumineux ;
- les enrobés ouverts à chaud : enrobés drainants ;
- les bétons bitumineux coulés à chaud ;
- les coulis bitumineux ;
- les enrobés pour pistes d'aérodrome ;
- les enrobés stockables à froid ;
- les enrobés spéciaux.

Nota : Un enrobé dit « 0/D » est un mélange de différentes fractions granulaires dont la granularité (diamètre des granulats) varie entre 0 et D.

III.1.2 Différents types de bétons bitumineux

1) Les bétons bitumineux 0/10 et 0/14 (BB 0/10, BB 0/14)

Ces bétons bitumineux sont destinés aux couches de roulement et aux couches de liaison sur des chaussées ayant une structure suffisante, c'est-à-dire dans le cas de chaussées neuve ou de renforcement.

On distingue deux catégories de formules : les formules *semi-grenues* et les formules *grenues*, dans lesquelles les pourcentages de gravillons et de sable sont donnés dans le tableau III.1 :

		Refus en %	
		Formule semi-grenue	Formule grenue
BB 0/10	Tamis de 6mm	25 à 35	35 à 45
	Tamis de 2mm	55 à 70	60 à 75
BB 0/14	Tamis de 6mm	40 à 50	50 à 60
	Tamis de 2mm	60 à 75	60 à 75

Tableau III.1

Seules les formules semi-grenue (BBSG) sont pratiquement utilisées, car les formules grenues à teneur élevée en gravillons, sont difficiles à mettre en œuvre ; en effet la moindre ségrégation fait apparaître des zones trop riches en gravillons qui ne peuvent être compactées, à une teneur en vides suffisamment faible, l'emploi de formules très grenues demanderait un respect de la composition granulométrique dans toutes les phases de fabrication et de mise en œuvre.

C'est surtout sur les bétons bitumineux semi-grenus 0/14 (BBSG 0/14), mis en œuvre en une seule couche de 8 cm, que se porte l'attention, puisqu'ils constituent la couche de roulement type des chaussées neuves et des renforcements.

2) Les bétons bitumineux cloutés

Ils trouvent leur utilisation dans l'exécution de couches de roulement de chaussées neuves ou de renforcements, ainsi que dans certains cas de renouvellement de couches de surface de chaussées ne présentant pas de déformabilités excessives.

Les bétons bitumineux 0/10 cloutés sont constitués d'un enrobé support appelé *matrice* sur lequel sont enchâssés des granulats à granularité serrée, désignés par le terme de clous. L'objet essentiel du cloutage est de séparer la fonction adhérence de toutes les autres fonctions assurées par une couche de roulement telles que le confort des usagers et la protection du corps de chaussée, etc. On obtient ainsi une texture superficielle grenue, discontinue et rugueuse qui permet de briser les films d'eau et d'éviter le phénomène d'aquaplanage.

3) Les bétons bitumineux minces (BBM), très minces (BBTM) et ultra-minces (BBUM)

Autrefois appelés enrobés minces d'entretien, ils s'appliquent aussi bien sur chaussée neuve qu'en entretien. L'appellation « mince » vient de l'épaisseur de mise en œuvre qui est comprise, en fonction de la granulométrie utilisée, entre 3 et 5 cm pour les BBM, entre 1,5 et 3 cm pour les BBTM, et de 1,5 cm pour les BBUM.

4) Les bétons bitumineux drainants (BBDr)

Les bétons bitumineux drainants sont des enrobés dont le pourcentage de vides est élevé et dont les vides sont communicants. Ils assurent la drainabilité de l'eau de pluie dans la masse de l'enrobé. Il existe les BBDr classiques (vides de l'ordre de 20%) et les BBDr à teneur en vides élevée (vides de l'ordre de 30%). Ces derniers sont l'optimisation du caractère drainant des premiers (intercommunication et importance des vides). L'épaisseur nominale d'application est de 4 cm. Ils ne jouent pas un rôle structurel.

5) Les bétons bitumineux coulés à chaud

Le béton bitumineux coulé est un matériau à forte teneur en liant hydrocarboné, dont le squelette minéral très riche en fines (20 à 25%) est étudié de telle façon que, sans compactage, les vides soient inexistantes. Le mélange est malaxé à 230°C parfois durant des heures.

Les bétons bitumineux coulés à chaud permettent d'obtenir une couche de surface souple, résistante et étanche qui tolère de très faibles épaisseurs (travaux d'entretien). Toutefois, ils ont tendance à s'orniérer en été, et ne participent pas à la stabilité mécanique de la chaussée.

III.2 PROPRIETES GENERALES DES BETONS BITUMINEUX

III.2.1 Rappels de terminologie

Les enrobés hydrocarbonés font appel à une terminologie spécifique :

- **Le pourcentage en liant**, dans une formule, est le quotient du poids du liant rapporté au poids des granulats secs.
- **La compacité absolue** d'un enrobé s'exprime par le rapport des masses volumiques apparente et réelle rapporté à 100. C'est cette compacité qui est toujours prise en compte pour la formulation des enrobés.
- **La masse volumique réelle** d'un enrobé dépend des masses volumiques de chacun des constituants et de leur pourcentage dans l'enrobé. Elle correspond donc à la masse volumique qu'aurait le matériau sans vide.
- **La masse volumique apparente** d'un enrobé se calcule, soit à partir d'une éprouvette réalisée en laboratoire, soit à partir d'un échantillon prélevé sur la route. Elle correspond au poids de l'enrobé réel avec ses vides et elle est donnée par le quotient du poids rapporté au volume de l'éprouvette.
- **La compacité relative** de l'enrobé, qu'il ne faut pas confondre avec la *compacité absolue*, résulte de la comparaison avec une masse volumique apparente de référence déterminée au cours d'un essai de laboratoire et après une planche d'essai de compactage. Elle s'exprime par le rapport de ces deux masses volumiques (apparente et d'essai), rapporté à 100.
- **Le pourcentage de vide** d'un enrobé est le complément à 100% de la compacité absolue : $C_a = 100\% - \% \text{ de vides}$

III.2.2 Viscoélasticité - Module complexe

Les matériaux bitumineux présentent la particularité suivante :

- Pour un niveau de contrainte fixé, la déformation dépend du temps ; on dit que le comportement de ces matériaux est viscoélastique, propriété qui se traduit par la dépendance du module à la fréquence d'application de la charge ;

Le module est élevé lorsque le matériau est soumis à une *sollicitation rapide* (c'est le cas lorsque la chaussée subit le passage d'un véhicule roulant à vitesse normale), le module est faible, voire très faible lorsque le matériau est soumis à une sollicitation lente (véhicule roulant à faible vitesse, dans une côte par exemple).

- La deuxième variable qui influe sur le module d'un enrobé est la *température* qui joue un rôle symétrique de celui de la fréquence : aux fortes températures correspond un faible module ; il augmente rapidement quand la température diminue.

L'essai de flexion dynamique, qui permet de définir le module, est effectué sur des éprouvettes trapézoïdales, encastrées à leur base.

Compte tenu du caractère viscoélastique du matériau, la déformation accuse un retard sur la contrainte, retard qui se traduit par un angle de déphasage φ et on a :

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad \text{pour une contrainte du type : } \sigma_{(t)} = \sigma_0 \sin(\omega t).$$

En notation imaginaire, le module s'écrit :

$$E^*(i\omega) = |E^*|e^{i\varphi} = E_1 + iE_2$$

Ce module peut être caractérisé par deux composantes :

- $|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ appelé module de rigidité ;
- l'angle de phase φ qui caractérise le caractère visqueux.

On a représenté sur la figure III.1 les courbes isothermes du module complexe.

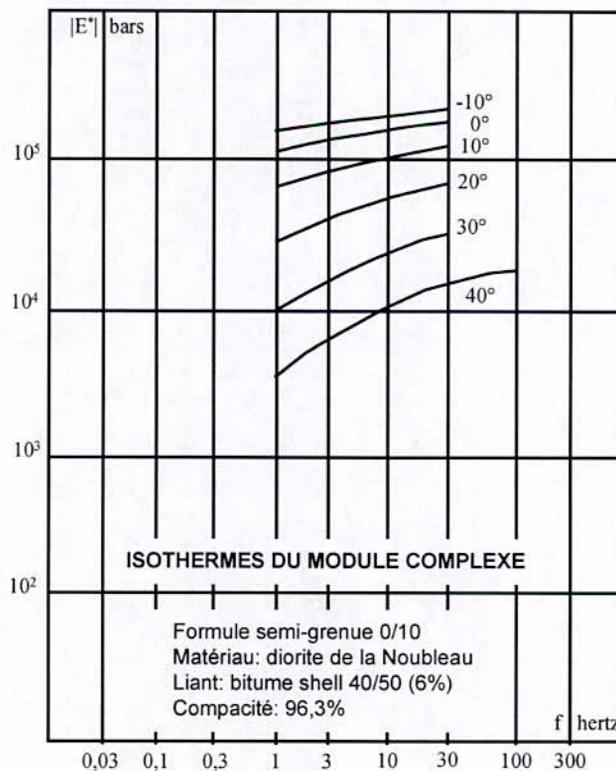


Figure III.1 - Courbes isothermes du module complexe pour un matériau bitumineux.

Il apparaît sur ces courbes que l'influence de la fréquence de chargement est d'autant plus forte que la température est élevée.

L'influence de la température sur le module est par ailleurs très importante puisque le module est divisé par 10 lorsque la température passe de 10°C à 40°C.

En définitive, pour affecter un module à un matériau bitumineux, il est nécessaire de choisir une température et une fréquence d'application des charges :

- le choix d'une température de calcul est effectué à partir de l'analyse des dommages dans les structures sur un cycle annuel de température ;
- le choix de la fréquence est effectué à partir de l'étude de la variation dans le temps de la déformation en un point au passage d'une charge roulante. La fréquence de sollicitation dépend de la vitesse de la charge et de l'épaisseur de la couche. Pour une couche mince et pour des véhicules circulant aux vitesses usuelles cette fréquence est élevée (de l'ordre de 50Hz).

III.2.3 Fatigue

On appelle résistance à la fatigue à N cycles la valeur de la sollicitation (contrainte ou déformation) pour laquelle le matériau peut supporter N cycles puis se rompt. Ce nombre de cycles de chargement N entraînant la rupture est souvent appelé durée de vie.

Les essais sur enrobés sont réalisés en traction par flexion sur des éprouvettes trapézoïdales encastrées à leur base en répétant un niveau de contrainte ou de déformation jusqu'à rupture de l'éprouvette. La température de l'essai est souvent de 10°C et la fréquence de 25Hz.

Les essais de fatigue sont en général effectués à déformation ϵ constante. La courbe de fatigue est linéaire dans une échelle logarithmique, c'est-à-dire que $\text{Log}\epsilon$ est fonction linéaire du nombre de cycles, et la loi de fatigue est donnée par l'équation suivante :

$$\epsilon = BN^{-\beta}$$

Le coefficient $1/\beta$ appelé pente de la courbe de fatigue, est de l'ordre de 5 pour tous les matériaux bitumineux.

III.2.4 Traction - Compression

L'essai de fatigue n'est pas le seul essai de type mécanique qui soit effectué sur les matériaux bitumineux. Des essais conventionnels de compression simple ou diamétrale (essai brésilien) sont aussi utilisés, mais à la différence des matériaux traités aux liants hydrauliques, ces essais ne permettent pas de situer, même approximativement la courbe de fatigue des matériaux.

L'essai de traction directe, qui consiste à imposer un allongement ε à l'éprouvette, dans des conditions normalisées de vitesse de déformation et de température, permet de déterminer le module de l'enrobé à diverses températures. L'essai permet par ailleurs, de déterminer un facteur de non linéarité du module en fonction de la déformation, que l'on peut considérer comme représentatif de l'endommagement du matériau, produit par un cycle de sollicitations.

III.2.5 Perméabilité - Imperméabilité

Elles dépendent essentiellement de la compacité :

- il faut avoir une compacité supérieure à 90% ou mieux 92% pour obtenir un béton bitumineux « imperméable » au sens routier du terme ;
- il faut une compacité supérieure à 97% pour obtenir « l'imperméabilité » au sens hydraulique.

III.3 ESSAIS DE LABORATOIRE

III.3.1 Essai MARSHALL

A) Généralités

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.

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.

B) 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.

C) Fabrication de l'enrobé

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 :

Enrobé à base de bitume	80/100	: 140°C
Enrobé à base de bitume	60/70	: 150°C
Enrobé à base de bitume	40/50	: 160°C
- 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 œuvre.

2) Malaxage

- Verser la quantité nécessaire du liant dans le récipient des granulats puis mettre tous 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.

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 (15°C 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.

D) 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.

E) Expression des résultats

$$\text{MVRg} = \frac{100}{\frac{P_1}{\text{MVRg}_1} + \frac{P_2}{\text{MVRg}_2} + \dots + \frac{P_n}{\text{MVRg}_n}}$$

MVRg : masse volumique réelle du mélange granulaire.

Pi : pourcentage en poids des différentes fractions du mélange.

MVRgi : masse volumique réelle des différentes fractions du mélange.

$$\text{MVR} = \frac{100 + P_1}{\frac{100}{\text{MVRg}} + \frac{P_1}{\text{MVR}_1}}$$

MVR : masse volumique réelle de l'enrobé.

P_1 : pourcentage en poids du liant.
 MVR_1 : masse volumique réelle du liant.

$$C = \frac{MVA}{MVR} \times 100 \quad C : \text{compacité de l'éprouvette.}$$

$$V_R = 100 - C \quad V_R : \text{pourcentage des vides.}$$

$$MVA_g = MVA \left[1 - \frac{P_1}{100 + P_1} \right]$$

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).

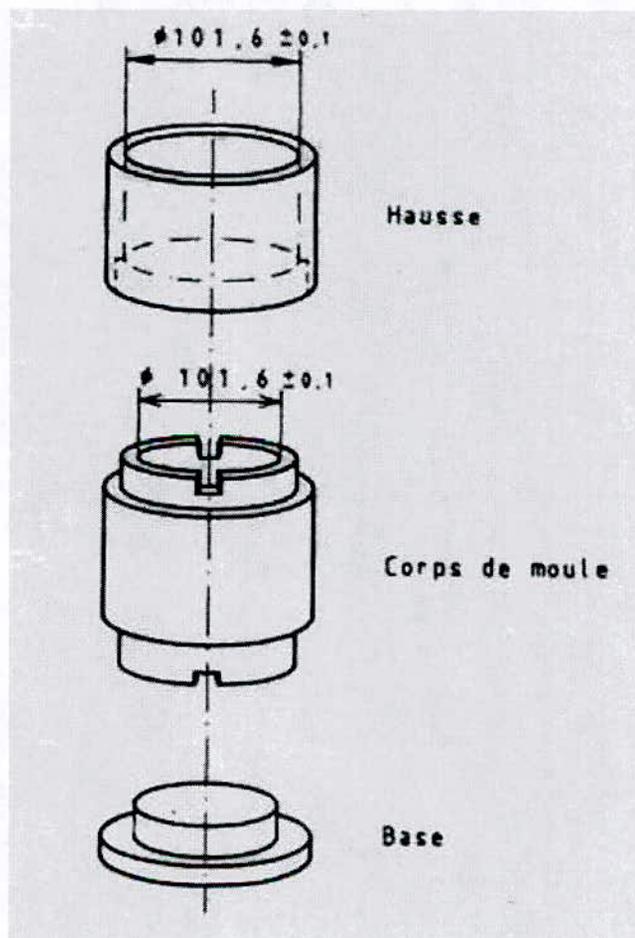


Figure III.2 - Moule de compactage

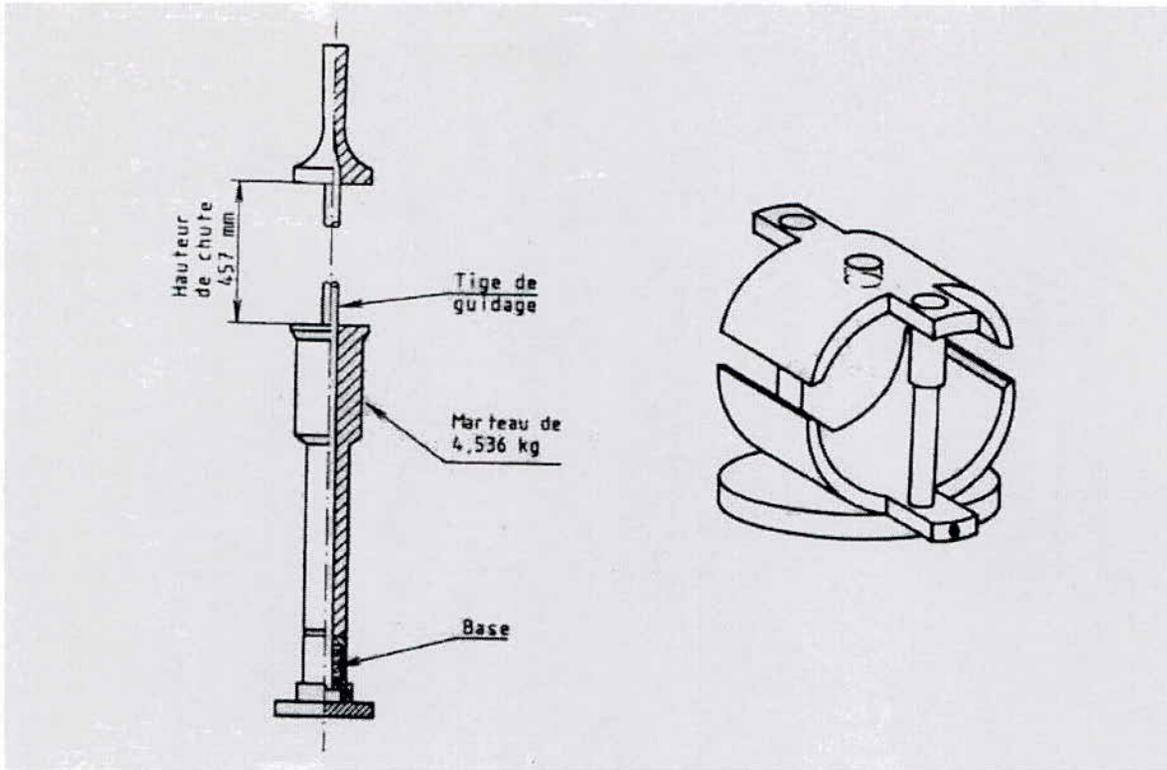


Figure III.3 - Dame de compactage

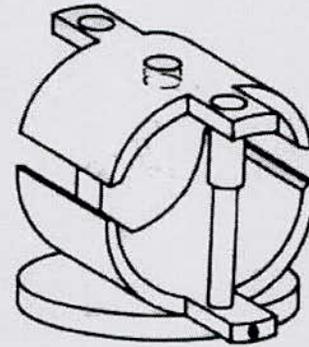


Figure III.4 - Mâchoires d'écrasement

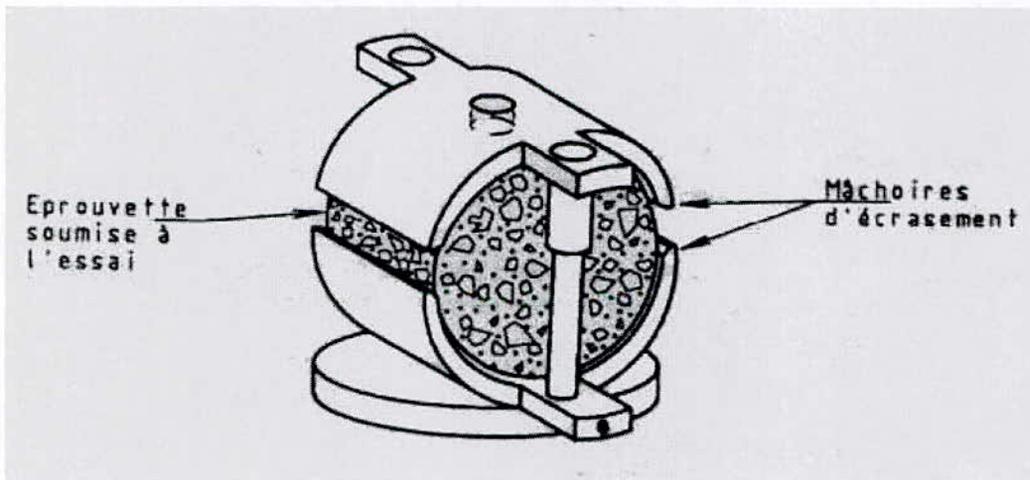


Figure III.5 - Principe de l'essai de compression



Figure III.6 - Malaxeur



Figure III.7 - Echantillonneur



Figure III.9 - Compactage des éprouvettes



Figure III.8 - Remplissage des moules



Figure III.10 - Bain thermostatique

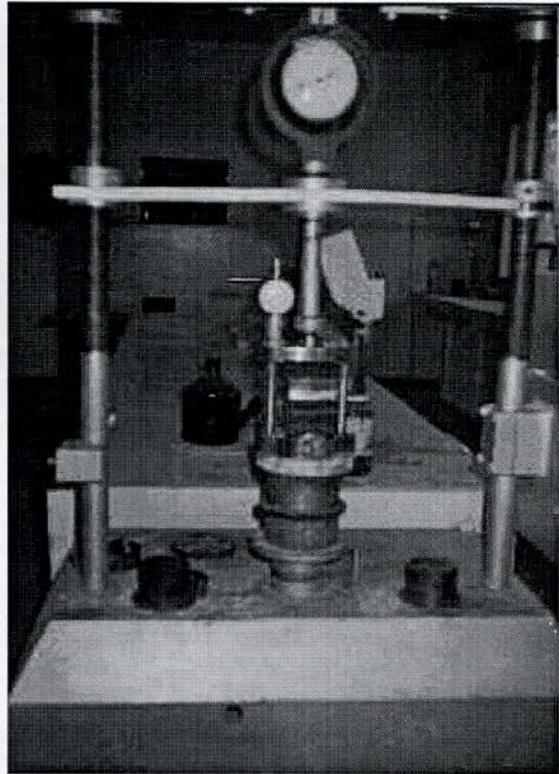


Figure III.11 - Presse d'écrasement à avancement constant avec l'éprouvette MARSHALL en place

III.3.2 Essai DURIEZ

A) Généralités

1) Définition

L'essai Duriez a pour but de déterminer, pour une température est un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud 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.

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 des 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, cependant il peut être aussi réalisé à trois températures : à 0°C, 18°C et 50°C, pour permettre d'appréhender une forme de susceptibilité thermique du mélange hydrocarboné.

B) Appareillage

Moules :

- Mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$: Un minimum de 12 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur $(80 \pm 0,1)\text{mm}$ et de hauteur minimale de 190mm et des pistons de diamètre extérieur $(79,8 \pm 0,05)\text{mm}$.
- Mélanges hydrocarbonés de $D > 14\text{mm}$: Un minimum de 10 moules métalliques cylindriques de diamètre intérieur $(120 \pm 0,1)\text{mm}$ et de hauteur minimale de 270mm.

Presse :

- Une presse permettant le compactage à double effet et le maintien :
 - d'une charge de 180 KN pendant 5min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14\text{mm}$.
 - d'une charge de 60 KN pendant 5min sur chaque éprouvette pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$.
- Une presse à vitesse d'avancement moyen à vide réglée à la valeur de $(1 \pm 0,1)\text{ mm/s}$ équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort en cours d'essai.

C) Préparation des éprouvettes

1) Remplissage des moules

- Les prélèvements ont les masses suivantes :
 - 1000g dans le cas de mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$.
 - 3500g dans le cas de mélanges hydrocarbonés de $D \geq 14\text{mm}$.
- Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule.
- Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve réglée à la température de référence, et doivent y séjourner entre $\frac{1}{2}$ et 2 heures.

2) Compactage des éprouvettes

- Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet. Les opérations doivent être menées de manière à éviter au maximum les déperditions de température.
- La charge appliquée doit être atteinte en 60s maximum et maintenue entre 300 et 305s. Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue.
- Les éprouvettes sont démoulées après retour à la température ambiante (durée minimale 4 heures).

D) Mode opératoire

- Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées à 1g près (M), la hauteur et le diamètre sont mesurés à 0,1mm près, en trois zones différentes. On calcule ensuite la masse volumique apparente MVA à partir des mesures géométriques.
- A partir des MVA, les éprouvettes sont réparties en trois lots homogènes.
 - 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.
- Conservation des éprouvettes : Durant les premières 24 heures après fabrication, les éprouvettes sont conservées à température ambiante (15 à 25°C) sur une surface plane.
- Conservation sans immersion : Après les premières 24 heures, les éprouvettes sont conservées à $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$ et dans une ambiance à $(50 \pm 10)\%$ d'humidité relative pendant 7 jours.
- Conservation avec immersion : Après les premières 24 heures, les éprouvettes sont soumises à un traitement de dégazage. Pendant 1 heure, les éprouvettes sont soumises à une pression résiduelle de 350 mmHg. Ensuite, l'eau est introduite jusqu'à immersion complète des éprouvettes tout en maintenant la pression résiduelle de 350 mmHg. Les éprouvettes sont maintenues immergées pendant 2 heures sous la même pression.

A la fin de cette opération, les éprouvettes sont essuyées légèrement et pesées (M_{j+1}). Après cette pesée, les éprouvettes sont immergées dans de l'eau à $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$ pendant 7 jours.

– Essai de compression simple :

8 jours après avoir confectionné les éprouvettes, elles seront soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservé avec ou sans immersion. La vitesse du plateau de la presse est réglée à $(1 \pm 0,1)\text{mm/s}$. La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai.

E) Expression des résultats

1) Résistance en compression

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. Il est exprimé en mégapascals 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.

2) Calcul du pourcentage de vides

– Pourcentage des vides :
$$v\% = 100 \left(1 - \frac{\text{MVA}}{\text{MVR}} \right)$$

MVA : masse volumique calculée par pesée hydrostatique.

MVR : masse volumique réelle du mélange hydrocarboné.

– Masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette (MVA_g) :

$$\text{MVA}_g = \text{MVA} \left[1 - \frac{\text{TL}}{100 + \text{TL}} \right]$$

TL : teneur en liant.

– Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant (V0%) :

$$V0\% = \frac{\text{MVR}_g - \text{MVA}_g}{\text{MVR}_g} \times 100$$

MVR_g : masse volumique réelle des granulats.

– Pourcentage des vides comblés par le liant (VL) :

$$VL = \frac{V0\% - v\%}{V0\%} \times 100$$



Figure III.12 - Etuve contenant les parts des gâchées d'enrobé maintenues à 160°C

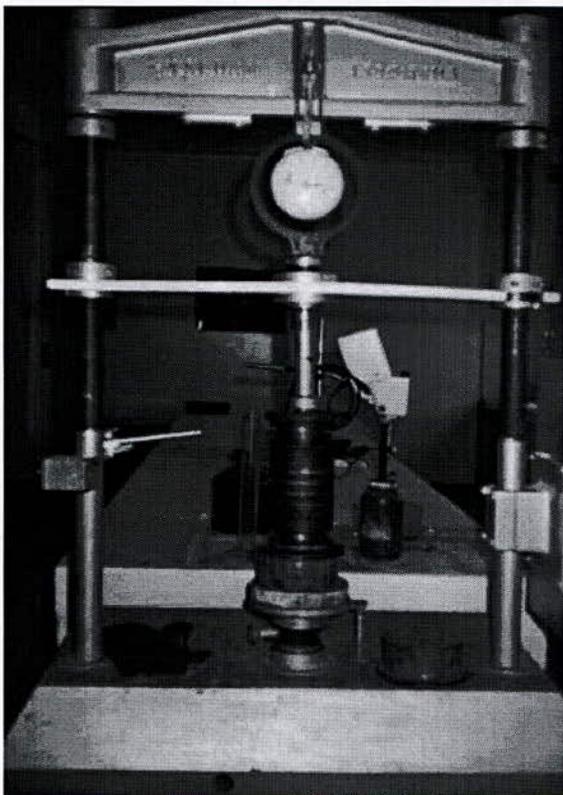


Figure III.13 - Compactage statique à double effet de l'éprouvette DURIEZ

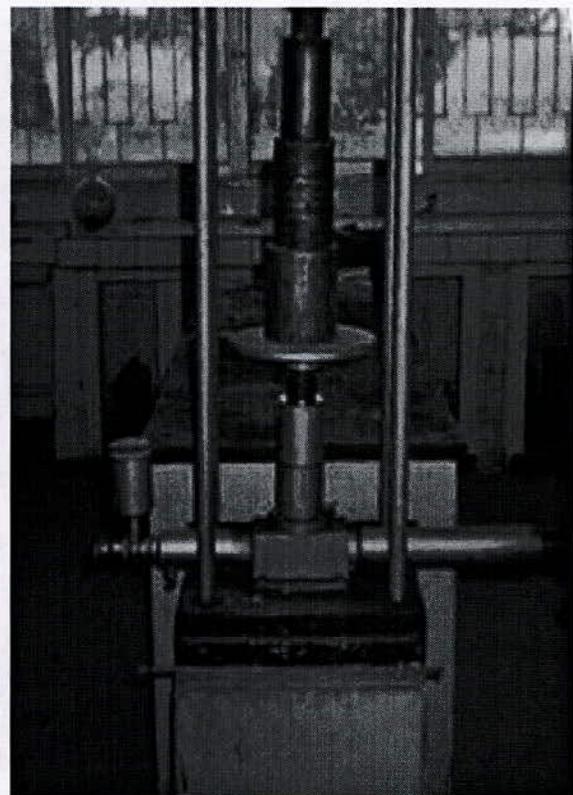


Figure III.14 - Démoulage de l'éprouvette DURIEZ

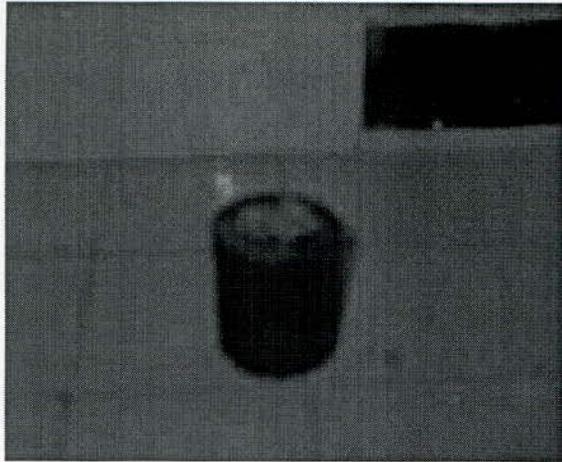


Figure III.15 - Epreuve DURIEZ



Figure III.16 - Dégazage des éprouvettes

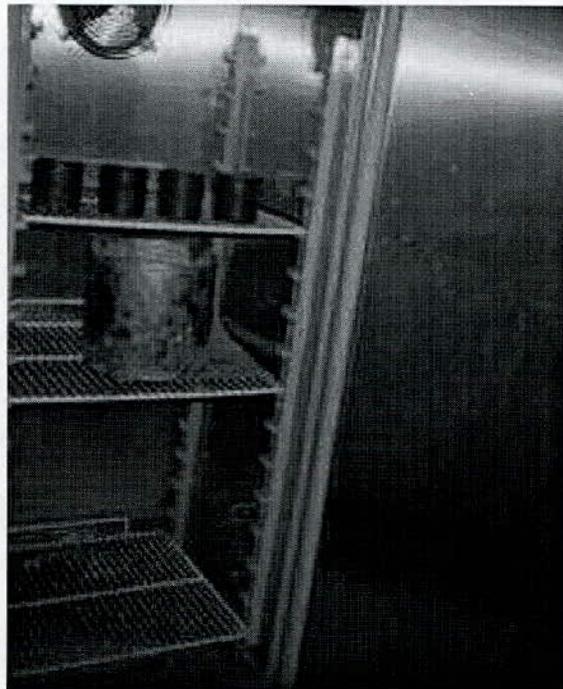


Figure III.17 - Conservation des éprouvettes DURIEZ à 18°C

III.3.3 L'orniéreur type LPC

Dans le but de compléter les essais classiques de formulation des enrobés bitumineux, essai d'immersion-compression et essai Marshall, les LPC (Laboratoires des Ponts et Chaussées) se sont intéressés à la mise au point d'un essai plus directement comparable aux conditions réelles de sollicitations sur chaussées.

A) Principe de l'appareil

L'orniéreur a été conçu pour pouvoir tester en laboratoire le comportement de matériaux bitumineux soumis à la circulation, essentiellement sous l'angle de leur résistance vis-à-vis des déformations du type orniérage-fluage. Pour ce faire, les échantillons subissent le passage d'un pneumatique, dans des conditions de charge et de pression voisines des sollicitations engendrées par les véhicules lourds, ce qui produit une déformation permanente. Le relevé de la profondeur de cette empreinte ou *ornière* en fonction du nombre de passages va servir à caractériser le comportement de l'échantillon soumis à cet essai d'orniérage.

B) Description de l'appareil

Les caractéristiques essentielles de l'appareil sont les suivantes :

- course longitudinale réglable de façon discontinue aux valeurs suivantes en mm : 360, 410, 450 et 500 ;
- nombre de roues : deux ;
- vitesse maximale : 1,6 m/s ;
- accélération maximale : 10 m/s² ;
- fréquence du mouvement : 1 Hz ;
- inclinaison de chaque roue dans son plan réglable indépendamment de 0 à 10° ;
- nombre d'éprouvettes : deux ;
- course verticale du berceau support de l'éprouvette : 150 mm ;
- force appliquée sur chaque éprouvette $0 < F < 500$ daN.

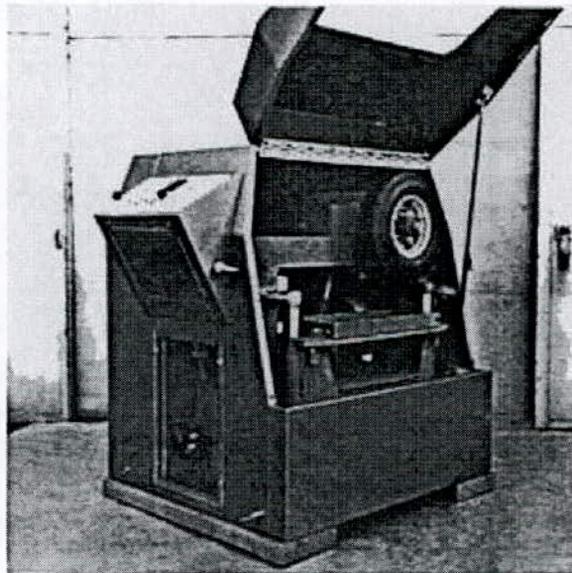


Figure III.18 - L'orniéreur type LPC

C) Eprouvettes d'essai

Ces éprouvettes, soit confectionnées spécialement en laboratoire, soit prélevées par sciage, sont de forme parallélépipédique et gardent des dimensions restreintes ($L=500$ mm, $l=180$ mm, $h=$ variable de 20 à 140mm).

Pour confectionner les éprouvettes en laboratoire, le processus retenu consiste à compacter de l'enrobé à chaud, directement dans le moule d'essai chauffé au préalable, à l'aide de 120 passes d'un rouleau lisse d'un poids total de 150kg et d'une largeur égale à celle de l'éprouvette. Les températures de confection sont celles définies dans l'essai de compression simple, en fonction du liant utilisé.

D) Processus d'essai

- course du pneumatique : 410 mm ;
- épaisseur de la plaque support : 19 mm ;
- épaisseur de l'éprouvette : 10 cm ;
- largeur de l'éprouvette : 18 cm ;
- charge appliquée : 500 daN ;
- pression de gonflage du pneumatique : 6 bars ;
- température d'essai : 60°C pour les couches de roulement et 50°C pour les couches de base ;
- cadence des essais : 2 fois deux plaques par semaine.

E) Exploitation de l'essai

L'ornièrè est définie comme le déplacement vertical moyen de la partie circulée de la plaque. Elle est mesurée à plusieurs reprises au cours de l'essai sur trois à cinq profils à l'aide d'une jauge de profondeur. On tire de ces valeurs la courbe de l'évolution de l'ornièrè en fonction du nombre de cycles, représentée en général par une droite en coordonnées semi-logarithmiques.

$$Y = A + \ln N$$

Y est l'ornièrè à N cycles, A et B sont des constantes dépendant de la formulation testée.

III.4 FACTEURS INFLUENCANT UN BETON BITUMINEUX

Les propriétés des enrobés hydrocarbonés peuvent varier si l'on influe sur les caractéristiques des trois facteurs principaux de la composition que sont les granulats, les fines, le liant, ainsi que sur la compacité de l'ensemble.

III.4.1 Influence des granulats

Elle s'exerce sur les propriétés des enrobés par l'intermédiaire de la granularité, de l'angularité et des fines.

- Effet de la granularité :

Le choix de la granularité pour les couches de roulement n'est pas uniquement imposé par le souci d'obtenir une bonne compacité. Un compromis doit être trouvé étant donné la nécessité d'obtenir une texture superficielle présentant une macrorugosité suffisante pour le maintien des caractéristiques antidérapantes du revêtement et pour mieux résister à l'action des pneus à crampons. A cet effet, on tend à augmenter la dimension maximale des granulats ce qui va dans le sens d'une meilleure compacité (à condition que l'épaisseur de la couche le permette) et à une diminution de la teneur en bitume.

L'emploi de formules grenues a également pour effet de s'opposer à l'orniérage comme le montre la figure III.19 :

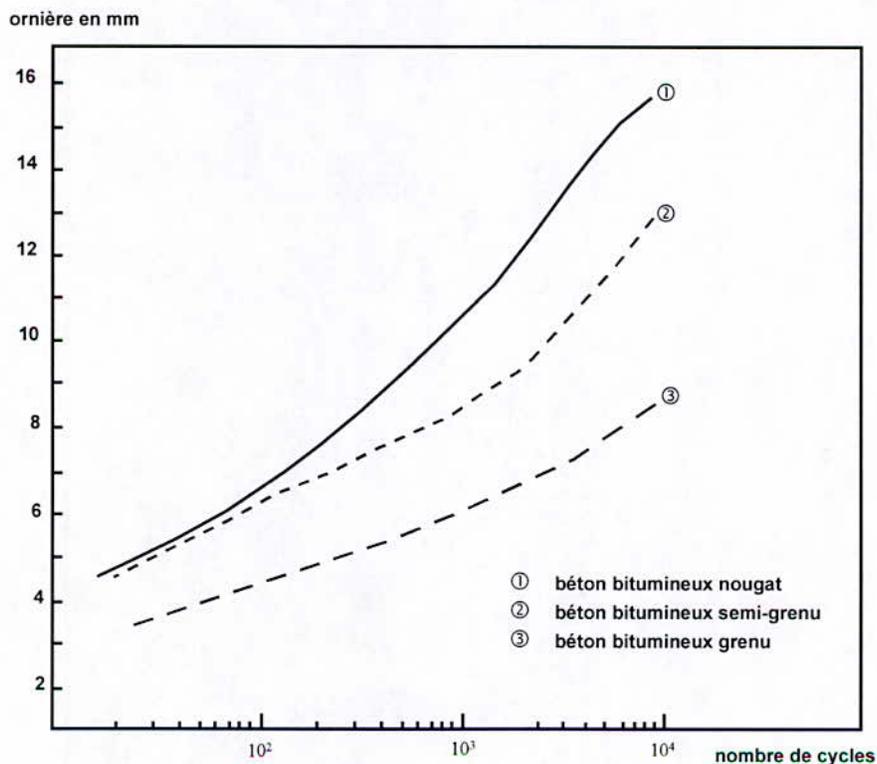


Figure III.19 - Comparaison de comportements à l'orniérage de trois bétons bitumineux différenciés par le granularité

- Effet de l'angularité :

Elle a une influence directe sur la résistance à l'orniérage. La présence de granulats anguleux dans un enrobé hydrocarboné augmente la résistance au cisaillement grâce au frottement interne plus élevé du squelette.

Elle augmente également les qualités antidérapantes du revêtement en présentant des arêtes vives plutôt que des faces roulées, c'est pourquoi dans les couches de roulement il est préférable d'utiliser des granulats entièrement concassés, malgré l'inconvénient de conduire à des enrobés difficiles à compacter.

- Influence des fines :

Le rôle principal des fines est de remplir les vides du squelette granulaire conduisant ainsi à une augmentation de la compacité et, par suite, à une meilleure imperméabilité de l'enrobé. Le cas extrême est celui des bétons bitumineux coulés qui, avec une teneur en fines allant jusqu'à 25%, ont une teneur en vides pratiquement nulle, d'où une compacité avoisinant les 100%.

Les fines agissent également par leur dosage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé et notamment sur la rigidité, puisque c'est surtout la quantité de fines qui détermine l'épaisseur du film de bitume. Les films minces conduisent à des enrobés plus rigides et moins susceptibles à la température.

L'effet de rigidification des forts rapports fines-bitume se traduit sur de nombreuses caractéristiques mécaniques des enrobés et en particulier sur le module complexe et sur la résistance à l'orniérage. En ce qui concerne ce dernier point, il semble cependant que l'utilisation d'un rapport fines-bitume élevé ne suffise pas à conférer au matériau une bonne résistance à l'orniérage si la granularité et l'angularité du squelette n'y contribuent pas également.

III.4.2 Influence du bitume

De tous les facteurs de formulation, le bitume est sans doute celui qui a l'influence la plus nette, car le comportement rhéologique des enrobés hydrocarbonés est le reflet de celui du bitume utilisé. Il intervient par sa dureté et par son dosage dans l'enrobé.

- Effet de la dureté du bitume :

La diminution de pénétrabilité du bitume, c'est-à-dire l'utilisation de bitumes plus durs, se traduit par une augmentation importante du module de l'enrobé pour une même température et un même temps de charge, ce qui est important pour la résistance à la fatigue des couches bitumineuses à faibles déflexions.

Enfin, l'utilisation de bitumes plus durs se traduit par une augmentation de la résistance à l'orniérage. Cette qualité a été mise en évidence par la comparaison des

profondeurs d'ornières obtenues dans un essai de simulation utilisant un orniéreur. La figure III.20 montre que pour un béton bitumineux semi-grenu l'ornière obtenue après 300.000 passages à 45°C est 5 fois plus faible en utilisant un bitume 20/30 qu'avec un bitume 180/220.

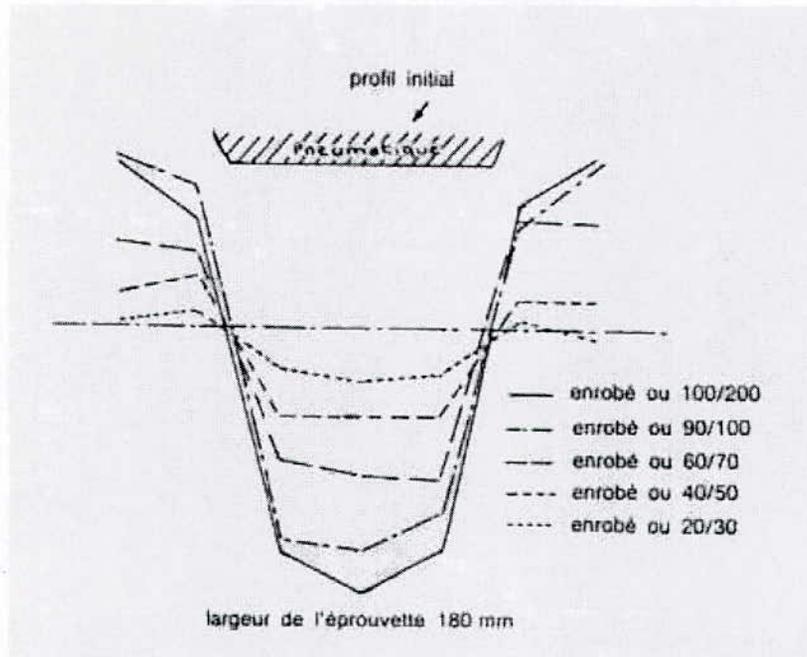


Figure III.20 - Profils d'ornières obtenus à l'essai d'orniéreur, pour des bitumes de différentes pénétrabilités (béton bitumineux semi-grenu à 6,5% de bitume - température 45°C - 300.000 passages). Echelle verticale = 10 fois échelle horizontale

- Effet de la teneur en bitume :

Une majoration de la teneur en bitume a pour effet immédiat, comme les fines, d'accroître la compacité de l'enrobé par augmentation de l'effet de lubrification des granulats et par le remplissage des vides. De même, à partir d'une basse teneur en bitume les résistances mécaniques à la compression et à la traction croissent avec l'augmentation de la teneur en bitume, mais, au-delà d'un certain pourcentage, on assiste à une chute des résistances mécaniques par déformabilité excessive lorsque la teneur en vides devient très faible. Le dosage optimum est très difficile à obtenir, car il doit tenir compte des granulats et surtout de l'épaisseur de l'enrobé.

III.4.3 Influence de la compacité

A la différence des facteurs étudiés ci-dessus, la compacité des enrobés n'est pas un critère de formulation, mais une caractéristique du mélange qui résulte à la fois des facteurs de formulation et des conditions de mise en œuvre. Le rôle de chacun des facteurs de la formulation sur la compacité a été examiné ; il faut retenir qu'une compacité élevée conditionne un grand nombre de qualités des enrobés hydrocarbonés telles que :

- la résistance à la rupture ;
- le comportement à la fatigue ;
- la durée de vie : selon Saunier elle est multipliée par 3 lorsque la compacité passe de 91 à 95,5% ;
- le module complexe ;
- la tenue à l'eau et aux sels de déverglaçage ;
- la résistance aux pneus à crampons ;
- la résistance au vieillissement par oxydation du bitume.

Chapitre IV

Formulation du béton bitumineux

IV.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX DE FORMULATION

IV.1.1 Introduction

Formuler un enrobé hydrocarboné pour couche de roulement, c'est déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'obtenir un matériau doué de certaines propriétés : imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et à la fatigue).

IV.1.2 Généralités

Les principaux critères à prendre en compte lors du choix d'une formule d'enrobé sont les suivants :

- *le trafic* : pour choisir une formule il faut d'abord tenir compte du trafic et du type de sollicitations (rampes exposées au sud, zone de freinage...).
Pour des chaussées très circulées (autoroutes, routes nationales) on retiendra des formules raides c'est à dire utiliser des bitumes durs et bannir les granulats roulés. Par contre pour des chaussées peu circulées avec des supports déformables, des mélanges plus souples de type « enrobé dense » seront mieux adaptés.
- *le type de structure* : chaussée souple ou semi-rigide.
- *la région* : l'exposition de la route et les conditions climatiques. Par exemple, une chaussée traversant une région boisée sera en permanence mouillée.
Dans des zones soumises à de fortes sollicitations hivernales on retiendra des formules conduisant à des compacités in situ élevées (95% voire plus). Pour des climats chauds, on pensera surtout aux risques possibles de fluage et on retiendra des formules avec bitumes plus durs ne contenant pas de matériaux roulés.
- *l'épaisseur* : c'est certainement le critère n° 1 à prendre en compte pour le choix d'une formule d'enrobé.
En effet, il y a une relation indiscutable entre la compacité d'une couche d'enrobé et son épaisseur. Une même formule utilisée avec des épaisseurs différentes, donne des compacités différentes.
Cette différence de compacité tient au fait qu'un enrobé en couche plus mince se refroidit plus vite et que le compactage devient rapidement inefficace sur des matériaux insuffisamment chauds.
Une formule prévue pour une épaisseur donnée doit être modifiée si l'on modifie l'épaisseur de la couche (par expérience : 1 cm d'épaisseur en plus correspond à un gain de 1 point dans la compacité).
L'épaisseur permet en outre de trouver un solution acceptable au compromis résistance à l'orniérage - résistance aux sollicitations hivernales.
- *les conditions d'exploitation hivernale* : pneus à crampons et sels de déverglaçage.
- *les conditions de site au niveau de la sécurité* : routes de montagne, voies à grande vitesse etc.

IV.1.3 Les constituants

Les matériaux entrant dans la composition des enrobés utilisés en couche de roulement de chaussées se répartissent en 4 grandes catégories :

- les granulats à l'exclusion des fines d'apport ;
- le liant, généralement du bitume ;
- les fines d'apport ;
- les dopes et les activants.

a) Les granulats

Ils sont identifiés par leur nature pétrographique et leur structure et doivent répondre aux exigences de la norme (NFP 18-321 *Granulats routiers*) et aux spécifications complémentaires qui figurent dans les documents en vigueur pour chaque technique considérée (Tableau IV.1) .

Ces exigences concernent la courbe granulométrique et les principales caractéristiques physiques et mécaniques qui sont :

- la forme : donnée par le coefficient d'aplatissement ;
- la propreté : donnée par la mesure de l'équivalent de sable et la valeur au bleu ;
- l'angularité : exprimée par le rapport de concassage ;
- la résistance aux chocs : définie par l'essai Los Angeles ;
- la résistance à l'usure par frottement : définie par l'essai micro Deval humide ;
- la résistance au polissage : mesurée par le coefficient de polissage accéléré (CPA).

La granularité du squelette minéral des enrobés est définie par les dimensions extérieures des éléments qui la composent. On utilise généralement des granularités 0/6, 0/10 ou 0/14.

La granularité peut être :

- *grenue* : ce qui correspond à un mélange riche en gravillons et pauvre en sable ;
- *semi-grenue* : là où le dosage gravillon-sable est particulièrement étudié et correspond au mélange le plus couramment utilisé dans les formules actuelles ;
- *discontinue* : lorsqu'on supprime une des fractions granulaires du mélange, en général le petit gravillon ;
- *continue* : lorsque toutes les fractions granulaires sont présentes. Cette granularité tend à disparaître au profit des courbes discontinues en particulier dans la formulation des enrobés appliqués en couche mince.

Tableau IV.1 - Caractéristiques exigées pour les granulats routiers

Trafic PL/j (V/j dans les 2 sens) à titre indicatif	Caractéristiques	Couche de liaison	Couche de roulement
		Bétons bitumineux	
T ₄ < 25 (< 500 V/j)	A	≤ 30	≤ 30
	IC		≥ 60%
	LA	≤ 30	≤ 25
	MDE	≤ 25	≤ 20
	CPA		≥ 0,45 (1)
	P	≤ 2%	≤ 2%
	ES	≥ 50	≥ 50
T ₃ 25 à 150 (500 à 3 000 V/j)	A	≤ 30	≤ 25
	IC ou RC	IC = 100%	≥ 2
	LA	≤ 25	≤ 20
	MDE	≤ 20	≤ 15
	CPA		≥ 0,50
	P	≤ 2%	≤ 2%
	ES	≥ 50	≥ 50
T ₂ 150 à 300 (3 000 à 6 000 V/j)	A	≤ 25	≤ 20
	RC	≥ 2	≥ 2
	LA	≤ 25	≤ 20
	MDE	≤ 20	≤ 15
	CPA		≥ 0,50
	P	≤ 2%	≤ 2%
	ES	≥ 50	≥ 50
T ₁ 300 à 750 (6000 à 15 000 V/j)	A	≤ 20	≤ 20
	RC	≥ 2	≥ 4
	LA	≤ 25	≤ 20
	MDE	≤ 20	≤ 15
	CPA		≥ 0,50
	P	≤ 2%	≤ 2%
	ES	≥ 50	≥ 50
T ₀ > 750 (> 15 000 V/j)	A	≤ 20	≤ 20
	RC	≥ 4	≥ 4
	LA	≤ 25	≤ 15
	MDE	≤ 20	≤ 15
	CPA		≥ 0,50
	P	≤ 2%	≤ 2%
	ES	≥ 50	≥ 50

(1) on pourra admettre 0,40 comme minimum absolu lorsque la vitesse est limitée à 60 km/h.

PL/j : Poids lourds par jour

V/j : Véhicules légers par jour

A = Aplatissement

IC = Indice de concassage

RC = Rapport de concassage

LA = Los Angeles

MDE = Micro Deval en présence d'eau

CPA = Coefficient de polissage accéléré

P = Propreté superficielle des gravillons

ES = Equivalent de sable sur le 0/5 pour les bétons hydrauliques, sur le 0/2 à 10% de fines pour les autres techniques

b) Le liant hydrocarboné

Le liant utilisé dans les enrobés pour couches de surface est généralement à base de bitume pur d'une catégorie conforme aux normes expérimentales de l'AFNOR (NFT 65-000 et 65-001). Outre le caractère d'imperméabilité de tous les liants actuellement disponibles, pour convenir à l'usage routier le liant hydrocarboné doit présenter certaines propriétés physiques et en particulier :

- résister aux contraintes de traction, de cisaillement et de compressions ;
- éviter la susceptibilité thermique, c'est à dire qu'il ne devienne pas plus rigide par temps froid, ni plus mou par temps chaud ;
- avoir une bonne adhésivité.

C'est une caractéristique très importante du couple liant/granulat. En effet, l'eau peut s'interposer entre le granulats et le film de bitume lorsque la qualité du collage entre ces corps n'est pas suffisante. On caractérise cette tenue à l'eau avec l'essai d'immersion/compression.

Le moyen le plus couramment utilisé pour résoudre ce problème consiste à remplacer la fraction sable de ces matériaux par un sable ayant une bonne adhésivité au bitume (sable à prédominance calcaire), on obtient ainsi des formules mixtes ;

- résister au vieillissement sous l'influence de l'oxygène de l'air en particulier ;

c) Les fines d'apport

Lorsque la teneur en fines (éléments inférieurs à 0,08 mm) apportées par le sable de concassage ou de broyage entrant dans la composition du béton bitumineux s'avère insuffisante, il faut prévoir l'addition de fines d'apport.

Pour caractériser la qualité de ces fines ainsi que celles issues du sable, il convient d'utiliser les essais définis par les règlements en vigueur et de respecter les valeurs minimales imposées.

d) Les dopes

D'une manière générale, les granulats et le liant étant bien choisis dans la formulation, les bétons bitumineux répondront normalement aux exigences en ce qui concerne, en particulier, le rapport immersion - compression.

Cependant, face à l'action d'agents extérieurs tels que la présence d'eau ou de sels de déverglaçage, il est indispensable de se prémunir contre les dégradations qui peuvent être provoquées au sein du revêtement. C'est le rôle des dopes d'adhésivité qui sont des produits complexes destinés à renforcer la résistance des bétons bitumineux.

IV.2 METHODOLOGIE D'UNE ETUDE DE FORMULATION

Une étude de formulation d'un enrobé bitumineux pour couche de roulement comporte trois étapes principales de mise au point :

- la composition granulométrique ;
- la teneur en liant ;
- les caractéristiques de l'enrobé.

IV.2.1 La composition granulométrique

Le squelette minéral d'un béton bitumineux est obtenu par composition de sable, de gravillons et éventuellement de fines d'apport.

La composition granulométrique est définie pour chaque catégorie (type) de béton bitumineux par les pourcentages de passants aux différents tamis, ce pourcentage est délimité par des fuseaux de spécification qui doivent contenir la courbe granulométrique du squelette minéral en tout point (diamètre).

Pour deux types de béton bitumineux semi-grenu : le BB 0/10 et le BB 0/14, les fuseaux de spécification sont reportés sur le tableau IV.2

Tamisât à (mm)	BB 0/10 (%)	BB 0/14 (%)
14	-	94 à 100
10	94 à 100	72 à 84
6,3	65 à 75	50 à 66
4	45 à 60	40 à 54
2	30 à 45	28 à 40
0,08 roulement	7 à 10	7 à 10
0,08 liaison	6 à 9	6 à 9

Tableau IV.2 - Fuseaux de spécification pour BB 0/10 et BB 0/14 semi-grenus

Les compositions présentées correspondent à des courbes granulométriques continues, mais la possibilité d'introduction d'une discontinuité n'est pas exclue (exemple des enrobés drainants).

La méthode qui est couramment pratiquée pour la recherche d'une courbe granulométrique d'enrobé consiste en partant des données granulométriques des matériaux à faire passer la courbe du mélange par quelques points obligés, c'est à dire viser certaines valeurs de tamisât à deux ou trois tamis bien choisis, ou en général à ajuster cette courbe dans un fuseau de spécification. Ensuite, on effectue quelques modifications sur la totalité des fines, en jouant sur les fines d'apport ou sur le sable, modifications qui peuvent résulter d'une série préliminaire d'essais mécaniques sur l'enrobé.

Nota : La formule réelle retenue peut être différente de la formule théorique du fait de son optimisation.

Les nouveaux moyens de calcul (ordinateurs) permettent en quelques minutes, avec des méthodes numériques inspirées de l'expérience, d'obtenir une courbe granulométrique immédiatement fiable.

Dans un fuseau donné il peut rentrer une infinité de courbes pour lesquelles les propriétés de l'enrobé sont parfois très différentes. Pour faire notre choix, on fixe une *courbe modèle*, correspondant en théorie à un optimum des propriétés du mélange. C'est vers cet courbe modèle que le calculateur tentera d'amener au plus près, par approximation, une courbe initiale quelconque.

Les courbes modèles retenues pour la formulation d'un enrobé sont exposées dans le tableau IV.3

Tableau IV.3 - Courbes modèles retenues

Courbe modèle	Forme mathématique
1. Courbe 5/8	$y = 100 (x / D)^{5/8}$
2. Füller	$y = 100 (x / D)^{0,5}$
3. Nijboër	$y = 100 (x / D)^{0,45}$
4. Talbot	$y = 100 (x / D)^n$
5. Furnas	$y = 100 (b^n - 1) / (b^T - 1)$
6. Bolomey	$y = a + (100 - a) (x / D)^{0,5}$
7. Médiane fuseau	$y = \text{PCP moyen}$

D est le diamètre du plus gros granulat

x est le diamètre du granulat choisi entre 0 et D (abscisse)

y est le pourcentage de tamisât x

Les constantes a, b, n et T des courbes 5 - 6 - 7 sont détaillées dans des publications spécialisées.

IV.2.2 La teneur en liant

La teneur en liant d'un béton bitumineux est définie par une étude en laboratoire et est calculée à partir du module de richesse (k), de la surface spécifique conventionnelle (Σ), et d'un coefficient correcteur de la masse volumique réelle des granulats MVr à l'aide de la formule suivante :

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

- Σ est la surface spécifique conventionnelle en m^2/kg , tel que :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$$

dans laquelle on a les pourcentages pondéraux des éléments :

- G, éléments supérieurs à 6,3 mm ;
 - S, éléments compris entre 6,3 et 0,315 mm ;
 - s, éléments compris entre 0,315 et 0,08 mm ;
 - f, éléments inférieurs à 0,08 mm ;
- α est un coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats si elle diffère de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Dans ce cas on a :

$$\alpha = \frac{2,65}{MV_r}$$

- k est le module de richesse, il représente l'épaisseur relative du film de liant déposé sur la surface des granulats. La valeur du module de richesse à prendre en compte est fonction du type d'enrobé retenu, et doit être supérieure ou égale à une valeur minimale (3,3 pour le BB 0/14).

Nota : On peut déterminer la teneur en liant optimale expérimentalement par des tâtonnements (ex : plusieurs essais Marshall), on en déduit indirectement le module de richesse qui doit vérifier les valeurs minimales exigées.

IV.2.3 Les caractéristiques de l'enrobé

Lorsque les constituants sont totalement nouveaux, il est nécessaire d'effectuer une étude à caractère général qui fait appel aux essais suivants :

- *essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire* sur un grand nombre de variantes ;
- *essai de compression simple* à 0° , 18° et 50°C sur les formules retenues à l'essai de compactage ;
- *essai à l'orniéristeur* à 60°C sur ces mêmes formules.

Remarque : Ces deux derniers essais doivent conduire à la sélection d'une formulation qui sera complétée par un essai de traction qui permet d'apprécier son comportement à la déformabilité et à la fatigue.

Les enrobés réalisés avec les matériaux qui ont été sélectionnés dans les compositions retenues doivent présenter au minimum les performances figurant dans les documents de référence en vigueur.

Dans le cas où il s'agit d'adapter ou de vérifier une formule d'enrobé déjà étudiée, l'étude de laboratoire sera simplifiée.

Tableau IV.4 - Essais de laboratoire à réaliser sur les béton bitumineux semi - grenus (BBSG) pour aboutir à leur formulation

Vérification d'une formule déjà étudiée et appliquée	Adaptation d'une formule dans le cas où il y a changement d'un ou plusieurs constituants	Formule nouvelle
Essai PCG (NF P 98-252) ↓ Essai Duriez à 18°C (NF P 98-251-1)	Essai PCG sur plusieurs variantes ↓ Une formule sélectionnée ↓ Essai Duriez à 18°C ↓ Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) ⁽¹⁾	Essai PCG sur plusieurs variantes ↓ Plusieurs formules sélectionnées ↓ Essai Duriez à 18°C ↓ Essai d'orniérage ⁽¹⁾ ↓ Une formule sélectionnée ↓ Essai de caractérisation des performances mécaniques du BBSG ⁽²⁾

(1) Essai à réaliser dans le cas de trafic important et/ou de sollicitations particulières, par exemple :

- trafic lent canalisé ;
- forte épaisseur ;
- utilisation de sable roulé, etc.

(2) Essai à réaliser dans le cas d'utilisation des caractéristiques mécaniques du BBSG pour le dimensionnement des chaussées. Les essais utilisés seront :

- soit essai de détermination du module et de la perte de linéarité (NF P 98-260-1) ;
- soit essai de module complexe (NF P 98-260-2) ;
- soit essai de fatigue (NF P 98-261-1).

Tableau IV.5 - Performances mécaniques à atteindre pour les bétons bitumineux semi - grenus

Essai Duriez à 18°C (NF P 98-251-1) Résistance à la compression à sec R en MPa - avec un bitume 180/200 - avec un bitume 80/100 - avec un bitume 60/70 - avec un bitume 40/50 Rapport : <u>r après immersion</u> R à sec	≥ 4 ≥ 5 ≥ 6 ≥ 7 $\geq 0,75$								
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'ornière en pourcentage de l'épaisseur de la dalle, pour une dalle de 10cm d'épaisseur à 30 000 cycles et à 60°C avec le bitume prévisible du chantier, estimée au pourcentage de vides PCG (NF P 98-252) - à 60 girations (pour le BBSG 0/10) - à 80 girations (pour le BBSG 0/14)	≤ 10 ≤ 10								
Essais de caractérisation des performances mécaniques									
Essai de détermination du module et de la perte de linéarité (NF P 98-260-1) - avec un bitume 40/50 - avec un bitume 60/70 - avec un bitume 80/100	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%;">Module (en MPa) à 10°C et 0,02 s</th> <th style="width: 50%;">Perte de linéarité à 0°C et 30s (1-γ)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 8\ 000$</td> <td style="text-align: center;">$\leq 0,37$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 6\ 000$</td> <td style="text-align: center;">$\leq 0,30$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$\geq 4\ 000$</td> <td style="text-align: center;">$\leq 0,25$</td> </tr> </tbody> </table>	Module (en MPa) à 10°C et 0,02 s	Perte de linéarité à 0°C et 30s (1- γ)	$\geq 8\ 000$	$\leq 0,37$	$\geq 6\ 000$	$\leq 0,30$	$\geq 4\ 000$	$\leq 0,25$
Module (en MPa) à 10°C et 0,02 s	Perte de linéarité à 0°C et 30s (1- γ)								
$\geq 8\ 000$	$\leq 0,37$								
$\geq 6\ 000$	$\leq 0,30$								
$\geq 4\ 000$	$\leq 0,25$								
Essai de module complexe (NF P 98-260-2) Module en MPa du BBSG à la compacité estimée du chantier à 15°C et 10Hz	$\geq 5\ 400$								
Essai de fatigue (NF P 98-261-1) Déformation relative ϵ_6 à la compacité estimée du chantier à 10^6 cycles pour une température de 10°C et une fréquence de 25Hz	$\geq 100\ 10^{-6}$								

Tableau IV.6 - pourcentages de vides à respecter

Essais	BBSG 0/10		BBSG 0/14	
	min	max	min	max
Essai Duriez (NF P 98-251-1)				
- Couches de roulement	5	9	5	8
- Couches de liaison	6	10	6	10
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (NF P 98-252)				
- à 10 girations	11	-	11	-
- à 60 girations	4	9	-	-
- à 80 girations	-	-	4	8

Chapitre V

Identification des constituants

V.1 SQUELETTE MINERAL

V.1.1 Identification de la nature des granulats (NF P 18-557)

Les granulats issus des roches massives sont généralement constitués par des mélanges de plusieurs roches de nature différente (faciès), qu'il convient de déterminer sur le plan pétrographique.

Il est possible par simple observation des granulats à la loupe de distinguer les différents faciès et d'en déterminer les proportions relatives par comptage.

L'identification plus précise de chacun de ses différents composants doit se faire :

- soit directement en faisant des lames minces sur les gravillons ;
- soit en faisant des prélèvements correspondants à chaque faciès sur le front de taille.

L'identification d'une roche est basée principalement sur :

- sa composition minéralogique ;
- son état d'altération ;
- sa structure ;
- sa masse volumique réelle et sa porosité ;
- son indice de continuité.

Dans notre étude on a utilisé deux types de granulats :

1. Des Roches Sédimentaires Carbonatées (Calcaires) : provenant de la carrière de KEDDARA ;
2. Des GABBROS (Basalte) : provenant de la carrière de CAP DJINET.

V.1.2 Analyse granulométrique (NF P 18-560)

La quasi totalité de notre étude a été effectuée avec les granulats provenant de KEDDARA compte tenu de la bonne adhésivité de la roche d'origine calcaire avec le bitume.

On a reproduit la même étude à son stade final avec des granulats provenant de CAP DJINET afin de voir les améliorations apportées aux performances de l'enrobé, dans le cas de l'utilisation d'une roche acide (basalte) réputée pour sa médiocre adhésivité avec le bitume.

Pour la première étude (granulats KEDDARA) on a utilisé trois (3) échantillons qu'on désignera par les symboles A1, A2 et A3. On désignera l'échantillon de granulats de CAP DJINET par le symbole B.

A) Analyse granulométrique des échantillons A1, A2, A3

Les échantillons provenant de KEDDARA comportent trois fractions granulaires : 0/3 (sable), 3/8 et 8/15.

1) Analyse granulométrique de l'échantillon A1

TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS		
	0/3	3/8	8/15
16	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	99,04
10	100,00	99,01	61,29
8	100,00	97,07	22,09
6,3	100,00	81,43	7,98
5	99,50	59,93	5,00
3,15	98,30	16,41	1,53
2	74,11	3,55	0,81
1	59,11	0,00	0,00
0,5	40,04	0,00	0,00
0,315	32,04	0,00	0,00
0,2	26,94	0,00	0,00
0,1	18,56	0,00	0,00
0,08	16,86	0,00	0,00

2) Analyse granulométrique de l'échantillon A2

TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS		
	0/3	3/8	8/15
16	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	97,74
10	100,00	99,37	70,49
8	100,00	98,61	41,11
6,3	99,71	94,36	23,01
5	99,11	79,46	15,18
3,15	97,24	34,79	6,63
2	92,73	16,18	4,12
1	69,54	8,53	2,56
0,5	46,93	5,58	0,00
0,315	38,32	4,58	0,00
0,2	31,96	3,92	0,00
0,1	22,81	2,67	0,00
0,08	21,85	0,00	0,00

3) Analyse granulométrique de l'échantillon A3

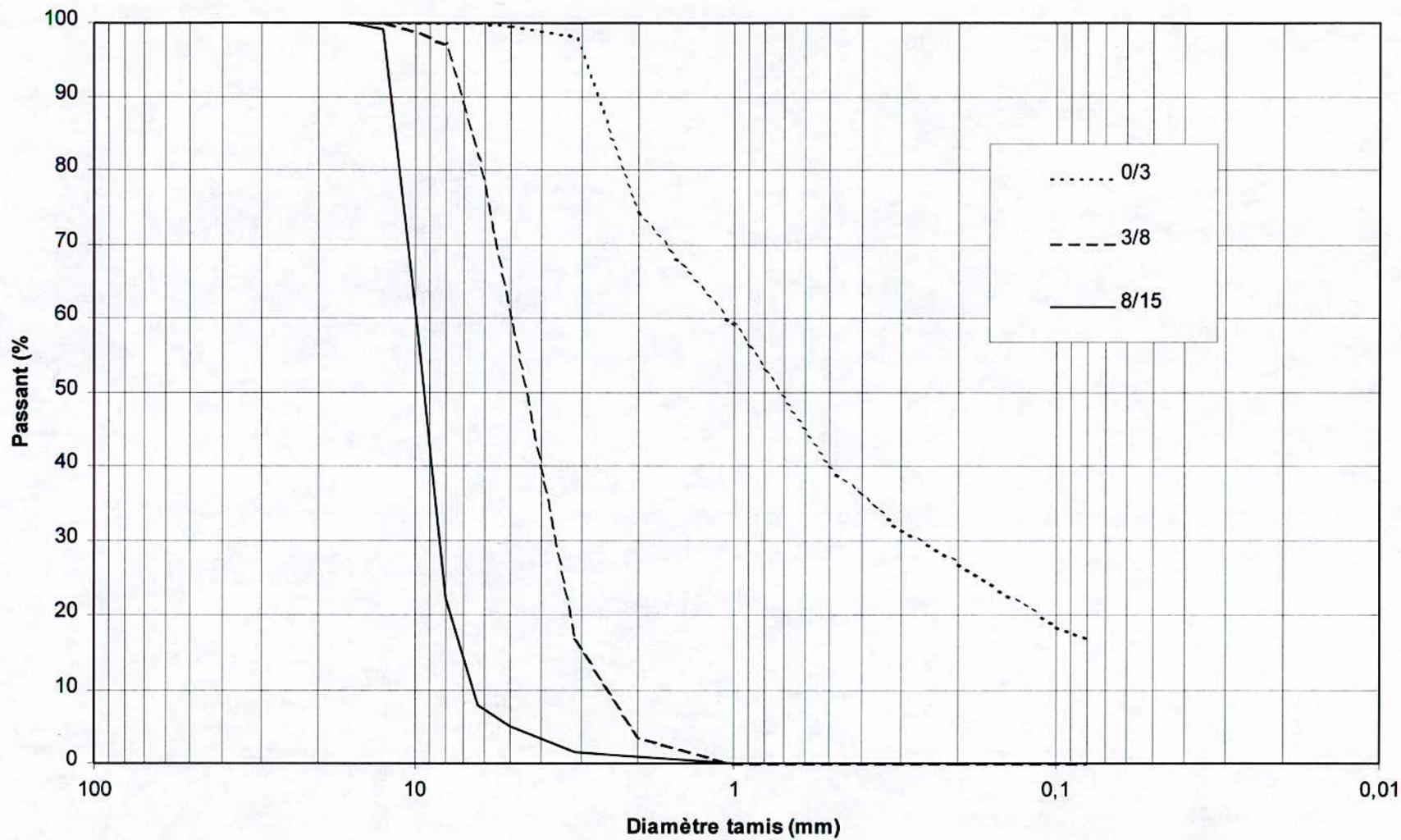
TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS		
	0/3	3/8	8/15
16	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	97,89
10	100,00	99,37	73,08
8	100,00	98,61	38,21
6,3	99,71	94,36	12,45
5	99,11	79,46	4,32
3,15	97,24	34,79	0,66
2	92,73	16,18	0,00
1	69,54	8,53	0,00
0,5	46,93	5,58	0,00
0,315	38,32	4,58	0,00
0,2	31,96	3,92	0,00
0,1	22,81	2,67	0,00
0,08	21,85	0,00	0,00

B) Analyse granulométrique de l'échantillon B

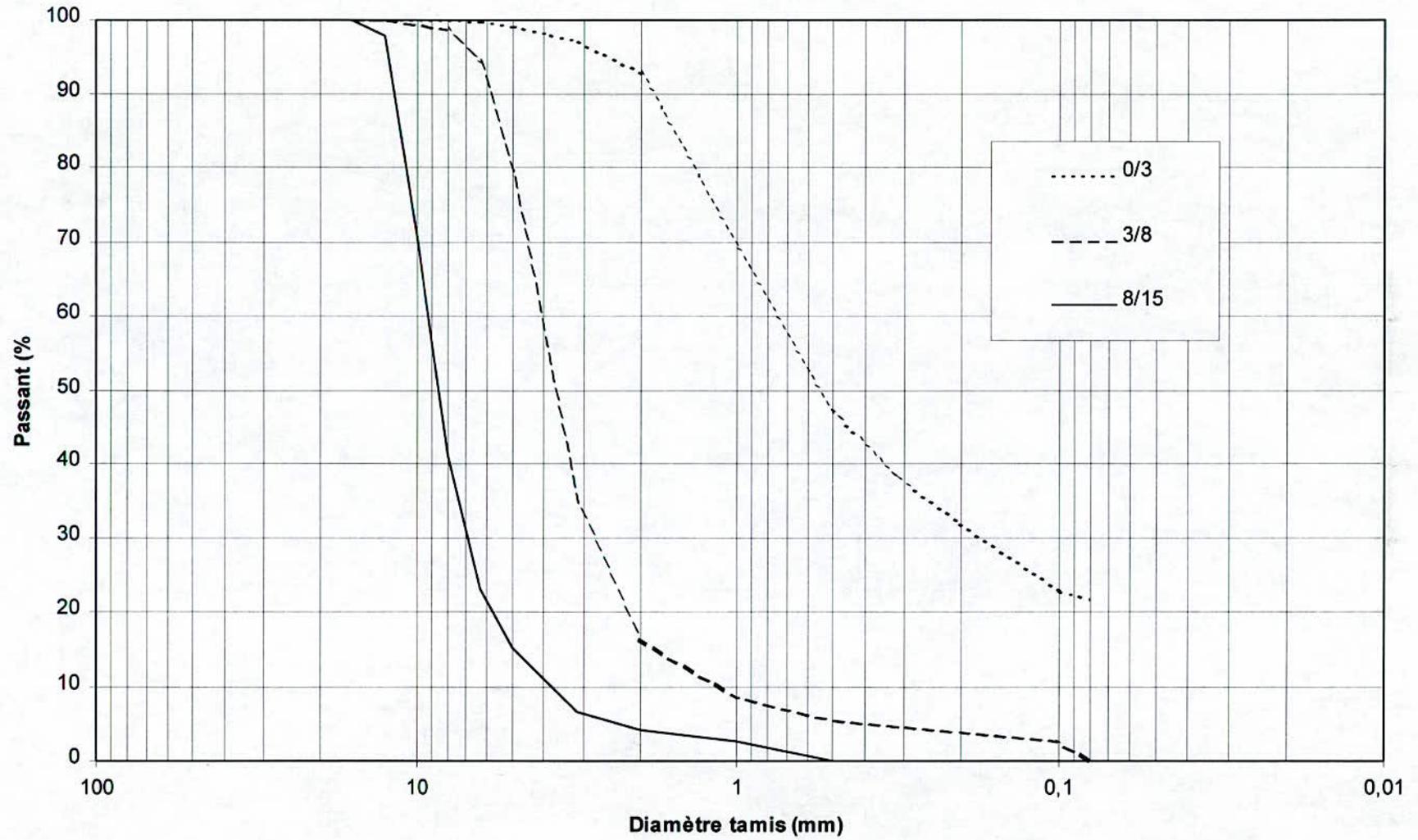
L'échantillon de granulats provenant de CAP DJINET comporte 3 fractions granulaires : 0/2 (sable), 2/6 et 6/12.

TAMIS	PASSANT EN % DES FRACTIONS		
	0/2	2/6	6/12
16	100,00	100,00	100,00
12,5	100,00	100,00	90,20
10	100,00	100,00	53,70
8	100,00	98,60	19,20
6,3	100,00	86,20	3,60
5	100,00	50,20	1,40
3,15	99,80	5,00	0,00
2	86,50	1,10	0,00
1	51,30	0,00	0,00
0,5	29,90	0,00	0,00
0,315	25,40	0,00	0,00
0,2	22,60	0,00	0,00
0,1	20,60	0,00	0,00
0,08	16,80	0,00	0,00

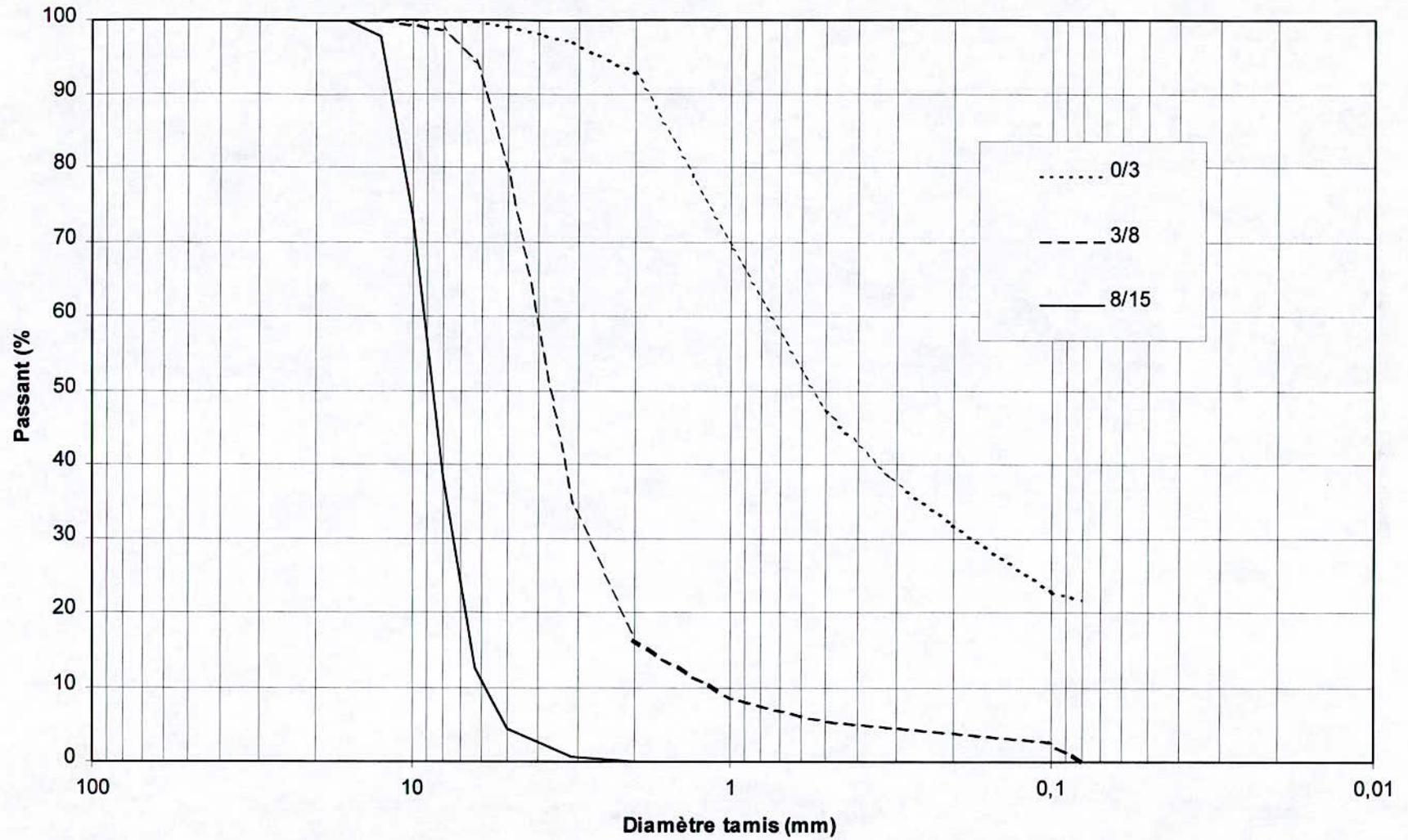
Courbe Granulométrique de l'échantillon A1



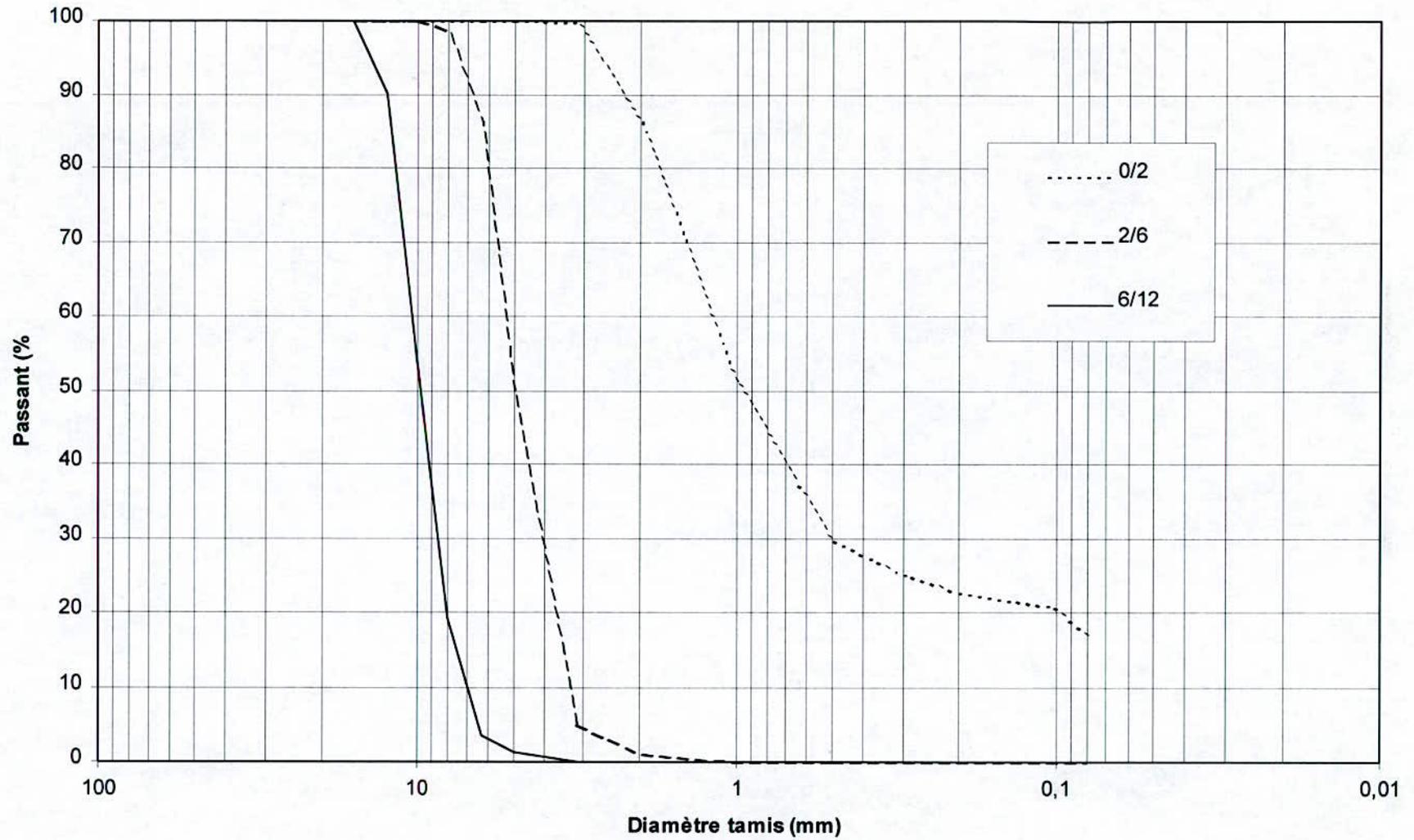
Courbe Granulométrique de l'échantillon A2



Courbe Granulométrique de l'échantillon A3



Courbe Granulométrique de l'échantillon B



V.1.3 Poids spécifiques (NF P 18-554)**A) Granulats KEDDARA**

Fractions	Poids spécifique, en t/m ³
0/3	2,78
3/8	2,755
8/15	2,75

B) Granulats CAP DJINET

Fractions	Poids spécifique, en t/m ³
0/2	2,61
2/6	2,71
6/12	2,63

V.1.4 Essai Los Angeles (LA) (NF P 18-573)**A) Granulats KEDDARA**

Fractions	Classe référentielle	Los Angeles, en%
3/8	6,3 - 4	23,7
8/15	16 - 10	22,5

B) Granulats CAP DJINET

Fractions	Classe référentielle	Los Angeles, en%
2/6	6,3 - 4	18,4
6/12	10 - 6,3	17,3

V.1.5 Essai Micro - Deval Humide (MDE) (NF P 18-572)**A) Granulats KEDDARA**

Fractions	Classe référentielle	Micro-Deval Humide, en%
3/8	6,3 - 4	15,2
8/15	16 - 10	13,6

B) Granulats CAP DJINET

Fractions	Classe référentielle	Micro-Deval Humide, en%
2/6	6,3 - 4	14,9
6/12	10 - 6,3	14,0

V.1.6 Equivalent de sable à 10% de fines (ES10%) (NF P 18-597)

A) Granulats KEDDARA : 59%

B) Granulats CAP DJINET : 62%

V.1.7 Valeur au bleu de méthylène (NF P 18-592)

A) Granulats KEDDARA : 0,15

B) Granulats CAP DJINET : 0,10

Ces valeurs confirment les résultats obtenus lors de l'essai d'équivalent de sable en V.1.6



Figure V.1 - Série de tamis servant à l'analyse granulométrique

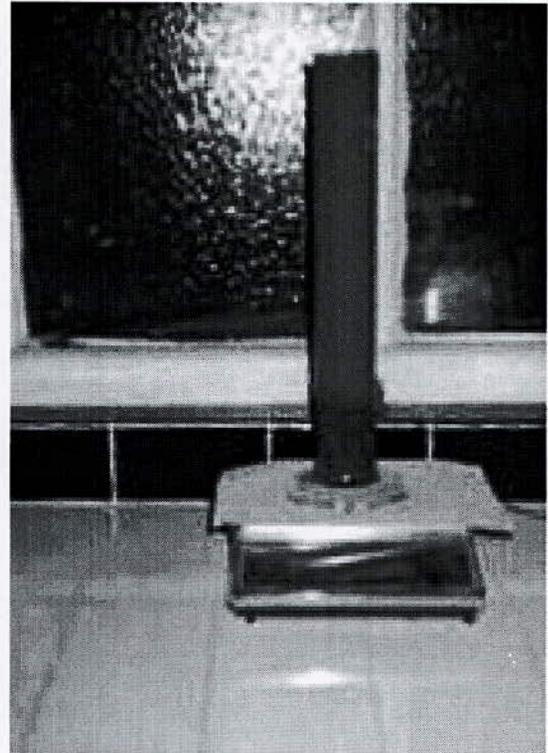


Figure V.2 - Mesure du poids spécifique à l'aide du picnomètre

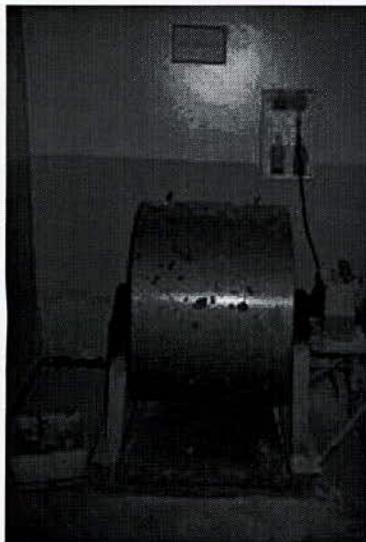


Figure V.3 - Machine Los Angeles

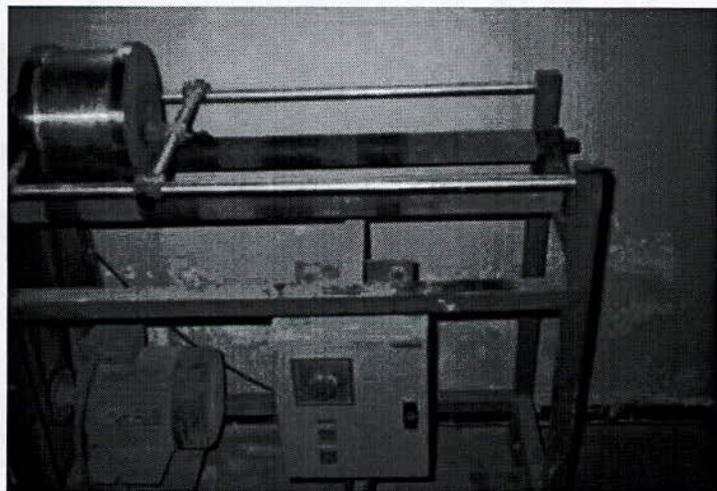


Figure V.4 - Machine Micro-Deval humide

V.2 BITUME

Dans la présente étude on utilise un bitume de classe 40/50.

V.2.1 Pénétration (NF T 66-004)

N° Essai	1	2	3	4	5	6
Pénétration (1/10 mm)	41	41	40	42	42	40
Moyenne	41					

Calcul de la tolérance :

$$\text{Tolérance} = \frac{41}{100} + 1 = 1,41 \approx 2$$

L'écart maximal entre les mesures et la moyenne reste inférieur à la tolérance calculée.

La pénétration est de 41 (1/10 de mm). Elle est comprise dans l'intervalle 40 à 50, donc le bitume appartient bien à la classe 40/50.

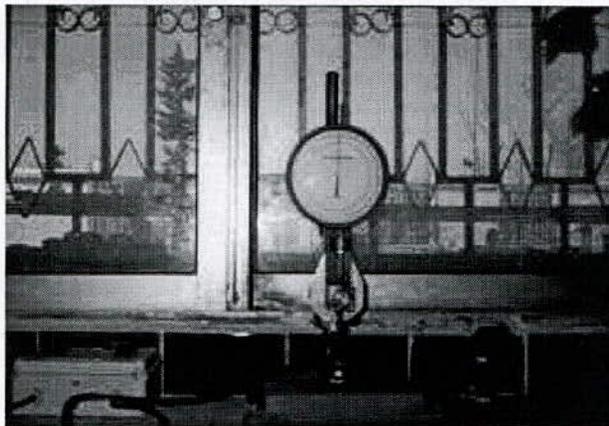


Figure V.5 - Pénétromètre

V.2.2 Ramollissement par la méthode Bille-Anneau (NF T 66-008)

N° Essai	1	2
TBA (°C)	58	59
Moyenne	58,5	

La température de ramollissement Bille-Anneau (TBA = 58,5°C), appartient à l'intervalle spécifique des bitume 40/50 : 47 à 60°C.

**V.2.3 Point d'éclair et point de flamme par l'appareil de CLEVELAND
(ASTM D 92-72)**

Point d'éclair = 286°C

Point de flamme = 328°C

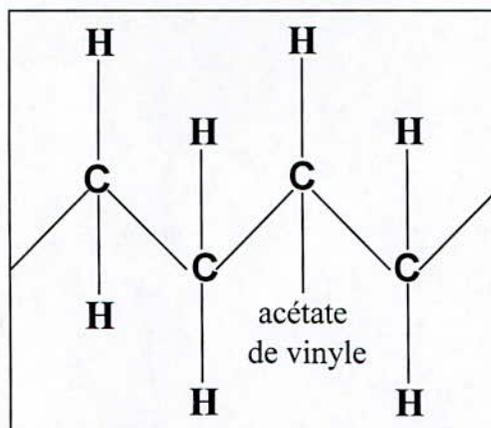


Figure V.6 - Appareil de CLEVELAND

V.3 AJOUT : POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

La poudrette de caoutchouc utilisée comme ajout dans le squelette solide du béton bitumineux est un *copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle* : EVA.

Cet élastomère répond à la formule générale ci-après :



Dans cette structure, le squelette hydrocarboné assure la rigidité et la cohésion qui sont fonction de la longueur des chaînes et de la cristallinité. Les comonomères polaires (acétate de vinyle) permettent de contrôler la compatibilité, la cristallinité et les caractéristiques d'adhésion.

L'EVA est un thermoplastique solide et élastique à la température ambiante, néanmoins il présente une faible viscosité aux températures d'enrobage et de mise en œuvre des bétons bitumineux.

Il est compatible avec les bitumes et les granulats (Conduit à des mélanges homogènes, présentant de bonnes propriétés adhésives et chimiquement stable aux températures habituelles). Il n'est pas toxique et peut être facilement recyclé.

La poudrette EVA utilisée comme ajout provient du broyage des chutes de tapis de voitures, de semelles de chaussures et autres. Elle présente une granularité assez fine (0,1 à 1mm). Sa température de fusion est de 200 à 220°C. A température ambiante, sa densité est de 0,8.

Chapitre VI

Formulation du béton bitumineux ordinaire

VI.1 METHODE PROPOSEE

La méthode utilisée pour la formulation du béton bitumineux est la méthode de la courbe modèle : On a choisi la courbe Talbot avec $n=0,50$ (voir §IV.2).

Pour chaque échantillon et partant de ses données granulométriques, on fait varier les pourcentages pondéraux des différentes fractions pour donner un mélange qui s'approche le plus de la courbe modèle choisie.

Pour aboutir aux pourcentages optimaux en respectant la teneur en fines minimale (7 à 10%), on fixe dans un premier temps le pourcentage de la fraction de sable de manière à obtenir le minimum de fines exigé.

Ensuite, on fait varier les deux pourcentages restants pour obtenir l'écart minimal (entre le mélange et la courbe modèle). On estime qu'on a atteint cet écart minimal lorsque le coefficient de corrélation des deux séries de données (Mélange - Courbe modèle) est maximal.

VI.2 FORMULATION

VI.2.1 Composition granulométrique

1) Echantillon A1

Formule retenue :

Coefficient de corrélation = 99,51%

%0/3 = 42

%3/8 = 18

%8/15 = 40

Tamis (mm)	Courbe modèle	Mélange A1
16	100,00	100,00
12,5	94,49	99,62
10	84,52	84,34
8	75,59	68,31
6,3	67,08	59,85
5	59,76	54,58
3,15	47,43	44,85
2	37,80	32,09
1	26,73	24,83
0,5	18,90	16,82
0,315	15,00	13,46
0,2	11,95	11,31
0,1	8,45	7,80
0,08	7,56	7,08

2) Echantillon A2

Remarque importante : Pour les formulations suivantes, relatives aux échantillons provenant de KEDDARA, on prendra comme courbe modèle le mélange A1 afin que pour toute l'étude on ait le même squelette solide.

Formule retenue : Coefficient de corrélation = 99,90%

%0/3 = 33

%3/8 = 17

%8/15 = 50

Tamis (mm)	Mélange A1	Mélange A2
16	100,00	100,00
12,5	99,62	98,87
10	84,34	85,14
8	68,31	70,32
6,3	59,85	60,45
5	54,58	53,80
3,15	44,85	41,32
2	32,09	35,41
1	24,83	25,68
0,5	16,82	16,44
0,315	13,46	13,42
0,2	11,31	11,21
0,1	7,80	7,98
0,08	7,08	7,21

3) Echantillon A3

Formule retenue :

Coefficient de corrélation = 99,82%

%0/3 = 36

%3/8 = 20

%8/15 = 44

Tamis (mm)	Mélange A1	Mélange A3
16	100,00	100,00
12,5	99,62	99,07
10	84,34	88,03
8	68,31	72,53
6,3	59,85	60,25
5	54,58	53,47
3,15	44,85	42,25
2	32,09	36,62
1	24,83	26,74
0,5	16,82	18,01
0,315	13,46	14,71
0,2	11,31	12,29
0,1	7,80	8,75
0,08	7,08	7,87

4) Echantillon B

Formule retenue :

Coefficient de corrélation = 99,84%

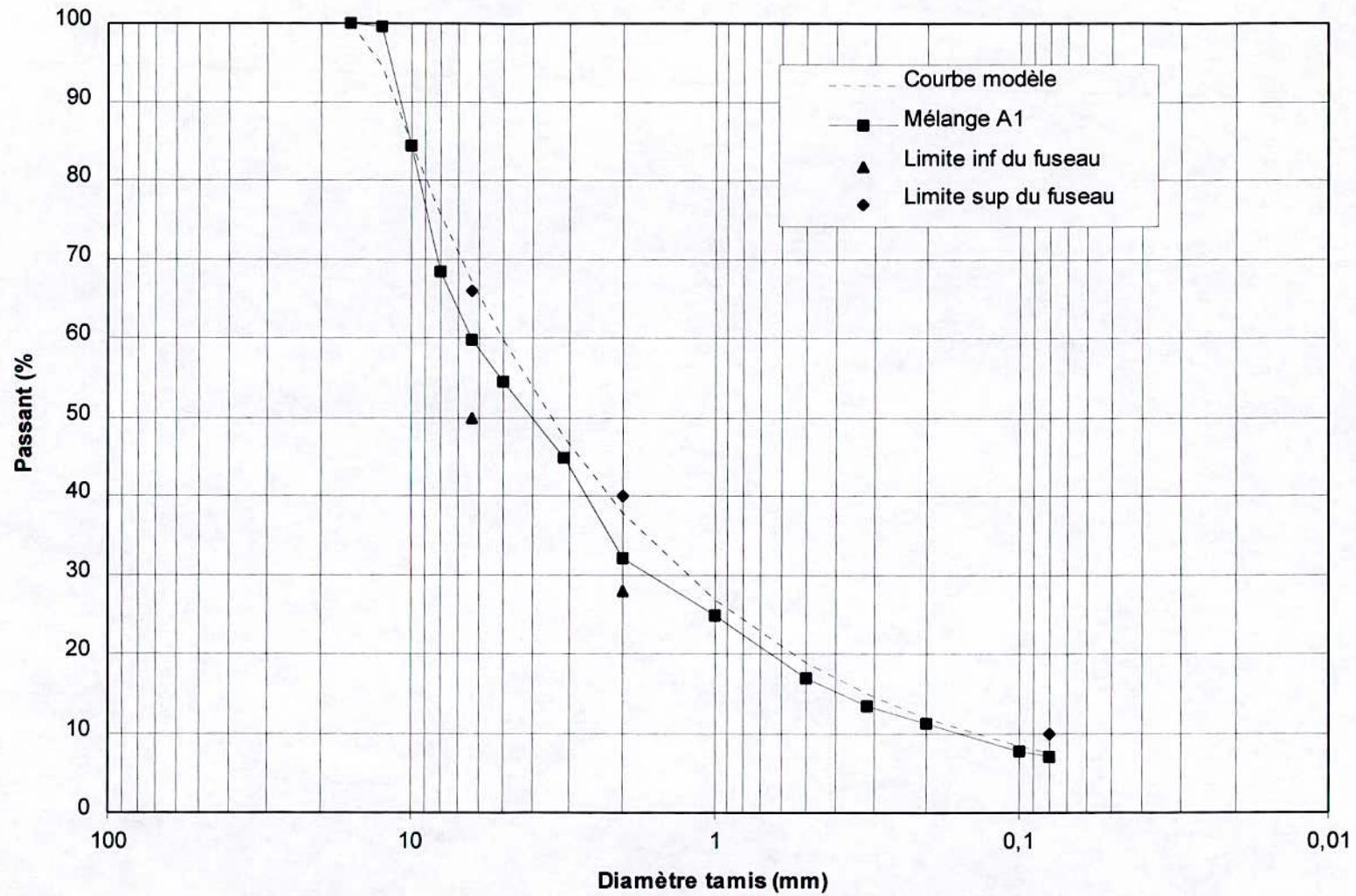
%0/2 = 46

%2/6 = 25

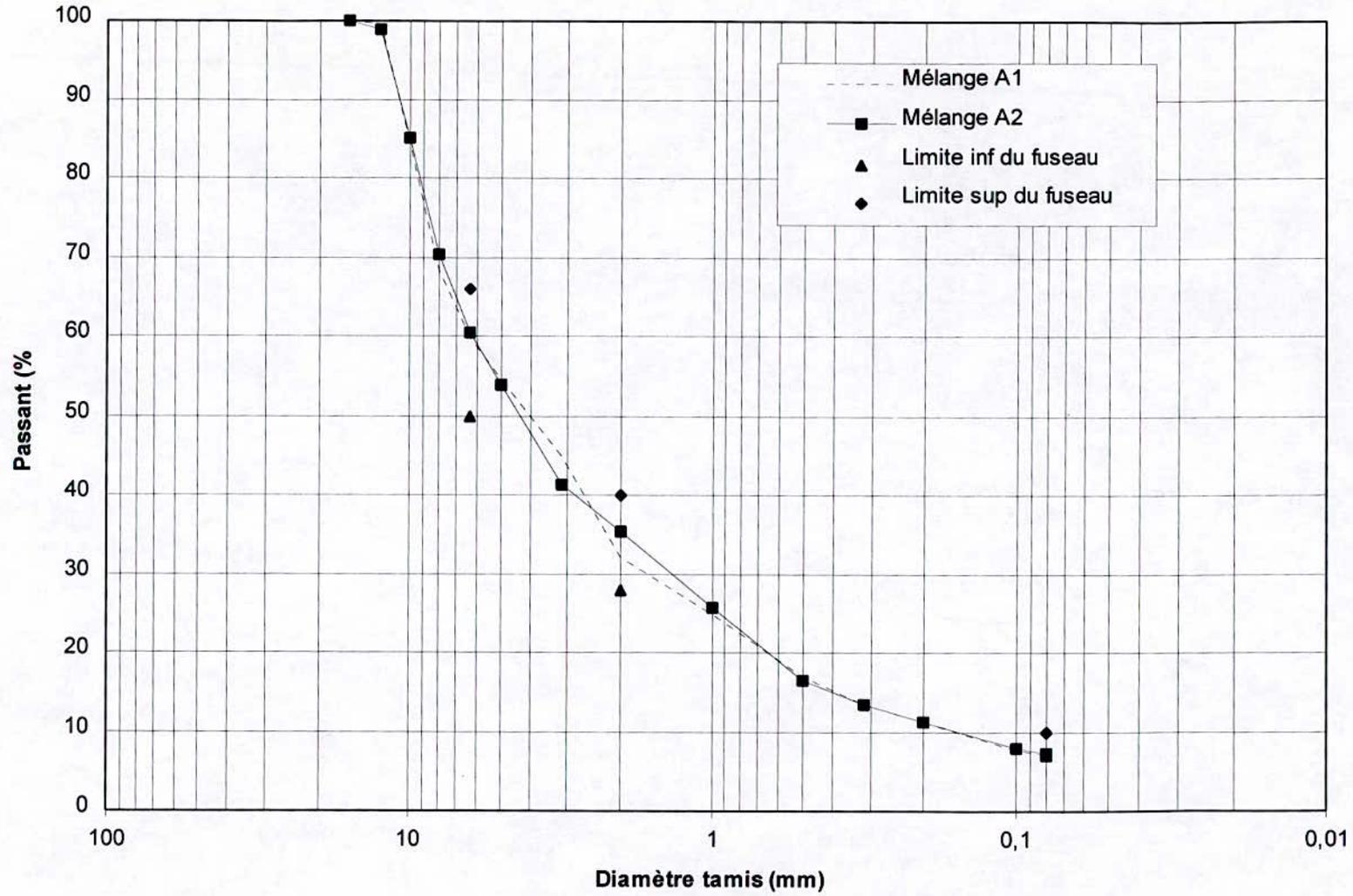
%6/12 = 29

Tamis (mm)	Courbe modèle	Mélange B
16	100,00	100,00
12,5	94,49	97,06
10	84,52	86,11
8	75,59	75,41
6,3	67,08	67,63
5	59,76	57,97
3,15	47,43	46,16
2	37,80	39,20
1	26,73	23,09
0,5	18,90	13,46
0,315	15,00	11,43
0,2	11,95	10,17
0,1	8,45	9,27
0,08	7,56	7,56

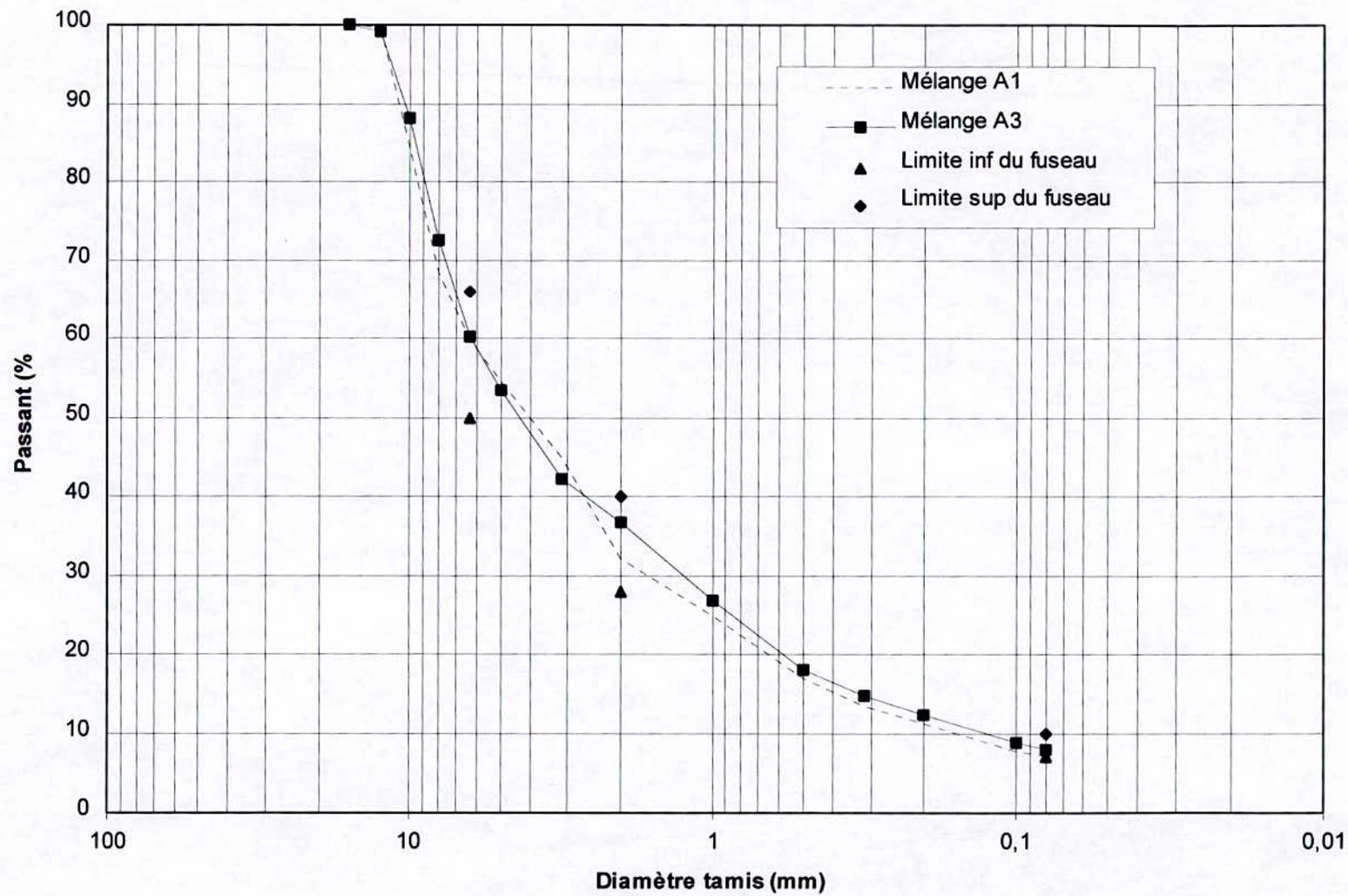
Courbe granulométrique du mélange A1



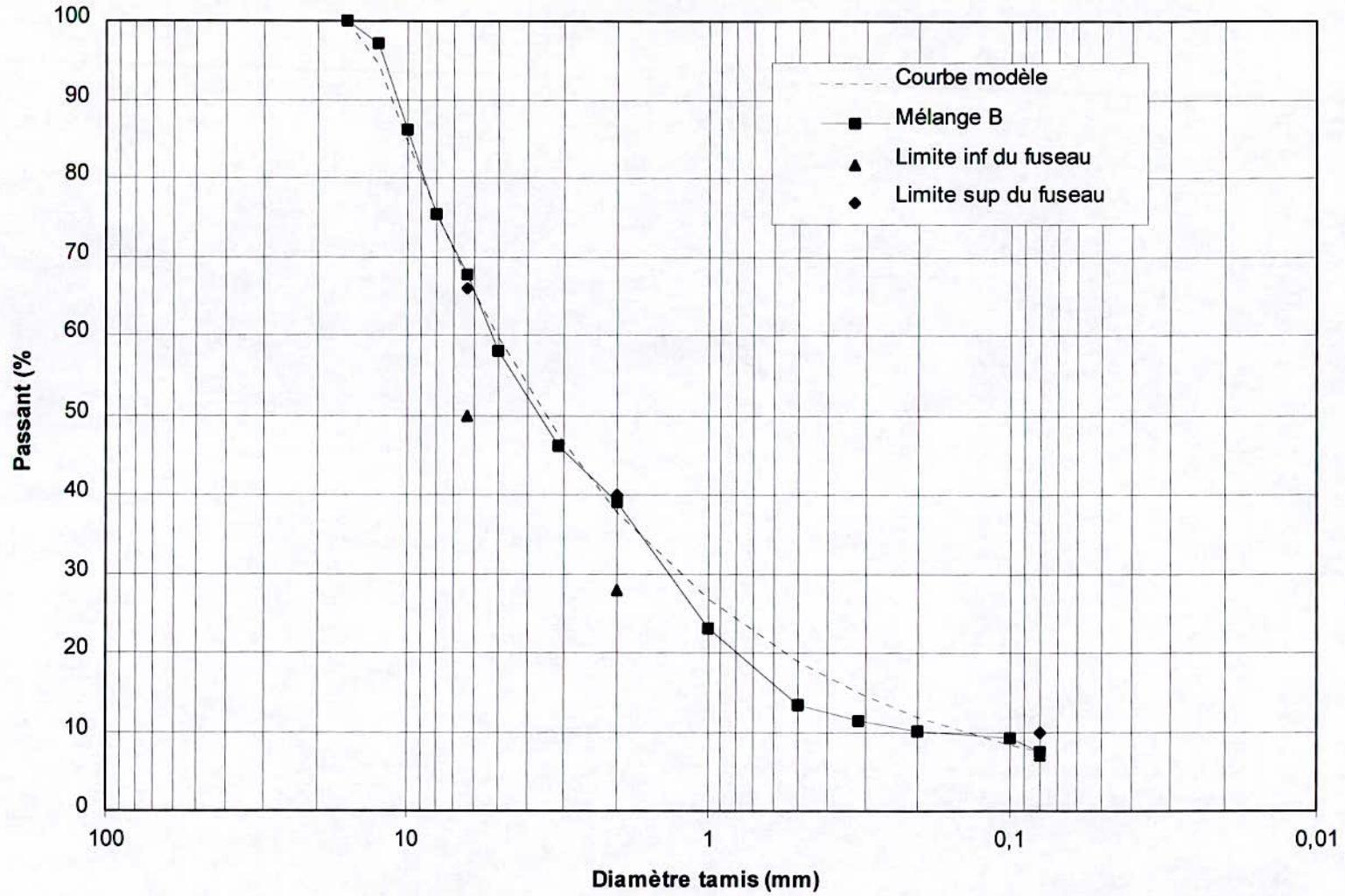
Courbe granulométrique du mélange A2



Courbe granulométrique du mélange A3



Courbe granulométrique du mélange B



VI.2.2 Teneur en liant

Pour déterminer la teneur optimale en liant, on va effectuer pour différentes teneurs en bitume, des essais Marshall avec le mélange A1 afin de voir l'évolution de :

- la stabilité,
- le fluage,
- la compacité.

La teneur en bitume retenue est celle qui confère à l'enrobé le meilleur compromis entre ces trois caractéristiques.

Nota : Pour que les mélanges A1, A2 et A3 soient enrobés de la même manière (avec la même épaisseur du film de bitume), il faut garder une valeur fixe du module de richesse k . La teneur en liant sera calculée par la formule du paragraphe IV.2.2 et dépendra de la variation de la surface spécifique Σ (la masse volumique du mélange étant pratiquement constante).

1) Mélange A1 :

Pour déterminer la teneur en bitume du mélange A1, on effectue trois essais Marshall à 5,6 - 6,0 et 6,4% de liant.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau VI.1 et représentés sur la figure VI.1 :

Teneur en bitume (%)	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10 mm)	Compacité (%)
5,6	1180	32,64	95,38
6	1125	32,64	96,49
6,4	969	37,95	96,44

Tableau VI.1

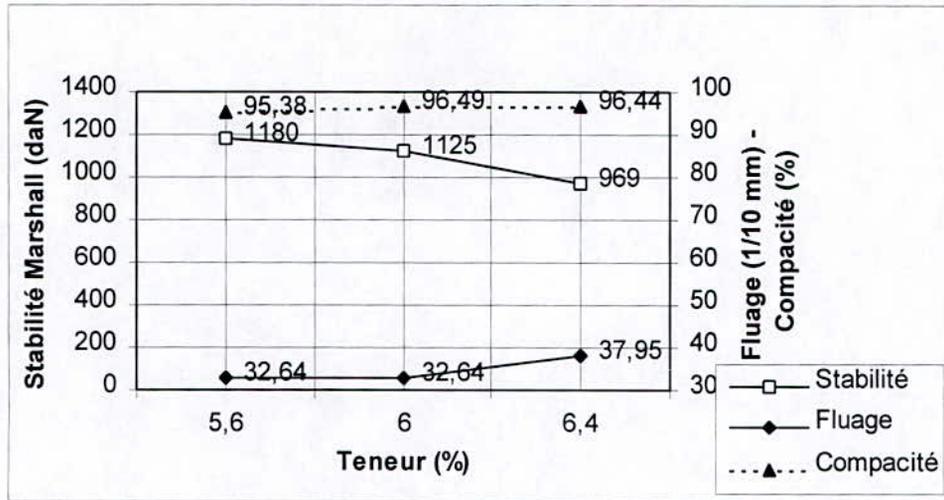


Figure VI.1

De ces résultats on remarque que :

- la stabilité Marshall maximale correspond à la teneur 5,6%
- le fluage Marshall minimal correspond à la teneur 5,6%
- la compacité maximale correspond à la teneur 6,4%

La teneur optimale sera la moyenne arithmétique des trois valeurs précédentes :

$$\% \text{ liant} = \frac{5,6 + 5,6 + 6,4}{3}$$

$$\% \text{ liant} = 5,73$$

Calcul du module de richesse :

Dans le §IV.2.2 on a vu que : la teneur en liant = $k \cdot \alpha \cdot \sqrt[3]{\Sigma}$ d'où :

$$k = \frac{\% \text{ liant}}{\alpha \cdot \sqrt[3]{\Sigma}}$$

avec : $100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$

La masse volumique granulaire MVRg sera calculée par la formule du §III.3.1 :

$$MVRg = \frac{100}{\frac{P_1}{MVRg_1} + \frac{P_2}{MVRg_2} + \dots + \frac{P_n}{MVRg_n}}$$

Tel que :

$P_1 = 42 ;$	$MVRg_1 = 2,78 \text{ t/m}^3$
$P_2 = 18 ;$	$MVRg_1 = 2,755 \text{ t/m}^3$
$P_3 = 40 ;$	$MVRg_1 = 2,75 \text{ t/m}^3$

$$MVRg = 2,763 \text{ t/m}^3$$

$$\alpha = 2,65 / \text{MVRg} = 0,959$$

$$\Sigma = 11,490 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$\Rightarrow k = 3,667$$

2) Mélange A2

D'après les formules du paragraphe précédent, le mélange A2 se caractérise par :

$$\text{MVRg} = 2,761 \text{ t/m}^3$$

$$\alpha = 0,960$$

$$\Sigma = 11,659 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$k = 3,667$$

$$\text{d'où : \%liant} = 5,75$$

3) Mélange A3

D'après les formules du paragraphe précédent, le mélange A3 se caractérise par :

$$\text{MVRg} = 2,762 \text{ t/m}^3$$

$$\alpha = 0,959$$

$$\Sigma = 12,592 \text{ m}^2/\text{kg}$$

$$k = 3,667$$

$$\text{d'où : \%liant} = 5,84$$

4) Mélange B

Pour déterminer la teneur en bitume du mélange B, on effectue trois essais Marshall à 5,4 - 5,8 et 6,2% de liant.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau VI.2 et représentés sur la figure VI.2 :

Teneur en bitume (%)	Stabilité Marshall (daN)	Fluage Marshall (1/10 mm)	Compacité (%)
5,4	917	33,87	92,30
5,8	954	34,71	93,08
6,2	1023	39,79	95,45

Tableau VI.2

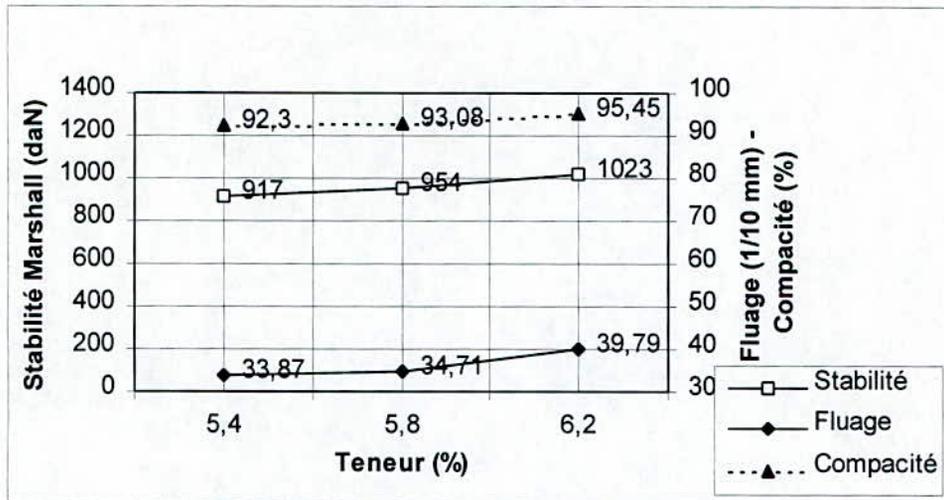


Figure VI.2

De ces résultats on remarque que :

- la stabilité Marshall maximale correspond à la teneur 6,2%
- le fluage Marshall minimal correspond à la teneur 5,4%
- la compacité maximale correspond à la teneur 6,2%

La teneur optimale sera la moyenne arithmétique des trois valeurs précédentes :

$$\% \text{liant} = \frac{6,2 + 5,4 + 6,2}{3}$$

$$\% \text{liant} = 5,93$$

Chapitre VII

Caractéristiques mécaniques du béton bitumineux avec ajout

VII.1 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DU BETON BITUMINEUX AVEC AJOUT

VII.1.1 Introduction

Pour évaluer l'amélioration des performances mécaniques du béton bitumineux en présence de l'ajout, on effectue un essai de compression LCPC (DURIEZ) et un essai MARSHALL pour chaque teneur en poudre de caoutchouc. Le premier essai permettra de déterminer la stabilité de l'enrobé ainsi que sa tenue à l'eau. Le second essai servira de confirmation pour l'évolution de la stabilité.

Le dosage en ajout va couvrir la plage variant, dans un premier temps, de 0% à 4% avec un pas de 1%. L'observation de l'évolution des performances conduira par la suite, soit à l'extension de cette plage, soit à son affinement par une diminution du pas.

Pour la série d'essais DURIEZ, on utilise les granulats du mélange A2, tandis que pour la série d'essais MARSHALL on utilise les granulats du mélange A3. Ce choix tend à minimiser les paramètres accidentels qui peuvent influencer sur les performances de l'enrobé dans la même série d'essais.

VII.1.2 Mode opératoire

Pour préparer les éprouvettes d'essai DURIEZ et MARSHALL, on suit le mode opératoire énoncé dans les normes NF P 98-251-1 et NF P 98-251-2 respectivement. Ces deux essais sont expliqués en résumé dans les paragraphes III.3.1 et III.3.2.

L'introduction de la poudre de caoutchouc se fait dans les deux essais pendant l'opération de malaxage. La quantité pesée (correspondant à une teneur définie) est versée progressivement, à travers l'orifice du malaxeur, dans le mélange (granulats + liant) porté à la température de mise en œuvre (160°C).

VII.1.3 Résultats de l'étude DURIEZ

Les résultats de l'étude DURIEZ effectuée pour les différents teneurs en ajout sont exposés dans le tableau VII.1. On y reporte :

- la résistance moyenne à la compression R (éprouvettes conservées sans immersion) ;
- la résistance moyenne à la compression r (éprouvettes conservées avec immersion) ;
- le rapport r/R ;
- la compacité.

Teneur (%)	R (kg/cm ²)	r (kg/cm ²)	r/R	Compacité %
0	81,90	68,64	0,84	94,92
1	82,49	91,27	1,11	95,50
2	82,23	92,18	1,12	94,30
3	68,36	83,36	1,22	93,42
4	54,42	70,99	1,30	93,04

Tableau VII.1 - Résultats de l'étude DURIEZ

Ces valeurs sont représentées sur la figure VII.1 :

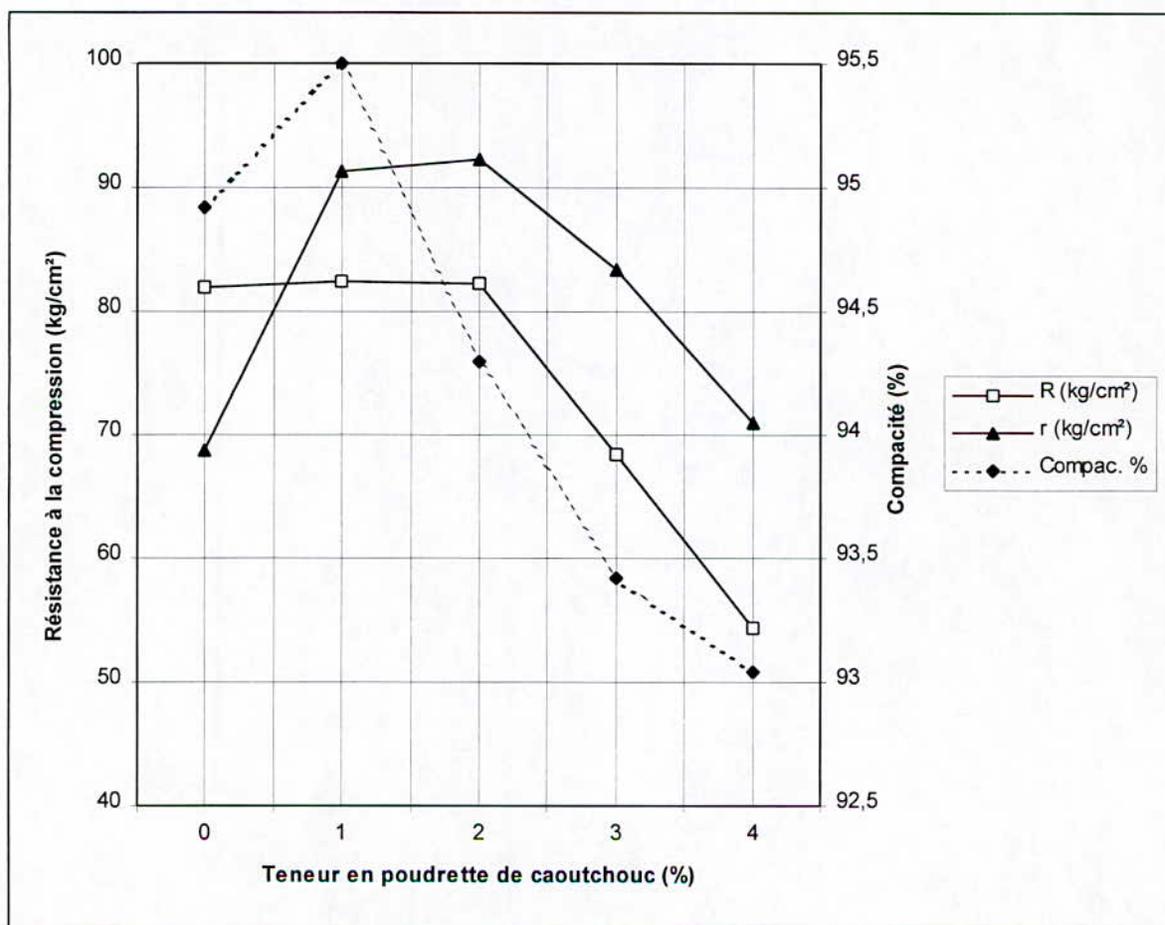


Figure VII.1 - Représentation des résultats de l'étude DURIEZ

VII.1.4 Résultats de l'étude MARSHALL

Les résultats de l'étude MARSHALL effectuée pour les mêmes teneurs en ajout (que pour l'essai DURIEZ) sont exposés dans le tableau VII.2. On y reporte :

- la stabilité MARSHALL ;
- le fluage MARSHALL ;
- la compacité.

Teneur (%)	Stabilité MARSHALL (kg)	Fluage MARSHALL (1/10 mm)	Compacité (%)
0	1007	39,22	95,37
1	1162	33,64	96,15
2	1154	38,10	96,42
3	1023	42,05	96,22
4	969	59,63	96,02

Tableau VII.2 - Résultats de l'étude MARSHALL

Ces valeurs sont représentées sur les graphes des figures VII.2, VII.3 et VII.4 :

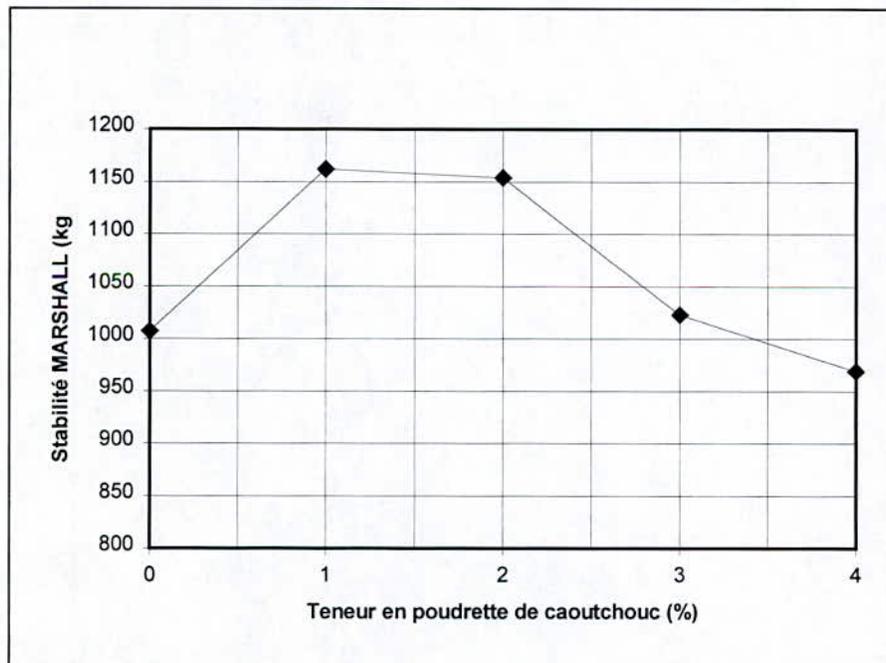


Figure VII.2 - Stabilité MARSHALL

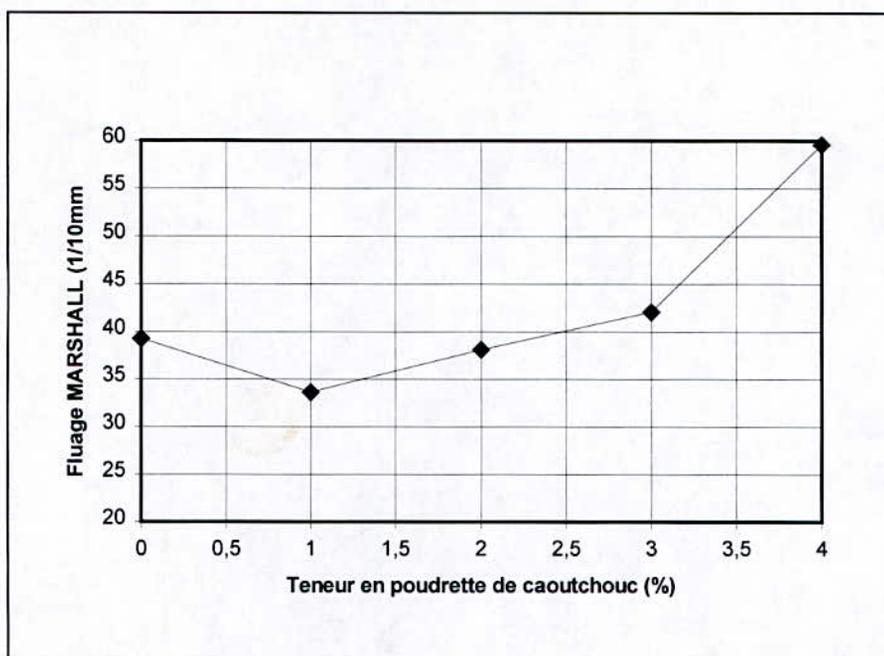


Figure VII.3 - Fluage MARSHALL

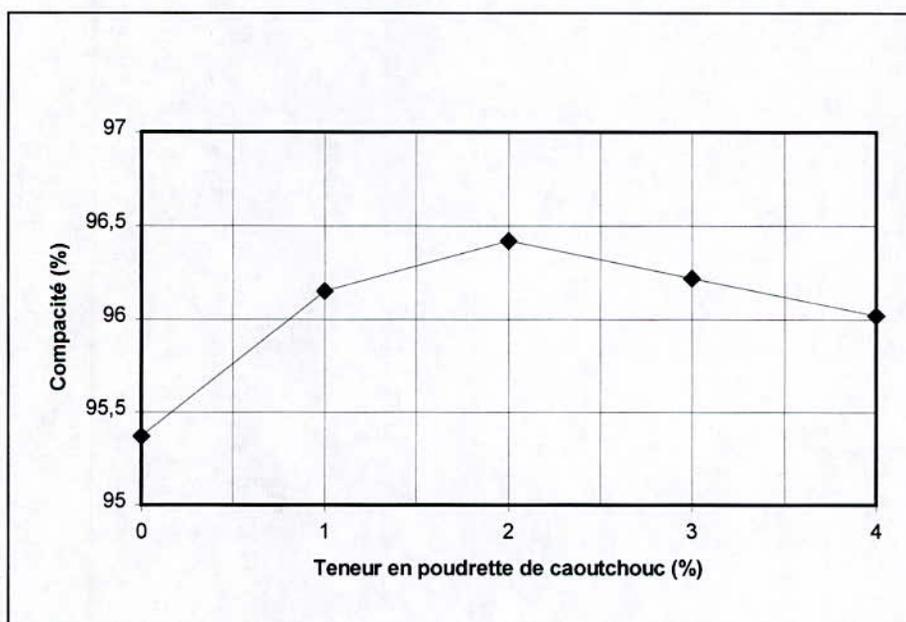


Figure VII.4 - Compacité

VII.2 INTERPRETATION DES RESULTATS ET CONCLUSION

VII.2.1 Interprétation des résultats

L'étude DURIEZ ainsi que l'étude MARSHALL effectuées pour un béton bitumineux avec ajout de poudrette de caoutchouc (EVA) ont donné des résultats concordants et cohérents qui se résument comme suit :

1) Etude DURIEZ

L'étude DURIEZ nous donne l'évolution de la résistance à la compression avec et sans immersion ainsi que la compacité en fonction de la teneur en poudrette de caoutchouc. D'après le graphe de la figure VII.1, on remarque que :

- la résistance à la compression à l'air (sans immersion à 18°C) R croît jusqu'à un optimum entre 1 et 2% sans pour autant que cette augmentation ne soit importante (inférieure à 1%). Après la teneur 2%, R chute rapidement ;
- la résistance à la compression à l'eau (avec immersion à 18°C) r , présente également la même allure que R , avec un optimum entre 1 et 2%. Néanmoins, la courbe de r est plus prononcée dans la partie à gauche de l'optimum (teneur inférieure à 1,5%) car dès le premier ajout, la valeur de r dépasse celle de R , alors qu'elle n'en représentait que 84%. Après la teneur 1,5%, r chute avec une plus faible pente ce qui la garde toujours supérieure à R ;
- la compacité atteint son maximum à 1% puis chute sans pour autant atteindre des valeurs trop faibles.

Les deux premières observations impliquent que le rapport immersion/compression (r/R) fait un bond de 0,84 à 1,12 puis reste supérieur à 1 en augmentant progressivement jusqu'à 1,3. Ceci dénote une nette amélioration de la tenue à l'eau de l'enrobé après ajout de la poudrette de caoutchouc.

La chute de la résistance après que la teneur 2% soit dépassée peut s'expliquer par le fait que l'augmentation de la quantité de poudrette (jouant en réalité un rôle de filler) modifie la composition du squelette solide de l'enrobé. Cette modification entraîne un accroissement significatif de la surface spécifique du mélange.

La teneur en liant étant constante, cet accroissement entraîne une diminution du module de richesse (§IV.2.2). Et comme la résistance mécanique est très susceptible aux variations de ce même module, une faible chute de celui-ci provoque effectivement une chute de la résistance.

2) Etude MARSHALL

L'étude MARSHALL quant à elle nous donne l'évolution de la stabilité, du fluage et de la compacité en fonction des mêmes teneurs en poudrette de caoutchouc. Les résultats de cette étude concordent bien avec ceux de l'étude DURIEZ, en effet :

- la stabilité MARSHALL, qui est l'équivalent de la résistance à la compression sans immersion R , présente bien un optimum entre 1 et 2% puis chute rapidement ;
- la compacité atteint son maximum entre 1 et 2% et chute également ;
- le fluage MARSHALL présente un minimum à 1% puis devient rapidement intolérable.

VII.2.2 Conclusion

Les deux études précédentes montrent que :

1. le béton bitumineux présente les meilleures caractéristiques à la teneur en poudrette de caoutchouc comprise entre 1 et 2%.
2. la tenue à l'eau de l'enrobé se voit nettement améliorée. Le rapport immersion/compression qui est de l'ordre de 80% dans un béton bitumineux ordinaire, dépasse là le seuil de 1. Ce cas particulier est rencontré dans les enrobés après ajout d'un dope d'adhésivité.

On peut dire que l'ajout de la poudrette de caoutchouc (EVA) dans le squelette solide du béton bitumineux a le même effet que celui d'un dope d'adhésivité. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que le mélange bitume+EVA en milieu aqueux rend l'interface liant – granulat moins susceptible à l'action de l'eau (amélioration de l'adhésivité).

Pour confirmer cette hypothèse, un essai DURIEZ a été effectué sur un béton bitumineux confectionné avec des granulats basaltiques provenant de CAP DJINET. Ces granulats se caractérisent par une faible adhésivité avec le bitume à cause de l'origine acide de la roche.

VII.3 VERIFICATION DES RESULTATS AVEC LES GRANULATS DE CAP-DJINET

VII.3.1 Introduction

L'étude DURIEZ faite avec les granulats de KEDDARA a mit en évidence l'excellente tenue à l'eau de l'enrobé en présence de la poudrette de caoutchouc. Ce comportement est semblable à celui d'un dope d'adhésivité. Il est utilisé en pratique pour améliorer le rapport immersion/compression du béton bitumineux dans le cas des roches acides réputées pour leur médiocre adhésivité avec le bitume.

Ainsi, pour confirmer l'amélioration de l'adhésivité du couple granulat/bitume dans le cas d'une roche acide (basalte de CAP DJINET), une étude DURIEZ a été effectuée pour un BB ordinaire et un BB à 1,5% de poudrette de caoutchouc (teneur optimale dans l'étude précédente). Ces essais permettront d'apprécier l'amélioration de la tenue à l'eau avec l'utilisation d'un granulat donnant habituellement des résultats moyens voire faible.

VII.3.2 Résultats

L'étude DURIEZ du béton bitumineux, confectionné avec les granulats de CAP DJINET (Mélange B) ont donné les résultats du tableau VII.3 :

Teneur (%)	R (kg/cm ²)	r (kg/cm ²)	r/R	Compacité %
0	72,19	61,09	0,85	97,67
1,5	70,84	69,13	0,98	96,51

Tableau VII.3 - Résultats de l'étude DURIEZ

Ces résultats sont représentés sur le graphe de la figure VII.5 :

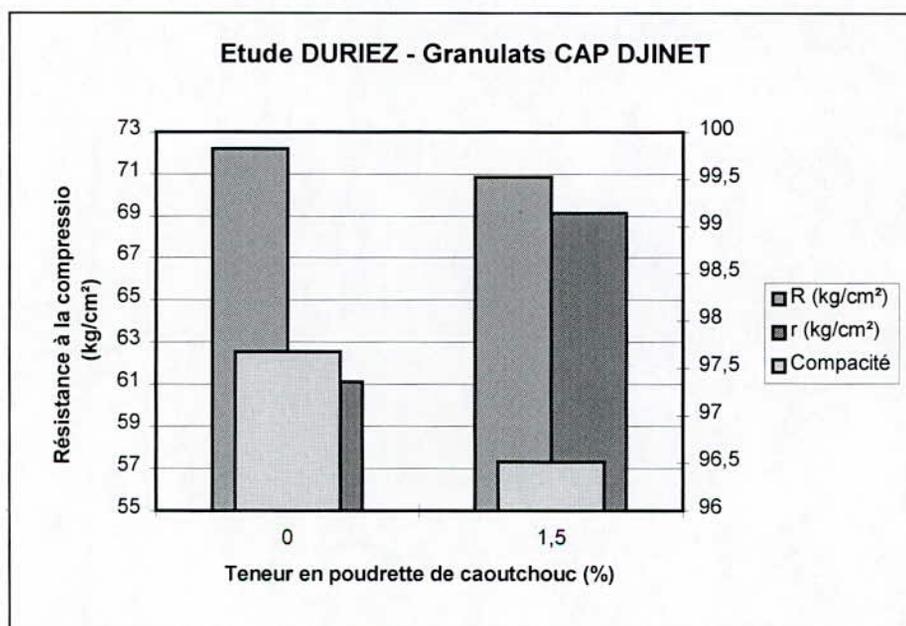


Figure VII.5 - Résultats de l'étude DURIEZ

VII.3.3 Interprétation et conclusion

L'étude DURIEZ effectuée sur un béton bitumineux avec les granulats basaltiques (CAP DJINET) a confirmée l'amélioration, avec un moindre degré, de la tenue à l'eau de l'enrobé.

En effet, le rapport immersion/compression qui est de l'ordre de 0,60 à 0,80 pour les enrobés à granulats basaltiques, a atteint la valeur de $0,98 \approx 1$ pour l'enrobé modifié. Donc l'ajout de cette poudre de caoutchouc a effectivement un effet semblable à celui d'un dope d'adhésivité.

Chapitre VIII

Module de rigidité

VIII.1 DETERMINATION INDIRECTE DU MODULE DE DEFORMATION DES MELANGES BITUMINEUX

VIII.1.1 Introduction

On a vu dans le chapitre III.2.2 la notion de module de rigidité dans le cas de matériaux viscoélastiques. La mesure de ce module est très utile pour le dimensionnement de la chaussée (détermination de l'épaisseur).

Pour mesurer ce module de rigidité on fait appel à la méthode de détermination indirecte du module de déformation des mélanges bitumineux. Cette méthode est appliquée sur des éprouvettes cylindriques ayant une épaisseur variant entre 30mm et 80mm.

VIII.1.2 Définition

Le module de déformation est obtenu par la relation suivante :

$$S_m = \frac{L}{D \times t} \times (\lambda + 0,27)$$

avec : L : la valeur de la charge maximale appliquée suivant la verticale (en N)

D : la plus grande déformation horizontale suivant le diamètre (mm)

t : la dernière épaisseur de l'échantillon testé (mm)

λ : coefficient de Poisson à la température testée.

T°	0°C	10°C	20°C	30°C
λ	0,25	0,25	0,35	0,45

Tableau VIII.1 - Valeurs du coefficient de Poisson en fonction de la température

VIII.1.3 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes testées sont préparées de la même manière que pour l'essai MARSHALL tout en respectant une épaisseur qui doit être supérieure à 30mm et inférieure à 80mm.

Les éprouvettes doivent être gardées dans un endroit qui satisfait les conditions suivantes :
 - humidité : 65%
 - température : 20°C.

Ces conditions doivent être garanties durant une période jugée suffisante pour que chaque point de l'éprouvette soit dans les mêmes conditions.

VIII.1.4 Exécution de l'essai

On suit les étapes suivantes :

- Amener l'éprouvette à la température d'essai (20°C) ;
- Placer l'éprouvette de façon à ce que les capteurs soient perpendiculaires aux surfaces verticales de l'éprouvette ;
- Exiger la déformée que l'on veut avoir (5 microns dans notre cas) et enregistrer la charge qui provoque cette déformée ;
- Refaire l'essai une deuxième fois en tournant l'éprouvette de 90° ;
- Les résultats sont enregistrés par le micro-ordinateur relié à l'appareil, ainsi une fiabilité satisfaisante et une grande précision sont garanties par cette méthode.

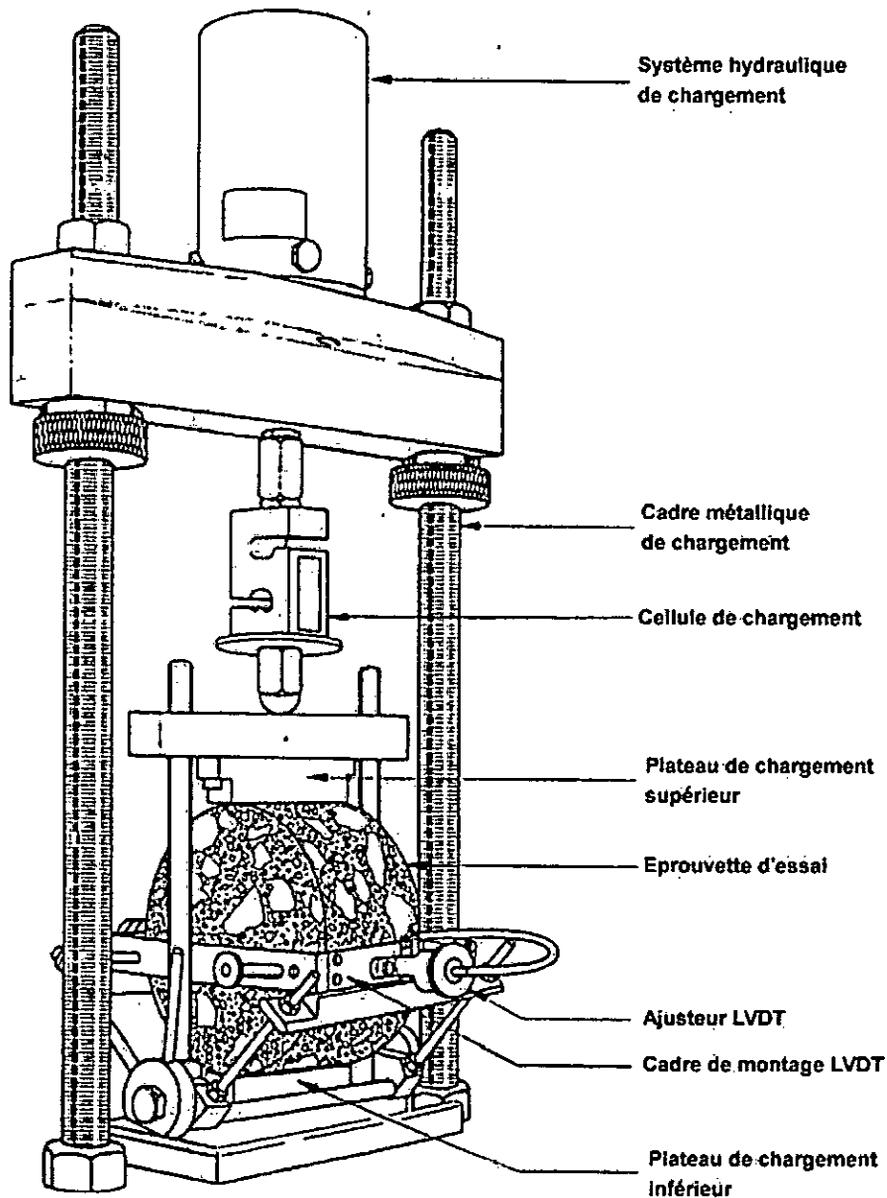


Figure VIII.1 - Cellule de chargement de l'essai de détermination du module de rigidité

VIII.1.5 Résultats

Les valeurs du module de rigidité en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc sont reportées sur le tableau VIII.2 :

Teneur en poudre de caoutchouc (%)	Module de rigidité (MPa)
0	6450
1	7669
2	7332
3	6564
4	5889

Tableau VIII.2 - Evolution du module de rigidité

VIII.2 CALCUL DE L'ÉPAISSEUR OPTIMALE DE LA COUCHE DE ROULEMENT PAR LA MÉTHODE DES ÉQUIVALENCES

VIII.2.1 Introduction

Le calcul des épaisseurs des différentes couches d'une chaussée présente quelques difficultés liées à l'interaction de plusieurs paramètres complexes. Des méthodes ont été proposées pour dimensionner les chaussées, et parmi lesquelles on a choisi la méthode des équivalences.

VIII.2.2 Définition

La méthode des équivalences introduit la notion du *coefficient d'équivalence* (CE). Ce coefficient prend en compte toutes les qualités mécaniques des différentes couches constituant la chaussée.

L'épaisseur de la couche de chaussée multipliée par son coefficient d'équivalence donnera une valeur constante. Ceci permettra d'écrire :

$$h_0 \cdot CE_0 = h \cdot CE \Rightarrow h = h_0 \frac{CE_0}{CE}$$

h_0, CE_0 : épaisseur et coefficient d'équivalence de la couche déjà dimensionnée par d'autres méthodes de calcul.

h, CE : épaisseur et coefficient d'équivalence de la couche modifiée équivalente.

Ainsi plus le coefficient d'équivalence est important, plus le gain en épaisseur pour un même comportement mécanique est meilleur.

- Le coefficient d'équivalence est calculé par la formule suivante :

$$CE = \sqrt[3]{\frac{E}{500}}$$

E : module de rigidité en mégapascal (MPa)

Pour un béton bitumineux ordinaire, ce coefficient sera compris entre 2 et 2,5.

VIII.2.3 Résultats

On calcule les coefficients d'équivalence pour les modules de rigidité précédents, on obtient ainsi les résultats du tableau VIII.3 :

Teneur en poudre de caoutchouc (%)	Coefficient d'équivalence
0	2,35
1	2,48
2	2,45
3	2,36
4	2,28

Tableau VIII.3 - Evolution du coefficient d'équivalence

Les résultats des tableaux VIII.2 et VIII.3 sont représentés sur le graphe de la figure VIII.2 :

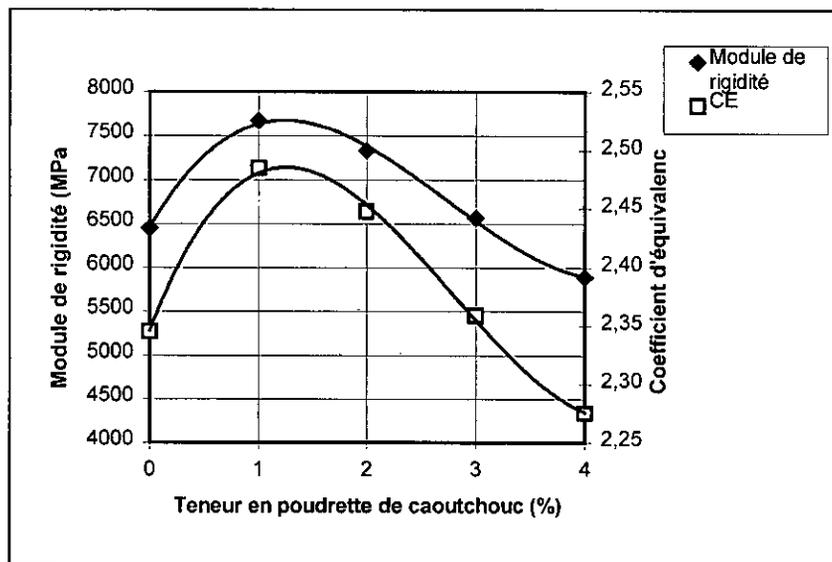


Figure VIII.2 - Evolution du module de rigidité et du coefficient d'équivalence

VIII.2.4 Conclusion

L'évolution du module de rigidité, et par la même occasion, du coefficient d'équivalence en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc, confirme que l'optimum se situe bien entre 1 et 2% ce qui est en accord avec les résultats précédents.

Le calcul du coefficient d'équivalence de l'enrobé permet d'apprécier la réduction dans l'épaisseur de la chaussée appliquée dans le cas de l'utilisation de l'ajout de poudre de caoutchouc. Ce gain en épaisseur implique, après une étude technico-économique, une diminution du prix de revient de la chaussée avec respect des mêmes performances mécaniques exigées.

Chapitre IX

Conclusion générale

L'ajout de caoutchouc recyclé dans le squelette solide pour constituer le béton bitumineux, permet d'obtenir un revêtement routier doté d'un comportement mécanique amélioré.

La présente étude a permis de faire un constat initial sur l'effet de l'incorporation de la poudrette de caoutchouc (EVA) directement dans le squelette solide de l'enrobé. Ce constat peut se résumer à trois résultats exploitables :

1. La nette augmentation de la tenue à l'eau de l'enrobé, s'expliquant par une amélioration de l'adhésivité du couple liant/granat.
2. Une augmentation de la compacité de l'enrobé grâce à l'action de la poudrette de caoutchouc qui joue un rôle de filler.
3. Une amélioration assez significative du module de rigidité du béton bitumineux, qui pourrait conduire à une réduction de l'épaisseur de la couche de roulement et par la même une réduction du coût. En effet, la poudrette de caoutchouc est considérée comme étant un déchet et ne nécessite donc qu'une opération de broyage peu coûteuse.

En plus de ces qualités propres à l'enrobé, l'utilisation de la poudrette de caoutchouc recyclé présente un autre aspect aussi important qui est l'impact sur l'environnement.

Dans le monde, on compte chaque année environ 900 millions de pneus usagés (tous types confondus) et dont il faut se débarrasser. Parallèlement, les estimations indiquent une augmentation de 19% de la consommation mondiale de pneus d'ici 2005 en raison de la demande croissante de mobilité. Seuls 10% des pneus usés rentrent dans un système de transformation et de régénération du caoutchouc.

Donc l'utilisation du caoutchouc recyclé comme matériau routier offre en plus de l'amélioration des performances de l'enrobé bitumineux, une solution écologique pour l'élimination des déchets.

Annexe 1

**Résultats détaillés
de l'étude DURIEZ**

RESULTATS DETAILLES DE L'ETUDE DURIEZ

Dans les feuilles d'essai DURIEZ on a adopté les notations suivantes :

- M_{va} : masse volumique absolue.
- M_{j+8j} : poids de l'éprouvette après 8 jours (7 jours d'immersion)
- W_{j+8j} : accroissement relatif du poids après 8 jours

Les masses sont exprimées en (g), les dimensions en (cm), les volumes en (cm^3) et la masse volumique en (g/cm^3).

1) Granulats de KEDDARA

Teneur en poudrette : 0%
 Date d'écrasement : Mercredi 7/04/1999
 Module de richesse : 3,6598
 Surface spécifique : 11,660
 MVRg : 2,7608

Eprouvette N°	38	40	32	36	37	39	31	33	34	35
Masse (M)	940,2	1046,4	1058	1059,7	1055,4	1053,2	1054,6	1058,5	1058,6	1047,2
Diamètre moyen	8	8,01	8	8	8	8	8	8	8	8
Hauteur moyenne	7,93	8,82	8,88	8,89	8,86	8,83	8,79	8,81	8,83	8,77
Volume	398,61	444,45	446,36	446,86	445,35	443,84	441,83	442,84	443,84	440,83
M_{va} géométrique	2,3587	2,3544	2,3703	2,3714	2,3698	2,3729	2,3869	2,3903	2,3851	2,3755
M_{va} moyenne										
M_{va} hydrostatique	2,3987	2,4044								
Compacité	94,808	95,032								
% des vides (v)	5,1918	4,9677								
M_{j+8j}							1066	1068,1	1070,7	1056,2
W_{j+8j} (%)							1,08	0,91	1,14	0,86
Charge (kg)			3250	4000	4200	4150	3250	3400	3450	3700
Résistance (kg/cm^2)			64,66	79,58	83,56	82,56	64,66	67,64	68,64	73,61
Résist. moy. (R et r)			77,59				68,64			
Rapport (r/R)			0,88							

Eprouvette N°	38	40
Masse de l'éprouvette (gr) M1	940,2	1046,4
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	965,8	1077,9
Masse de l'éprouvette immergée M3	545,4	607,7
Masse de la paraffine M2 - M1	25,6	31,5
Volume de la paraffine $M2-M1/0,9 = V1$	28,44	35,00
Volume brut $M2 - M3 = V2$	420,4	470,2
Volume net $V2 - V1 = V3$	391,96	435,20
Masse volumique apparente = $M1 / V3$	2,3987	2,4044
Masse volumique apparente moyenne	2,4016	

Teneur en poudrette 1%
Date d'écrasement : Mercredi 7/04/1999
Module de richesse : 3,6598
Surface spécifique : 11,660
MVRg : 2,7608

Eprouvette N°	46	50	43	47	48	49	41	42	44	45
Masse (M)	1069,4	1069,4	1067,1	1069,8	1069,1	1069,9	1068,4	1071,4	1073,9	1070
Diamètre moyen	8	8	8	8	8	8,01	8	8	8	8
Hauteur moyenne	8,86	8,93	8,78	8,88	8,86	8,87	8,78	8,81	8,82	8,8
Volume	445,35	448,87	441,33	446,36	445,35	446,97	441,33	442,84	443,34	442,34
Mva géométrique	2,4012	2,3824	2,4179	2,3967	2,4006	2,3937	2,4209	2,4194	2,4223	2,419
Mva moyenne										
Mva hydrostatique	2,4131	2,4194								
Compacité	95,378	95,625								
% des vides (v)	4,6224	4,3755								
Mj+8jours							1073,8	1076,8	1080,1	1075,4
Wj+8jours (%)							0,51	0,50	0,58	0,50
Charge (kg)			4300	3700	3900	4250	4500	4350	4700	4800
Résistance (kg/cm ²)			85,55	73,64	77,59	84,34	89,52	86,54	93,50	95,49
Résist. moy. (R et r)			80,27				91,27			
Rapport (r/R)			1,14							

Eprouvette N°	46	50
Masse de l'éprouvette (gr) M1	1069,4	1069,4
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1086,9	1089,1
Masse de l'éprouvette immergée M3	624,3	625,2
Masse de la paraffine M2 - M1	17,5	19,7
Volume de la paraffine M2-M1/0,9 = V1	19,44	21,89
Volume brut M2 - M3 = V2	462,6	463,9
Volume net V2 - V1 = V3	443,16	442,01
Masse volumique apparente = M1 / V3	2,4131	2,4194
Masse volumique apparente moyenne	2,4163	

Teneur en poudrette 2%
Date d'écrasement : Lundi 29/03/1999
Module de richesse : 3,6598
Surface spécifique : 11,660
MVRg : 2,7608

Eprouvette N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masse (M)	1075,1	1072,5	1079,3	1076,1	1070,8	1079,5	1075,8	1076,3	1077,1	1080,5
Diamètre moyen	8,01	8	8	7,99	8	8	7,99	8,01	7,98	8,01
Hauteur moyenne	9,08	9,08	9,14	9,13	9,09	9,02	9	9	9,02	9,03
Volume	457,55	456,41	459,43	457,78	456,91	453,39	451,26	453,52	451,13	455,03
Mva géométrique	2,3497	2,3499	2,3492	2,3507	2,3436	2,3809	2,384	2,3732	2,3876	2,3746
Mva moyenne										
Mva hydrostatique	2,3873	2,3846								
Compacité	94,355	94,25								
% des vides (v)	5,6447	5,7496								
Mj+8jours							1083,4	1085,6	1087	1088,6
Wj+8jours (%)							0,71	0,86	0,92	0,75
Charge (kg)			4200	4600	4100	4100	5100	4450	4650	4800
Résistance (kg/cm ²)			83,56	94,74	81,57	81,57	404,72	88,31	92,97	95,25
Résist. moy. (R et r)			84,61				94,56			
Rapport (r/R)			1,12							

Eprouvette N°	1	2
Masse de l'éprouvette (gr) M1	1075,1	1072,5
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1108,9	1103,5
Masse de l'éprouvette immergée M3	621	619,3
Masse de la paraffine M2 - M1	33,8	31
Volume de la paraffine M2-M1/0,9 = V1	37,56	34,44
Volume brut M2 - M3 = V2	487,9	484,2
Volume net V2 - V1 = V3	450,34	449,76
Masse volumique apparente = M1 / V3	2,3873	2,3846
Masse volumique apparente moyenne	2,3860	

Teneur en poudrette 3%
 Date d'écrasement : Mardi 30/03/1999
 Module de richesse : 3,6598
 Surface spécifique : 11,660
 MVRg : 2,7608

Eprouvette N°	15	16	11	12	13	14	17	18	19	20
Masse (M)	1088,7	972,1	1087,6	1087,5	1089,5	1087,3	1083,9	1087,2	1086,1	1088,1
Diamètre moyen	8	8,01	8	7,99	8	8	8	8	7,99	8
Hauteur moyenne	9,27	8,21	9,4	9,39	9,33	9,46	9,16	9,15	9,07	9,15
Volume	465,96	413,71	472,5	470,81	468,98	475,51	460,43	459,93	454,77	459,93
Mva géométrique	2,3365	2,3497	2,3018	2,3098	2,3231	2,2866	2,3541	2,3638	2,3882	2,3658
Mva moyenne										
Mva hydrostatique	2,3569	2,3702								
Compacité	93,154	93,68								
% des vides (v)	6,846	6,3197								
Mj+8jours							1091,5	1092	1092,1	1093,8
Wj+8jours (%)							0,70	0,44	0,55	0,52
Charge (kg)			3100	3400	3700	3200	4100	4350	4000	4300
Résistance (kg/cm ²)			64,67	67,81	73,61	63,66	81,57	86,54	79,78	85,55
Résist. moy. (R et r)			66,69				83,36			
Rapport (r/R)			1,25							

Eprouvette N°	15	16
Masse de l'éprouvette (gr) M1	1088,7	972,1
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1098,4	980,8
Masse de l'éprouvette immergée M3	625,7	561
Masse de la paraffine M2 - M1	9,7	8,7
Volume de la paraffine M2-M1/0,9 = V1	10,78	9,67
Volume brut M2 - M3 = V2	472,7	419,8
Volume net V2 - V1 = V3	461,92	410,13
Masse volumique apparente = M1 / V3	2,3569	2,3702
Masse volumique apparente moyenne	2,3635	

Teneur en poudrette 4%
Date d'écrasement : Mercredi 31/03/1999
Module de richesse : 3,6598
Surface spécifique : 11,660
MVRg : 2,7608

Eprouvette N°	23	25	26	27	29	30	21	22	24	28
Masse (M)	1075,5	1079,2	1099,5	1097	1099	1099,1	1096,3	1097,2	1099,2	1098,1
Diamètre moyen	7,99	8,01	8,01	8,13	8,01	8,08	8,02	8	8,01	8
Hauteur moyenne	9,17	9,19	9,5	9,25	9,5	9,39	9,38	9,36	9,44	9,49
Volume	459,78	463,1	478,72	480,19	478,72	481,48	473,85	470,48	475,69	477,02
Mva géométrique	2,3391	2,3304	2,2968	2,2845	2,2957	2,2828	2,3136	2,3321	2,3107	2,302
Mva moyenne										
Mva hydrostatique	2,3522	2,3555								
Compacité	92,97	93,10								
% des vides (v)	7,03	6,90								
Mj+8jours							1105,9	1103,6	1109,4	1109
Wj+8jours (%)							0,88	0,58	0,93	0,99
Charge (kg)			2900	2500	2900	2400	3550	3900	3800	3050
Résistance (kg/cm ²)			57,55	48,16	57,55	46,84	70,27	77,59	75,41	60,68
Résist. moy. (R et r)			52,52				70,99			
Rapport (r/R)			1,35							

Eprouvette N°	23	25
Masse de l'éprouvette (gr) M1	1075,5	1079,2
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1092,4	1108,4
Masse de l'éprouvette immergée M3	616,4	617,8
Masse de la paraffine M2 - M1	16,9	29,2
Volume de la paraffine M2-M1/0,9 = V1	18,78	32,44
Volume brut M2 - M3 = V2	476	490,6
Volume net V2 - V1 = V3	457,22	458,16
Masse volumique apparente = M1 / V3	2,3522	2,3555
Masse volumique apparente moyenne	2,3539	

2) Granulats de CAP DJINET

Teneur en poudrette 0%
 Date d'écrasement : Lundi 24/05/1999
 Module de richesse : 3,7087
 Surface spécifique : 10,197
 MVRg : 2,6370

Eprouvette N°	9	10	1	2	4	5	3	6	7	8
Masse (M)	1062,9	1060,3	1063,4	1062,2	1060,6	1061,8	1062,7	1061,4	1062,8	1061,2
Diamètre moyen	8	8	8	8	8	8	8,01	8,01	8	8
Hauteur moyenne	9,27	9,25	9,27	9,34	9,25	9,28	9,22	9,19	9,25	9,25
Volume	465,96	464,96	465,96	469,48	464,96	466,46	464,61	463,1	464,96	464,96
Mva géométrique	2,2811	2,2804	2,2822	2,2625	2,2811	2,2763	2,2873	2,292	2,2858	2,2824
Mva moyenne										
Mva hydrostatique	2,3745	2,3587								
Compacité	98,00	97,34								
% des vides (v)	2,00	2,66								
Mj+8jours							1092,6	1093,4	1097,4	1095,5
Wj+8jours (%)							2,81	3,01	3,26	3,23
Charge (kg)			3560	3440	3750	3750	3140	3080	2950	3140
Résistance (kg/cm ²)			70,82	68,44	74,60	74,60	62,31	61,12	58,69	62,47
Résist. moy. (R et r)			72,19				61,09			
Rapport (r/R)			0,85							

Eprouvette N°	9	10
Masse de l'éprouvette (gr) M1	1062,9	1060,3
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1078,9	1078
Masse de l'éprouvette immergée M3	613,5	608,8
Masse de la paraffine M2 - M1	16	17,7
Volume de la paraffine M2-M1/0,9 = V1	17,78	19,67
Volume brut M2 - M3 = V2	465,4	469,2
Volume net V2 - V1 = V3	447,62	449,53
Masse volumique apparente = M1 / V3	2,3745	2,3587
Masse volumique apparente moyenne	2,3666	

Teneur en poudrette 1,5%
 Date d'écrasement : Lundi 24/05/1999
 Module de richesse : 3,7087
 Surface spécifique : 10,197
 MVRg : 2,6370

Eprouvette N°	11	14	17	18	19	20	12	13	15	16
Masse (M)	1074	1074,7	1074,2	1073,7	1078,3	1075,6	1074,2	1076	1073,4	1078,6
Diamètre moyen	8	8	8,01	8,01	8,01	8	8	8	8	8
Hauteur moyenne	9,45	9,3	9,6	9,6	9,59	9,59	9,32	9,33	9,33	9,6
Volume	475,01	467,47	483,76	483,76	483,25	482,05	468,47	468,98	468,98	482,55
Mva géométrique	2,261	2,299	2,2205	2,2195	2,2313	2,2313	2,293	2,2944	2,2888	2,2352
Mva moyenne										
Mva hydrostatique	2,3210	2,3559								
Compacité	95,79	97,23								
% des vides (v)	4,21	2,77								
Mj+8jours							1102,5	1103,7	1103,4	1121,9
Wj+8jours (%)							2,63	2,57	2,79	4,01
Charge (kg)			3320	3810	3320	3820	3690	3940	3690	2580
Résistance (kg/cm ²)			65,88	75,61	65,88	76,00	73,41	78,38	73,41	51,33
Résist. moy. (R et r)			70,84				69,13			
Rapport (r/R)			0,98							

Eprouvette N°	11	14
Masse de l'éprouvette (gr) M1	1074	1074,7
Masse de l'éprouvette paraffinée M2	1093,5	1093,8
Masse de l'éprouvette immergée M3	609,1	616,4
Masse de la paraffine M2 - M1	19,5	19,1
Volume de la paraffine M2-M1/0,9 = V1	21,67	21,22
Volume brut M2 - M3 = V2	484,4	477,4
Volume net V2 - V1 = V3	462,73	456,18
Masse volumique apparente = M1 / V3	2,3210	2,3559
Masse volumique apparente moyenne	2,3384	

Annexe 2

**Résultats détaillés
de l'étude MARSHALL**

RESULTATS DETAILLES DE L'ETUDE MARSHALL

N° EPROUVETTE	1	2	3
Pourcentage bitume %	5,736%		
Pourcentage poudrette	0		
Poids à l'air	1163,8	1162,7	1163,5
Poids dans l'eau	687,5	688,6	689,2
Poids après immersion	1167,4	1164,8	1166
Volume	479,9	476,2	476,8
Densité apparente	2,425	2,442	2,440
Densité théorique	2,554		
Moyenne D.app/D.th	0,954		
Compacité	95,37%		
Pourcentage des vides	4,63%		
Charges	980,40	1014,60	1026,00
Charge moyenne	1007,00		
Fluage	42,22	36,25	39,20
Fluage Moyen	39,22		

N° EPROUVETTE	1	2	3
Pourcentage bitume %	5,736%		
Pourcentage poudrette	1		
Poids à l'air			
Poids dans l'eau	638,4	651,2	653,2
Poids après immersion	1090,1	1120,3	1121,9
Volume	451,7	469,1	468,7
Densité apparente	2,413	2,388	2,394
Densité théorique	2,494		
Moyenne D.app/D.th	0,962		
Compacité	96,15%		
Pourcentage des vides	3,85%		
Charges	1160,00	1170,00	1155,00
Charge moyenne	1161,67		
Fluage	30,48	32,35	38,10
Fluage Moyen	33,64		

N° EPROUVETTE	1	2	3
Pourcentage bitume %	5,736%		
Pourcentage poudrette	2		
Poids à l'air			
Poids dans l'eau	689,9	684	687,2
Poids après immersion	1192,2	1201,2	1194,7
Volume	502,3	517,2	507,5
Densité apparente	2,373	2,323	2,354
Densité théorique	2,437		
Moyenne D.app/D.th	0,964		
Compacité	96,42%		
Pourcentage des vides	3,58%		
Charges	1150,00	1070,00	1240,00
Charge moyenne	1153,33		
Fluage	35,56	38,10	40,64
Fluage Moyen	38,10		

N° EPROUVETTE	1	2	3
Pourcentage bitume %	5,736%		
Pourcentage poudrette	3		
Poids à l'air			
Poids dans l'eau	680,9	677,1	685,6
Poids après immersion	1210,8	1206,8	1206,8
Volume	529,9	529,7	521,2
Densité apparente	2,285	2,278	2,315
Densité théorique	2,383		
Moyenne D.app/D.th	0,962		
Compacité	96,22%		
Pourcentage des vides	3,78%		
Charges	950,00	1040,00	1080,00
Charge moyenne	1023,33		
Fluage	40,12	45,33	40,69
Fluage Moyen	42,05		

N° EPROUVETTE	1	2	3
Pourcentage bitume %	5,736%		
Pourcentage poudrette	4		
Poids à l'air	1205,5	1204,7	1208,4
Poids dans l'eau	675,4	676,9	682,4
Poids après immersion	1213,9	1215,6	1222
Volume	538,5	538,7	539,6
Densité apparente	2,239	2,236	2,239
Densité théorique	2,331		
Moyenne D.app/D.th	0,960		
Compacité	96,02%		
Pourcentage des vides	3,98%		
Charges	1080,00	895,00	932,00
Charge moyenne	969,00		
Fluage	55,36	62,05	61,48
Fluage Moyen	59,63		

Bibliographie

- M. DURIEZ, J. ARRAMIDE
Nouveau traité de matériaux de construction
Tome 3 - Liants et bétons hydrocarbonés - 2^{ème} édition.
Dunod, Paris 1962.

- G. JEUFFROY
Conception et construction des chaussées
Tome 2 - Les matériaux, les matériels, les techniques d'exécution des travaux -
4^{ème} édition
Eyrolles, Paris 1985.

- Claude REGIS
Cours de routes : assises de chaussées
Presses de l'école nationale des ponts et chaussées 1985

- Roger COQUAND
Routes : circulation - tracé - construction
Tome 2 - construction et entretien - 7^{ème} édition
Eyrolles, Paris 1980

- Revue Générale des Routes et des Aérodrômes (RGRA)
 - n° 575 mai 1981
 - n° 580 novembre 1981
 - n° 618 avril 1985
 - n° 763 juin 1998
 - n° 765 septembre 1998

- Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées
 - n° 70 mars, avril 1974
 - n° 87 janvier, février 1977
 - n° 144 juillet, août 1986
 - n° 146 novembre, décembre 1986
 - n° 172 mars, avril 1991
 - numéro spécial décembre 1977

- Normes françaises (NF)
 - NF P 18-554
 - NF P 18-557
 - NF P 18-560
 - NF P 18-572
 - NF P 18-573
 - NF P 18-592
 - NF P 18-597
 - NF T 66-004
 - NF T 66-008
 - NF P 98-251-1
 - NF P 98-251-2

- Norme ASTM D 92-72