

Chapitre V

Formulation des Bétons Bitumineux

V.1 Introduction

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques qui vont participer, plus ou moins rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation du revêtement (Perret et al. 2000). Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine:

- Les sollicitations du trafic : principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic et les frottements de surface pneu-chaussée ;
- Les sollicitations climatiques: entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courte durée (journalières) ou soit de longue durée (saisonniers) ;
- Les phénomènes chimiques : dus à l'oxydation naturelle des liants hydrocarbonés, à l'action des sels de déverglaçage provenant des entretiens hivernaux, et aux dégradations de surface de la chaussée par le rayonnement solaire.

Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées (VSS SN 640 925a 1997), notamment:

- Les fissurations de surface sous la forme de fissures isolées ou, dans les cas les plus graves, sous la forme de faïençage généralisé ;
- Les déformations permanentes (ou orniérage) suite à l'accumulation de déformations irréversibles ;
- Les dégradations de surface sous la forme de polissage des granulats, les désenrobages et perte de gravillons, les pelades et les nids de poule.

De ce fait, le besoin d'améliorer ou d'optimiser la durabilité des chaussées routières, tant lors de la conception des chaussées neuves que lors de la maintenance des chaussées routières, est un souci majeur des gestionnaires de réseaux routiers. Dans cette optique, l'évaluation des performances des enrobés bitumineux, à long terme, au travers d'essais de laboratoire pertinents s'avère indispensable. Les nouvelles configurations de charges des poids lourds ont modifié de manière significative les sollicitations des revêtements routiers, entraînant l'apparition de dégradations prématurées sur des chaussées qui se comportaient normalement jusqu'alors, et dont les matériaux répondaient aux spécifications en vigueur. En particulier, les chaussées endurent le remplacement progressif des roues jumelées des poids lourds par des pneumatiques super-larges (de 300 à 500 mm de largeur), ainsi que des pressions de gonflage généralement plus élevées. Ces constatations ont mis en évidence le fait que

certains essais actuellement utilisés ne sont pas ou plus adaptés pour évaluer la performance des enrobés et méritent d'être remplacés.

Les composants et les enrobés doivent donc être caractérisés par des essais de laboratoire qui permettront d'évaluer les performances à long terme des enrobés bitumineux en vue d'optimiser leur durée de vie. En effet, la formulation des mélanges est, à ce titre, déterminante pour l'obtention d'enrobés bitumineux performants. La composition des enrobés influence de façon déterminante la durabilité et les performances des revêtements.

A ce jour, l'optimisation des formules pour mélanges bitumineux se fait encore par une approche empirique sur la base d'essais traditionnels qui souvent n'offrent qu'une faible corrélation avec les performances réelles des matériaux. Afin de satisfaire aux critères de durabilité des revêtements routiers, il conviendra de sélectionner une gamme d'essais qui permettront d'évaluer de façon satisfaisante la performance des mélanges bitumineux constituant le revêtement des chaussées.

V.2 Bitumes

V.2.1 Définition

Le « *béton bitumineux : BB* » est un enrobé riche en bitume constitué d'un mélange de granulats (sable, gravier et fines), utilisé principalement pour les couches de roulement, c'est-à-dire pour les couches supérieures de la chaussée. Les bétons bitumineux se classent en fonction de leur granulométrie. Ils sont toujours posés sur une couche de base en matériaux hydrocarbonés ou traités au liant hydraulique ou sur une couche de liaison en enrobés pour les couches minces (Figure V.1). Plus précisément, le béton bitumineux est composé de différents éléments à savoir :

- Des gravillons ;
- Du sable ;
- Des fillers ;
- Du bitume utilisé comme liant.

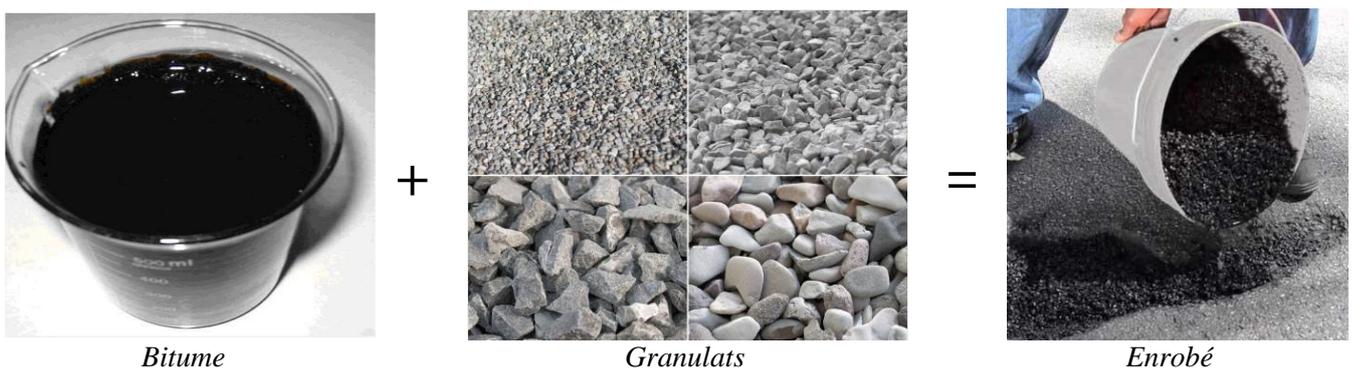


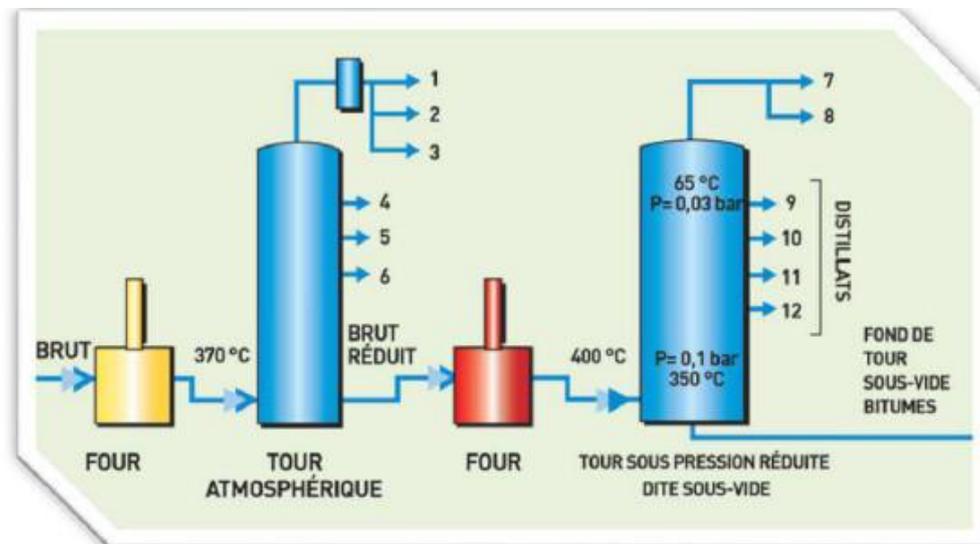
Figure V.1 – Composition d'un enrobé utilisé principalement pour les couches de roulement.

V.2.2 Origine et fabrication

Tous les bitumes sont des produits du pétrole brut où ils se trouvent en solution. Ils sont le résultat de l'élimination des huiles servant de solvant par évaporation ou distillation du pétrole brut. Sachant que

de tels processus pourraient se produire dans la nature, au niveau des couches souterraines, les bitumes proviennent en conséquence de deux sources : naturelle ou industrielle.

- Origine naturelle : La production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 milles tonnes ;
- Origine industrielle : Ce dernier compose deux parties (Figure V.2) :
 - La « *Distillation direct* » : Distillation atmosphérique : Ce mode de raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340 °C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit ;
 - La « *Distillation sous vide* » : A ce stade, le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage aux alentours de 400 °C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite. Il est possible, dans ce type d'unité, de fabriquer directement toutes les classes de bitumes du 20/30 au 160/220.



- | | | |
|-------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1. Gaz | 5. Carburateur | 9. Gasoil sous -vide |
| 2. Essence légère | 6. Gasoil | 10. 1 ^{er} Sous -vide |
| 3. Essence | 7. Vers éjecteurs de vapeur | 11. 2 ^e Sous -vide |
| 4. White-spirit | 8. Gasoil entraîné | 12. 3 ^e Sous -vide |

Figure V.2 – Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.

V.2.3 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume

Le bitume confère à l'enrobé sa flexibilité et sa capacité à résister à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs dont le trafic, les conditions climatiques du site, etc. A température de service élevée, le bitume doit demeurer suffisamment visqueux afin d'éviter que ne se produise le phénomène d'orniérage. A l'opposé, à basse température, le bitume doit conserver une certaine élasticité pour éviter le phénomène de fissuration par retrait thermique et la fragilisation de l'enrobé. Aux températures intermédiaires, il doit être résistant à la fatigue sous l'effet du trafic répété. Deux essais peuvent être effectués afin de caractériser le bitume destiné à la formulation des enrobés pour les couches de roulement à savoir :

- Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66-004) ;
- Essai de point de ramollissement bille et anneau (NF T66-008).

V.2.4 Différents types des bétons bitumineux

On distingue de nombreux types de « *béton bitumineux* : *BB* », chacun avec ses caractéristiques et les utilisations propres. Le choix du BB dépend du climat de la région qui doit être pris en compte pour le choix du futur revêtement du fait que :

- Le bitume utilisé peut se ramollir si la chaleur est trop forte ;
- Le béton peut durcir par trop basses températures ;
- La pluie ou la neige tassée sont également des critères à prendre en compte, car le BB peut geler et favoriser la formation de verglas.

V.2.4.1 Le béton bitumineux mince « **BBM** »

Il possède une granulométrie de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux est facilement compactable et est parfaitement imperméable. Principalement utilisé pour les parkings ou les trottoirs, son épaisseur varie de 2.5 à 5 cm.

V.2.4.2 Le béton bitumineux très mince « **BBTM** »

C'est sans doute l'enrobé le plus intéressant en termes de rapport qualité-prix. En effet, il dispose d'une très bonne durée de vie ainsi que d'une facilité de mise en oeuvre. Quelle que soit la granulométrie (0/10 ou 0/6), le BBTM dispose d'une épaisseur comprise entre 1.5 et 3 cm.

V.2.4.3 Le béton bitumineux ultra mince « **BBUM** »

Il est destiné aux couches de roulement, c'est-à-dire en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, il est tout indiqué pour un parking par exemple. Son épaisseur varie de 1 à 1.5 cm.

V.2.4.4 Le béton bitumineux souple « **BBS** »

Comme son nom l'indique, ce béton est constitué d'un bitume assez mou pour obtenir un enrobé déformable. Cependant, il possède une faible résistance à l'orniérage.

V.2.4.5 Le béton bitumineux drainant « **BBDr** »

L'avantage principal de ce type de béton bitumineux réside dans son excellente adhérence, aussi bien par temps de pluie ou de forte chaleur. De plus, il réduit le bruit de roulement. Pour une allée de jardin, il est alors parfaitement adapté.

V.2.4.6 Le béton bitumineux semi-grenu « **BBSG** »

Celui-ci est l'enrobé à chaud de référence. En effet, il répond à de nombreux besoins (trottoir, allée...) et est très adapté pour un trafic aussi bien moyen que lourd. Son épaisseur varie de 3 à 9 cm, suivant la granulométrie.

V.2.4.7 Le béton bitumineux à modules élevés « BBME »

Ce béton bitumineux fait partie des enrobés structurants. Il possède une excellente rigidité, une durée de vie importante et une bonne résistance à l'orniérage. Son épaisseur peut varier de 4 à 9 cm par couche.

V.2.5 Compactage des bétons bitumineux

V.2.5.1 Pré-compactage des enrobés bitumineux

Le pré-compactage est réalisé par la vibration verticale du dameur ou de la table encore de la combinaison de ces deux éléments. Avec les finisseurs possédant une table ou un dameur vibrant, on peut atteindre un taux de compacité de 80 à 85% alors qu'avec ceux possédant ces deux éléments, cette valeur est plus élevée (elle dépend de la composition des enrobés et de la vitesse d'avancement). Le dameur vibrant doit être placé sur toute la largeur de la table, légèrement sous le niveau de celle-ci. Une course trop courte du dameur rend celui-ci inefficace, par contre une course trop longue peut provoquer des arrachements en surface.

La fréquence de vibration est à adapter à la composition des enrobés et à l'épaisseur de la couche, si celle-ci est faible, la fréquence doit être limitée. Un pré-compactage élevé et uniforme est important pour la planéité finale. La table doit être bien préchauffée avant l'épandage des enrobés. Ce préchauffage, qui doit être uniforme, est plus long pour les couches de surface. Une surchauffe locale de la table peut créer une déformation de celle-ci, avec pour conséquence des irrégularités de profil.

V.2.5.2 Compactage des enrobés bitumineux à chaud

Il est nécessaire de contrôler la planéité et la pente transversale de la surface derrière la table. La phase de compactage vise à augmenter la densité des couches d'enrobés bitumineux répandues afin d'améliorer leur résistance tout en conservant des caractéristiques superficielles d'uni et d'adhérence requise pour la sécurité et le confort, il donne ainsi au matériau mis en oeuvre des caractéristiques définitive qui seront directement perçues par les usagers. Un bon compactage permet d'assurer :

- Une meilleure résistance au fluage ;
- Une amélioration de la résistance à la fatigue et par conséquent une meilleure durée de vie ;
- Une bonne planéité de la surface ainsi qu'une rugosité adéquate.

Actuellement, le compactage est assuré par un mode statique sur nos chantiers, en utilisant principalement un compacteur pneumatique. Les résultats tirés des planches expérimentales réalisées principalement dans notre contexte algérien, ont incité d'introduire le mode de compactage dynamique (compacteur vibrant). Au titre de cette phase de travaux, il nécessite le développement des quatre points importants suivants :

- Le matériel de compactage et ses caractéristiques ;
- Le domaine d'utilisation des compacteurs ;
- Les actions à mener au titre des paramètres influençant le compactage ;
- Les types d'atelier de compactage.

V.2.5.2 Engins de compactage des enrobés

Le compacteur n'est ni plus ni moins un rouleau compresseur indispensable à la réalisation d'un chantier routier. Son rôle est de tasser et aplanir l'enrobé sur le sol. Généralement le compactage débutera sur les raccords et en bordure de chaussée. Un autre passage tassera et pressera le revêtement. On observe dans la plupart des cas que plus le niveau de compaction n'est bon, meilleures sont les performances. De base, les sols routiers sont composés de matériaux solides tels que les granulats, le sable; des matériaux liquides comme le bitume et l'émulsion et d'air. Le compactage permet donc de stabiliser le sol grâce à un rapprochement et un tassement des matériaux, mais aussi en expulsant l'air. Le compactage se présente donc comme une opération finale et délicate du chantier. C'est une étape à la fois décisive pour la durabilité de la chaussée en conséquence de la compacité obtenue, mais également concernant la qualité en surface concernant l'uni et la texture. Les principaux engins utilisés dans la réalisation des bétons bitumineux (couche de roulement) sont présentés dans la [Figure IV.3](#).



Compacteur pneumatique



Alimenteur du finisseur d'enrobé



Finisseur d'enrobé



Compacteur à cylindre lisse

Figure V.3 – Engins utilisés dans la réalisation des bétons bitumineux.

Les compacteurs sont classés en quatre types à savoir :

- Les « *compacteurs à pneu pour des matériaux à surfacer* » : ils sont généralement assez mobiles (une vitesse allant de 3 à 6Km/h), et souvent choisis pour des sols sableux ou argileux, s'il peut à peu près tout faire : terrassement, chaussée, enrobé ;
- Les « *compacteurs statiques à pied dameurs* » : ils sont utilisés surtout pour les gros terrassements (une vitesse allant de 6 à 12Km/h) ;
- Les « *compacteurs statiques à cylindres lisses* » : ils sont réservés pour le compactage d'enrobé inférieur à 4cm donc très fin ;

- Les « compacteurs vibrants à cylindres lisses ou pieds dameurs » : ils peuvent servir pour la majorité des utilisations et notamment lors de la pose d'enrobés ou de matériaux flottants ou à forte épaisseur (une vitesse allant de 3 à 12Km/h).

Le matériau répandu est amené à un pourcentage de vide permettant d'obtenir les performances souhaitées en utilisant l'un des modes de compactage suivant ou la combinaison de certains d'entre eux.

- Le « compactage par compression » défini par l'effet de la pression de contact de la roue avec le matériau en surface ;
- Le « compactage par pétrissage » défini par l'effet de la charge de la roue dans la partie inférieure de la couche ;

Le « compactage par vibration » défini par l'effet de vibration du cylindre en assurant le compactage par réarrangement des grains.

V.3 Méthodes de formulation des bétons bitumineux

A ce jour, aucune méthode universelle s'affranchissant totalement de l'empirisme n'ait été mise au point ce qui a conduit les chercheurs à développer plusieurs méthodes de formulation d'où d'énormes progrès ont déjà été réalisés dans ce cadre.

V.3.1 Objectif principal de la formulation

L'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de « granulates », de « liants » et de « vides » qui permette d'atteindre les « performances » suivantes à savoir :

- Le module complexe E^* ;
- La résistance à la fatigue mécanique ;
- La résistance aux déformations permanentes ;
- La résistance aux sollicitations thermiques ;
- La résistance aux fissurations de retrait hydraulique.

D'autres performances non mécaniques doivent être considérées afin de caractériser les performances des chaussées, ce sont :

- L'adhérence ;
- La résistance à l'arrachement ;
- Le vieillissement ;
- La susceptibilité hydraulique.

V.3.2 Méthode Hveem

Les grands concepts derrière cette méthode ont été énoncés par « Francis N. Hveem » qui est un ingénieur de la « Californian Department of Transportation ; CDT », dans les années 1930. Cette méthode a par la suite subi diverses améliorations pour devenir la méthode officielle de la CDT ([Asphalt Institute 1997](#)). La procédure de formulation peut se définir en plusieurs étapes :

V.3.2.1 Le choix des matériaux

Ce choix doit être en accord avec le cahier des charges du projet. Les matériaux doivent satisfaire les propriétés physico-chimiques fixées dans celui-ci.

V.3.2.2 Le choix de la courbe granulométrique

La combinaison des différentes tailles d'agrégats doit permettre d'obtenir une courbe granulométrique aussi proche que possible de la courbe de référence fixée dans le cahier des charges.

V.3.2.3 La détermination de la teneur en liant approximative

Cette estimation découle de deux essais propres à cette méthode : le « *Centrifuge Kerosene Equivalent ; CKE* » et le « *Surface Capacity* ». En fonction de ces tests et de la densité réelle des fines et des pierres on peut, à travers des abaques spécifiques, obtenir une estimation de la « *teneur en liant optimale* ».

V.3.2.4 La préparation des échantillons

Les échantillons sont fabriqués selon une procédure et dans des moules normalisés. Le compactage se fait grâce à un compacteur mécanique avec une méthodologie qui est aussi normalisée. On devrait préparer un échantillon à la teneur en liant obtenue précédemment, deux avec des teneurs en liant inférieures « *-0.5% et -1.0%* » et un avec une teneur en liant supérieure « *+0.5%* ».

V.3.2.5 Test de stabilité et de ressuage

Une fois compactés les échantillons sont soumis à ces deux tests. L'appareillage du « *test de stabilité* » est propre à la « *méthode Hveem* » ; des valeurs de stabilité minimales sont fixées en fonction du trafic. Le « *test de ressuage* » est plutôt qualitatif.

V.3.2.6 Le choix de la teneur en liant optimale

La teneur en liant optimale est la teneur en liant maximale dont l'échantillon satisfait les conditions de stabilité minimale, ne présente pas un ressuage important et la teneur en liant est au moins égale à 4%. Si cette valeur est celle de la teneur en liant maximale préparée (estimation +0.5%) alors il faut préparer un échantillon supplémentaire avec une teneur en liant supérieure de +0.5% et refaire la procédure.

V.3.3 Méthode Marshall « Marshall Mix Design »

Les premiers concepts de cette méthode furent développés par Bruce Marshall vers la fin des années 1930, puis révisés et améliorés par la « *U.S. Army* ». Cette méthode, recommandée par les normes VSS en Suisse, vise à choisir la teneur en liant, pour une certaine densité du mélange, qui satisfait une stabilité minimale et un fluage évoluant dans un intervalle d'acceptation ([Asphalt Institute 1997](#)). La procédure de formulation peut se résumer en six étapes distinctes :

V.3.3.1 Le choix des agrégats

Les agrégats sont choisis selon leurs caractéristiques physiques (dureté, propreté, forme,...). Une fois ce choix effectué on détermine leur granulométrie et leur densité puis on choisit les différents agrégats nécessaires à l'obtention de la courbe granulométrique de référence.

V.3.3.2 Le choix du liant

Cette méthode ne possédant pas une procédure de sélection et d'évaluation normalisée, le choix est laissé à l'ingénieur qui devra réaliser les essais qu'il juge nécessaires.

V.3.3.3 La préparation des échantillons

Les échantillons sont fabriqués dans des moules normalisés. Typiquement on prépare cinq « 5 » mélanges avec des teneurs en liant différentes, et, pour chaque mélange, trois échantillons. Les échantillons sont ensuite compactés à l'aide d'un marteau aux dimensions normalisées et selon des règles bien précises.

V.3.3.4 Détermination de la stabilité et du fluage

Une fois compactés les échantillons sont soumis à un essai de stabilité et fluage. La stabilité est la force maximale que peut supporter l'échantillon et le fluage est la déformation plastique qui s'ensuit. Ces deux valeurs sont en quelque sorte des mesures permettant de prévoir la performance de l'enrobé.

V.3.3.5 Calcul de la densité et des vides

La densité et les vides (vides du mélange, vides du squelette minéral, vides remplis par le bitume) permettent de caractériser le mélange.

V.3.3.6 Choix de la teneur en liant optimale

Ce choix dépend de la combinaison des résultats de stabilité et fluage, des vides et de la densité. Ainsi six « 6 » graphes représentant l'évolution du pourcentage de vides, de la densité, du fluage, de la stabilité, des vides du squelette minéral « VMA » et des vides remplis par le bitume « VFA » en fonction de la teneur en liant sont tracés. Le choix du pourcentage de vides du mélange permet d'une part d'obtenir la teneur en liant optimale et d'autre part de vérifier si cette teneur en liant satisfait les exigences sur les autres paramètres. Ces deux actions se font graphiquement à l'aide des courbes issues des essais sur les échantillons.

V.3.4 Méthode Américaine SUPERPAVE « SUPERPAVE Mix Design »

Cette méthode de formulation a été développée aux Etats-Unis pour remplacer la méthode Marshall. Elle connaît une grande application dans le domaine. Ainsi en 2000, 62% de la production totale en tonnes de revêtement bitumineux s'est faite par l'utilisation de cette méthode. Dans le cadre du programme de recherche « *Strategic Highway Research Program : SHRP* » dont les objectifs étaient d'améliorer le choix des matériaux et la formulation d'enrobés bitumineux, une nouvelle méthode de

formulation a été mise au point au début des années 90 : la méthode SUPERPAVE « *Superior Performing Asphalt Pavement* » (WTFTCR 2001). La méthode de formulation « SUPERPAVE » est basée sur le concept de maniabilité lors de la pose ainsi que de la performance de l'enrobé dans le temps. Elle peut se diviser en quatre étapes (Asphalt Institute 2001) :

V.3.4.1 Le choix des agrégats

Ce choix suit trois critères différents. La courbe granulométrique qui doit être comprise entre deux limites et doit passer par des points fixes. Les spécifications caractéristiques des agrégats « *consensus properties* » : angularité, forme et équivalent en sable. Les critères spécifiques à la source des agrégats « *source properties* » : dureté, bruit et propreté.

V.3.4.2 Le choix du liant

Ce choix dépend, outre des caractéristiques physiques du liant (pénétration, viscosité, etc.), des conditions climatiques et du type de trafic. Il existe une graduation des liants « *performance grading (PG) system* » qui est fonction de la température maximale et minimale de la chaussée et des conditions de trafic. La détermination de ces trois paramètres associée avec une fiabilité minimale du résultat « *reliability design* » permet de définir le *grade* minimal du liant à utiliser.

V.3.4.3 Choix de la teneur en liant optimale

Des échantillons sont fabriqués avec quatre teneurs en liant différentes (variation de $\pm 0.5\%$) et soumis au compactage dans la *Superpave* « *Gyratory Compactor : PCG* » ou « *presse à cisaillement giratoire* ». On trace le graphique densité théorique maximal de l'enrobé en fonction du nombre de girations pour les quatre échantillons. Ensuite on détermine graphiquement la teneur en liant qui satisfait le pourcentage de vides voulu et le nombre de girations nécessaires pour l'obtenir. Le nombre de girations est défini par les conditions de trafic.

V.3.4.4 Essais de performances

Cette dernière étape, encore en développement, normalisera les essais à faire pour déterminer les caractéristiques mécaniques des mélanges, à savoir le « *module dynamique* », le « *flow time* » et le « *flow number* » (Bonaquist et al. 2003).

V.3.5 Méthode Française

Cette méthode (utilisée en Algérie) repose sur deux grands axes. Le premier est la détermination de la quantité minimale de liant en fonction de la granulométrie du mélange. Le deuxième est l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire pour estimer le comportement lors du compactage du mélange.

V.3.5.1 Quantité minimale de liant bitumineux

Dans l'approche qui s'est codifiée en France dans les années cinquante, pour une composition granulométrique donnée, on définit une quantité de liant bitumineux minimale pour assurer une bonne durabilité du mélange par la notion de « *module de richesse : K* » ($2 \leq k \leq 2.6$ pour les GB et $3.3 \leq k$

≤3.9 pour les BB). Cette grandeur, qui est proportionnelle à une épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats, est donnée par l'expression suivante qui relie le « K » à la teneur en liant « TL » et à la « surface spécifique conventionnelle des granulats : Σ » (Eq. V.1) :

$$TL = K * \alpha \sqrt[5]{\Sigma} \quad (\%) \quad (\text{Eq. V.1})$$

Où :

α : Coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats calculé à l'aide de l'expression ci-dessous (MVR_g est la masse volumique réelle des granulats) (Eq. V.2) :

$$\alpha = \frac{2.65}{MVR_g} \quad (-) \quad (\text{Eq. V.2})$$

Σ : La surface spécifique conventionnelle calculée à l'aide de l'expression (Eq. V.3):

$$100\Sigma = 0.25G + 2.3S + 13s + 135f \quad (-) \quad (\text{Eq. V.3})$$

Avec les proportions massiques :

G : des éléments supérieurs à 6.3 mm ;

S : des éléments compris entre 6.3 mm et 0.315 mm ;

s : des éléments compris entre 0.315 mm et 0.08 mm ;

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm.

V.3.5.2 Essai à la presse à cisaillement giratoire

Une composition du mélange étant choisie par référence à l'expérience antérieure, son comportement lors du compactage est estimé à l'aide de l'essai à la « presse à cisaillement giratoire ». Une quantité prédéterminée du mélange hydrocarboné, portée à la température usuelle de fabrication de l'enrobé en centrale, est placée dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. Le compactage est obtenu par l'action concomitante :

- D'une force de compression statique assez faible correspondant à une pression de 0.6MPa ;
- D'une déformation de l'éprouvette à laquelle on impose que son axe longitudinal décrive une surface conique de révolution, de sommet « O » et d'angle au sommet « 2α », pendant que les surfaces d'extrémité de l'éprouvette restent sensiblement horizontales. L'angle « α » est d'environ « 1° ». Il est déterminé pour chaque type de machine de façon à obtenir des pourcentages de vides fixés sur des matériaux pris comme référence. La vitesse de rotation a peu d'influence sur le résultat, elle est prise couramment égale à « 30 tours/min ».

L'interprétation de l'essai du point de vue de l'appréciation du comportement lors du compactage du mélange est faite en considérant les valeurs de pourcentages de vides obtenues en général après « 10 girations » et après un « nombre de girations : Ng » de [25, 40, 60, 80, 100, 120 ou 200] qui dépend du type d'enrobé étudié. Après « 10 girations », il est en général spécifié une valeur minimale du pourcentage de vide (de l'ordre de « 14% » pour des matériaux en couche de base) afin d'éviter d'avoir un mélange trop maniable qui s'avèrerait difficile à compacter sans déformations excessives et conduirait à un matériau qui se révélerait aussi instable sous le trafic. Après « Ng girations », il est

spécifié cette fois une fourchette de valeurs pour le pourcentage de vides (pour des bétons bitumineux courants utilisés en couche de surface, les pourcentages de vides doivent être compris entre 5% et 10%. Pour des enrobés destinés à des couches de base, seule la valeur maximale est spécifiée, elle peut atteindre 11%). La valeur maximale est destinée à assurer la durabilité du mélange, la valeur minimale vise à éviter une compacité excessive qui favoriserait l'instabilité du mélange et le développement de l'orniérage par fluage sous trafic, ainsi qu'à assurer le maintien d'une macro - texture suffisante pour les couches de roulement.

V.3.6 Méthode Belge « Formulation CRR »

Le « Centre de Recherche Routière : CRR » belge a également développé une méthode de formulation pour les enrobés bitumineux. Celle-ci se caractérise par le fait qu'elle est analytique; l'utilisation d'un essai en laboratoire n'est justifiée que comme moyen de vérification des valeurs déterminées par la formulation volumique. La procédure de formulation est identifiée dans la Figure V.4 et peut se résumer en trois phases à savoir (CRR 1987, 1997) :

V.3.6.1 Choix et caractérisation des matériaux

Comme pour les autres méthodes, le choix des composants du mélange est d'une grande importance pour le résultat et les performances de l'enrobé. Il est important de connaître les caractéristiques physiques des agrégats (granulométrie, dureté, propreté, etc.) et du liant (pénétration, susceptibilité thermique, etc.).

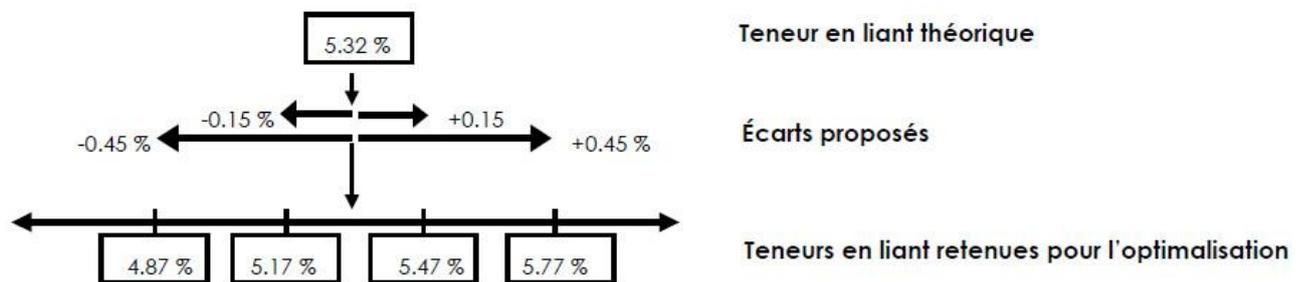


Figure V.4 – Exemple de choix des teneurs en liant en vue de l'optimisation par la compacité.

V.3.6.2 Formulation à base d'une méthode analytique

La composition d'un mélange doit en premier lieu être conçue sur la base d'une méthode analytique prenant en compte les paramètres importants. Cette phase est intégrée dans le « logiciel spécifique PRADO ».

V.3.6.3 Vérification des résultats de la formulation

L'utilisation d'un essai de laboratoire permet de vérifier les résultats de la formulation analytique et, le cas échéant, de corriger les éventuels écarts en agissant soit sur la composition soit sur les matériaux. Ce n'est que lorsque l'essai est en accord avec les résultats que l'on peut passer à l'étape finale qui sont le passage d'une formulation volumique à une formulation massique, grâce aux masses volumiques des composants, et le calcul des caractéristiques mécaniques de l'enrobé ainsi obtenu.

V.3.7 Méthode de formulation utilisée en Algérie

La « *formulation en Algérie* » est basée sur la « *vérification des caractéristiques des composants* » ainsi que sur les deux essais « *Duriez* » et « *Marshall* » en fonction des matériaux granulaires. On choisit une formule qui donne un mélange ayant la meilleure « *aptitude au compactage* » et qui pourrait donner une meilleure « *stabilité au mélange hydrocarboné* ». Les fractions granulaires sont choisies parmi les suivantes : « *0/3, 3/8, 8/15* », les caractéristiques des granulats sont représentés comme suit (Tableau V.1) :

Tableau V.1 – Fractions granulaires « 0/14 » des bétons bitumineux « BB-0/14 ».

Passants au tamis (mm)	BB-0/14
20	-
14	94-100
10	72-84
6.3	50-66
2	28-40
0.08	7-10

Par définition, la teneur en bitume est la masse du liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, et pour cela on utilise la formule « Eq. V.1 » décrite dans le « *paragraphe V.3.5* ». La « *compacité : C* » est une conséquence directe de la formulation, pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette « γ_{app} », la densité du bitume « γ_b », la densité de chacun des agrégats « $\gamma_{G1}, \gamma_{G2}, \dots etc.$ », les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100 (liant et filler compris). Donc la densité réelle « γ_{rel} » du matériau enrobé est calculée comme suit (Eq. V.4) :

$$\gamma_{rel} = \frac{100}{(P_b/\gamma_b) + (P_{G1}/\gamma_{G1}) + (P_{G2}/\gamma_{G2}) + \dots} \quad (\text{kN/m}^3) \quad (\text{Eq. V.4})$$

Où :

γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette ;

γ_b : la densité du bitume ;

$\gamma_{G1}, \gamma_{G2}, \gamma_{G3} \dots etc.$: les densités des agrégats 1, 2, 3, ... etc. ;

P_b : le pourcentage en poids du bitume ;

$P_{G1}, P_{G2}, P_{G3} \dots etc.$: les pourcentages en poids des agrégats.

Le pourcentage volumétrique des vides « V_V » de l'éprouvette est déterminé par la formule décrite ci-dessous (Eq. V.5) :

$$V_V = \frac{(\gamma_{rel} - \gamma_{app})}{\gamma_{rel}} * 100 \quad (\%) \quad (\text{Eq. V.5})$$

La compacité « C » de l'enrobé est déterminée par la formule suivante (Eq. V.6) :

$$C = 100 - V_V \quad (\%) \quad (\text{Eq. V.6})$$

V.3.8 Paramètres influençant le choix d'une formulation

Les principaux caractères consistent à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour la fabrication de l'enrobé. Ceci sur la base des considérations suivantes :

- Trafic ; volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu ;
- Climat : pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement ;
- Position de la couche : roulement, base, fondation liée ;
- Fonction de la couche : adhérence, perméabilité, bruit, orniérage, etc.

V.4 Etapes et procédure de formulation des « BB »

V.4.1 Etapes de formulation des « BB »

Les différentes étapes de formulation des bétons bitumineux peuvent se résumer dans le schéma ci-dessous (Figure V.5) :

Remarque :

Les caractéristiques des agrégats intervenant dans la formulation des enrobés doivent être déterminées par les essais ci-dessous à savoir :

- Masse volumique (NF P18-560) ;
- Analyse chimiques sommaires (NF 15-461) ;
- Analyse granulométrique (NF P18-560) ;
- Equivalent de sable à 10% de fine (NF P18-597) ;
- Propreté superficielle (NF P18-591) ;
- Essais d'aplatissement (NF P18-561) ;
- Essai Los Angeles (NF P18-573) ;
- Essai Micro-Deval en présence d'eau (MDE) (NF P18-572).

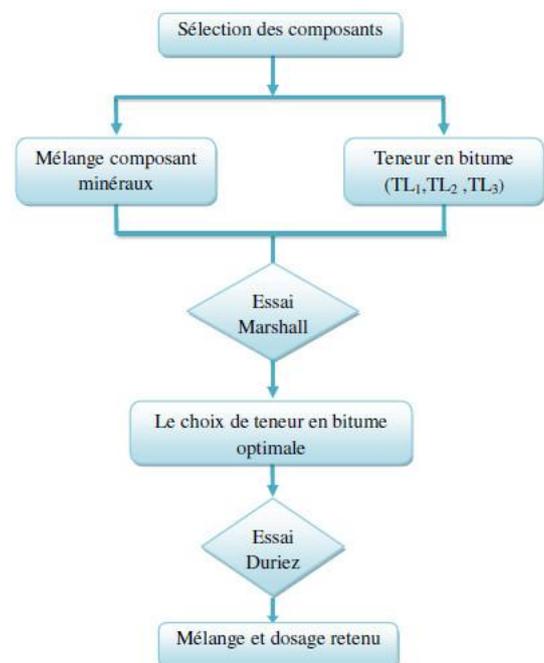


Figure V.5 – Etapes de formulation.

V.4.2 Equipements et procédures d'essais

V.4.2.1 Essai Marshall

Le concept de l'essai Marshall était développé par « Bruce Marshall » en 1948 au Mississippi State Highway Department, USA. Cet essai permet de mesurer en laboratoire, avec une température et une énergie de compactage données, la résistance d'une éprouvette à la déformation sous l'application graduelle d'une charge et la déformation subie par cette éprouvette au moment de sa rupture sous l'application de la charge maximale dite « stabilité » et « fluage Marshall ». Ces derniers facteurs permettent de donner des indications sur la qualité globale de l'enrobé dont le choix et le dosage des constituants pour obtenir une meilleure composition ou une formulation à adopter pour un enrobé (La stabilité présente un maximum pour une certaine teneur en bitume, puis elle décroît).

V.4.2.1.1 Principe de l'essai

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée (Figure V.6). Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 30 mn d'immersion dans un bain d'eau à 60°C, et à la vitesse de 0.85mm/s \pm 0.1mm/s.

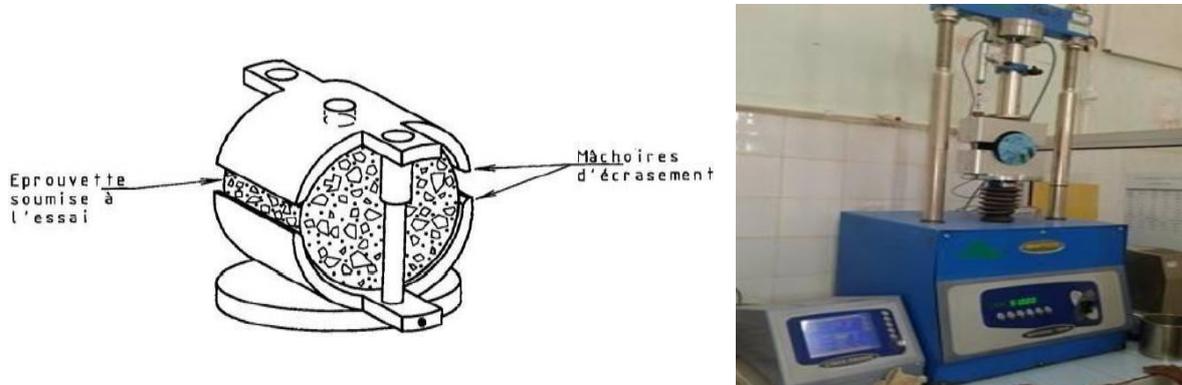


Figure V.6 – Machine de l'essai Marshall.

V.4.2.1.2 Déroulement de l'essai

Après confection des éprouvettes, une partie sera réservée pour déterminer la densité apparente et l'autre sera réservée pour déterminer la stabilité et le fluage. On immerge les éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à 60°C \pm 0.5 °C avec les mâchoires d'écrasement pour une durée de 30 mn (\pm 1mn). Pendant ce temps, on installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse 0.85 mm/s \pm 0.1mm/s. L'éprouvette est placée dans les mâchoires d'écrasement, l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute. La rupture se produit au moment de l'arrêt de l'appareil puis on note les chiffres qu'indiquent l'écran de l'appareil « stabilité » et « fluage » (NF P98-251-2). Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées.

V.4.2.1.3 Expression des résultats

Cet essai permet d'obtenir d'une part la contrainte à la rupture ; elle est donnée par l'équation suivante (Eq. V.7) :

$$\sigma_{\text{rupture}} = \frac{2P}{\pi h D} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (\text{Eq. V.7})$$

Où :

P : charge de rupture (N)

h : hauteur de l'éprouvette (mm)

D : diamètre de l'éprouvette (mm)

On calcule également la déformation à la rupture au cours de l'essai à 45°C (Eq. V.8) :

$$\varepsilon_{\text{rupture}}(45^\circ\text{C}) = \frac{\Delta D}{D} \quad (-) \quad (\text{Eq. V.8})$$

Où :

ΔD = déformation verticale

D = diamètre de l'éprouvette

V.4.2.2 Essai Duriez

L'essai « Duriez » ou essai de « *compression-immersion* » ayant pour but de caractériser les qualités de résistance à la compression et résistance au désenrobage par l'eau des matériaux enrobés. Effectivement cet essai permet de déterminer à 18°C pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à partir du rapport de résistance à la compression avant et après immersion des éprouvettes. L'essai « Duriez » est réalisé sur les éprouvettes qui donnent des meilleures « *stabilités Marshall* » correspondant aux teneurs en « *bitumes optimales* ».

V.4.2.2.1 Principe de l'essai

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet. Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18 °C dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres durant 7 jours. La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avant ou après immersion (Figure V.7).



Figure V.7 – Machine de l'essai Duriez avec l'exemple d'une éprouvette confectionnée.

V.4.2.2.2 Déroulement de l'essai

J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jour « J +1 ». Les éprouvettes sont conservées à 18°C ± 1°C et dans une ambiance à 50 % ± 10% d'humidité relative pendant 7 j. À jour « J +8 », les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion. Pour chaque éprouvette, le délai entre la sortie du dispositif de maintien en température et le début de l'écrasement est inférieur à 2 min. La vitesse du plateau de la presse est réglée à 1 mm ± 0.1 mm. La « *résistance à la compression simple* » est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai exprimée en « Kg », en divisant sur 50, on a la « *résistance à la compression* » exprimée en « Kg/cm² » qu'on s'appelle « *stabilité Duriez* » (NF P98-251-1). Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées.

V.4.3 Confection des éprouvettes pour les essais « Marshall » et « Duriez »

La bonne confection des éprouvettes est une étape primordiale. En effet, les éprouvettes des bétons bitumineux sont confectionnées suivant le type d'essai soit « *Marshall* » ou « *Duriez* ».

V.4.3.1 Préparation des mélanges

La préparation de mélange de béton bitumineux au niveau du laboratoire peut se réaliser conformément à la norme [NFP 98-250-1](#) soit pour l'essai « *Marshall* » ou pour l'essai « *Duriez* ».

V.4.3.1.1 Préparation des agrégats

Chacun des types des agrégats entrant dans la composition du mélange hydrocarboné doit être prélevé selon la norme [NF P18-553](#) « *préparation d'un échantillon pour essai* ». Les différents agrégats sont chauffés dans des récipients dans une étuve à 160°C de température.

V.4.3.1.2 Préparation du liant

Une quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevée sans dépasser 100°C. Le liant prélevé est placé dans un récipient remplis et fermé. La mise en température du liant est effectuée en deux phases :

- Le récipient rempli et fermé, placé en étuve, est porté à la température de référence (généralement entre 140°C et 180°C) ;
- Le récipient est placé sur une plaque chauffante et son contenu est agité constamment pour homogénéiser sa température, et le maintenir à sa température de référence. Cette opération ne doit pas se prolonger plus de 10mn.
- La température de référence de préparation des mélanges est définie suivant la catégorie du liant hydrocarboné utilisée comme suit ([NFP 98-250-1](#)): Bitume 80/100 : 140°C ± 5°C, Bitume 60/70 : 150°C ± 5°C, Bitume 40/50 : 160°C ± 5°C et Bitume 20/30 : 180°C ± 5°C.

V.4.3.1.3 Malaxage

La cuve contenant les agrégats à mélanger est installée sur le malaxeur en essayant de limiter au maximum les déperditions de température. Le malaxeur est actionné pendant 30s ± 5s afin de bien homogénéiser les sables. Si une fois le liant est versé, la masse du liant ne doit pas dépasser plus de 1% en valeur relative à la masse du liant théorique sinon la gâchée est rejetée. La durée de malaxage doit conduire à un mélange visuellement homogène donc la durée totale du malaxage est comprise entre 2 et 3 mn. Après la fin de malaxage, le mélange doit être utilisé immédiatement avant le refroidissement sinon la gâchée est rejetée. La masse du bitume se calcule à partir de la masse des agrégats comme l'indique la formule suivante (Eq. V.9) :

$$ML = \frac{(MA * TL)}{100} \quad (g) \quad (Eq. V.9)$$

Où

ML : la masse du bitume (du liant) utilisé (g) ;

MA : la masse du mélange des agrégats utilisés (g) ;

TL : la teneur en bitume (en liant) utilisé dans un mélange (%).

V.4.3.2 Confection des éprouvettes pour l'essai « Marshall »

V.4.3.2.1 Remplissage des moules et compactage

On pèse une quantité m égale 1200g de mélange à 0.1% près en valeur relative. Après avoir placé un disque de papier en fond de moule, les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2h au minimum, et on met en place la hausse puis on introduit le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycéro (Figure V.8).



Figure V.8 – Remplissage du moule et compactage.

Ensuite, on place le deuxième disque de papier sur le mélange. On met les moules dans l'appareil et on le compacte avec 50 coups pendant $55 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$. On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse et on répète à nouveau le damage. Le nombre total des coups est de 100 coups. Le moule est conservé 5h au moins à température ambiante (15 à 25°C) après leur compactage.

V.4.3.2.2 Démoulage

Après refroidissement les moules et pour les démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse en s'aidant du piston extracteur et de la presse comme la (Figure V.9) explique cette démarche. La confection des autres éprouvettes se fait en suivant les mêmes étapes précédentes.

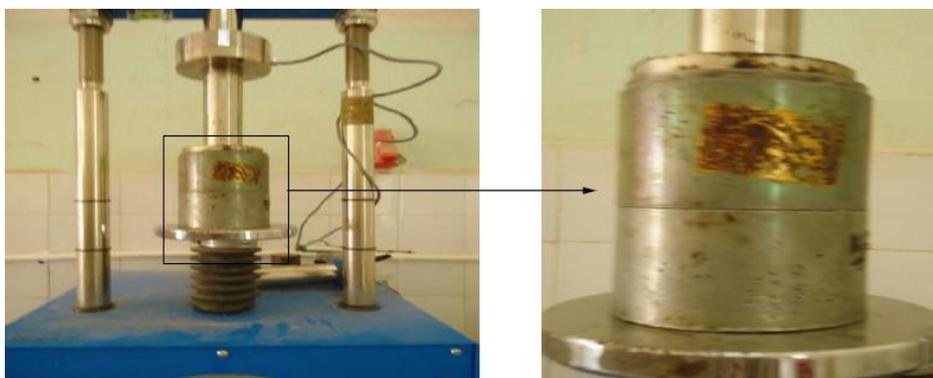


Figure V.9 – Opération de démoulage.

Quand les éprouvettes sont prêtes, on commence le déroulement de l'essai Marshall qui on détermine de celui-ci les paramètres suivants :

- La densité apparente de l'éprouvette et la densité théorique (absolu) de l'éprouvette ;
- Compacité de l'éprouvette ;
- % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette ; % des vides occupé par l'air et le bitume (vide de l'agrégat) et % des vides comblés par le bitume ;
- Déformation ou fluage Marshall en « mm » et stabilité Marshall en « Kg ».

V.4.3.2.1 Eprouvette après confection

Comme dans les autres méthodes d'analyse, l'éprouvette Marshall est déterminée par confection d'une éprouvette cylindrique (Figure V.10), d'une masse indicative de 1200g, de 105 mm de diamètre et de 63.5 mm de hauteur théorique.



Figure V.10 – Eprouvette après confection pour soumettre l'essai Marshall.

V.4.3.3 Confection des éprouvettes pour l'essai « Duriez »

V.4.3.3.1 Remplissage des moules et compactage

Un piston est placé à la partie inférieure du moule. On introduit le mélange en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycéricé (les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2 h au minimum) avant l'opération (Figure V.11).

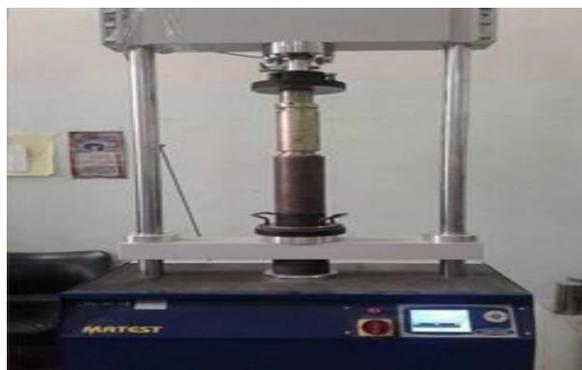


Figure V.11 – Remplissage du moule et compactage.

Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température à proximité à la température de référence, ils doivent y séjourner entre 30 mn et 2 h. On ajuste le cylindre plein et on porte le tout entre les plateaux de la presse.

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). On maintient la pression cinq minutes sachant que la charge appliquée est de l'ordre $60 \text{ kN} \pm 0.5\%$. Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4 h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées.

V.4.3.3.2 Démoulage

Le démoulage se fera à l'aide de la presse. Les éprouvettes extraites sont réparties en deux lots, les éprouvettes de premier lot (sont au nombre de 2) sont destinées pour déterminer la densité apparente et les éprouvettes de deuxième lot sont destinées pour l'essai de résistance à la compression.

Les éprouvettes de deuxième lot sont réparties comme suit : deux éprouvettes se font sans immersion et les deux autres se font avec immersion le tout sont placées dans une armoire spéciale à $18^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ pendant 7 jours. Les paramètres issus de cet essai sont :

- La densité apparente de l'éprouvette ;
- La densité vraie ou théorique (absolue) de l'éprouvette ;
- Compacité de l'éprouvette ;
- % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette ;
- % des vides comblés par le bitume ;
- La résistance à la compression « r » après immersion 7 jours à 18°C en Kg/cm^2 ;
- La résistance à la compression « R » avant immersion à 18°C en Kg/cm^2 ;
- Le rapport « r/R » ;
- Le pourcentage d'imbibition « W ».

V.4.3.3.1 Eprouvette après confection

L'éprouvette de « Duriez » est déterminée par confection d'une éprouvette cylindrique (Figure V.12), d'une masse indicative de 1000 g, de 80 mm de diamètre et de 190 mm de hauteur.



Figure V.12 – Eprouvette après confection pour soumettre l'essai Duriez.

V.5 Essais de vérification de performances des enrobés formulés

Pour la caractérisation de performances des enrobés formulés, il existe plusieurs types d'essais à savoir :

V.5.1 Essai d'orniérage

L'essai à l'orniéreur sert à l'étude des enrobés pour chaussées à trafic intense et très élevé. Il permet d'apprécier la résistance à l'orniérage des couches de roulement et des couches de base destinées notamment aux types de trafic précités, et cela dans des conditions de nature comparable à celle rencontrées sur les chaussées. L'essai est caractérisé par la détermination de la profondeur d'ornière provoquée par le passage répété d'un pneumatique sur une plaque d'enrobé à 60°C pour les couche de surface et à 50°C pour les couches de base.

L'orniéreur « LPC » du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en France est utilisé avec succès depuis plus de 20 ans pour prévenir les risques d'orniérage des chaussées, notamment en France, en Belgique et en Suisse (LAVOC). Il est aussi utilisé par les Laboratoires en Algérie.

L'orniéreur « LPC » est un instrument de laboratoire qui permet de tester :

- La susceptibilité à l'orniérage des enrobés bitumineux ;
- La tenue aux sollicitations tangentielles des couches de roulement bitumineuses, en particulier les enduits superficiels et les revêtements minces.

L'éprouvette, de forme parallélépipédique, est confectionnée sur une table de compactage « LPC » ou prélevée dans une chaussée. L'orniéreur, équipé de 2 berceaux indépendants, permet de tester 2 éprouvettes en parallèle avec des paramètres identiques ou non. La surface de chacune des éprouvettes est soumise aux sollicitations d'une roue montée sur un chariot animé d'un mouvement alternatif sinusoïdal. La charge est appliquée par un vérin qui agit sur le berceau support de chacune des éprouvettes. Un effet de cisaillement latéral peut être introduit par la modification de l'angle de la roue par rapport au sens de roulement. Le simulateur est caréné et calorifugé. Il permet donc de réaliser les essais à une température régulée et constante. Les caractéristiques principales de l'orniéreur « LCP » sont les suivantes :



Figure V.13 – Orniéreur « LCP ».

- Dimensions des plaques: $L * B * H = 500 * 180 * \text{max. } 140 \text{ mm}$;
- Charge exercée par le vérin : max. 5 kN ;
- Pression du pneu : 0,100 à 0,700 MPa ;
- Fréquence : 7200 passages/heure ;
- Essai réalisé simultanément sur 2 plaques, temps d'essai pour une formule : 5 jours.

Le résultat de l'essai est la profondeur d'ornière ou déformation en pourcentage de la hauteur initiale de l'éprouvette $P_i\%$. La déformation admissible « $P_i\%$ » est nettement inférieure à 10%.

V.5.2 Essai de fatigue

Cet essai consiste à solliciter en flexion au travers de son bord libre une éprouvette trapézoïdale d'enrobé encastré à sa base. Cette sollicitation se fait en déplacement imposé. C'est-à-dire qu'on impose un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante à l'extrémité de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque l'effort nécessaire pour obtenir la déformation est égal à la moitié de l'effort initial.

L'essai de fatigue en flexion à deux points consiste à solliciter en flexion une éprouvette trapézoïdale isocèle encastrée à leur grande base. Cette sollicitation peut se faire de deux manières :

- En déplacement imposé : on impose un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante à l'extrémité de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque l'effort nécessaire pour obtenir la déformation est égal à la moitié de l'effort initial ;
- En force imposée : on impose une force sinusoïdale d'amplitude constante à l'extrémité de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque le module de rigidité vaut la moitié de celui initial.

A une température, l'essai est répété à plusieurs niveaux de déformation, ce qui permet d'établir la courbe de fatigue « $N=f(\varepsilon)$ », « N » étant le nombre de chargements provoquant la rupture et « ε » étant la déformation sur une fibre externe de l'éprouvette ($h = 250$, $B = 56$, $b = 25$, $e = 25$ mm). Il est à noter que la fréquence d'excitation est de 10 à 40 Hz et l'amplitude de déplacement en tête d'éprouvette est de 0 à 1.4mm.

V.5.3 Essai de module complexe

Cet essai caractérise le comportement viscoélastique des enrobés en fonction de la fréquence et de la température. L'essai de module est effectué sur une éprouvette d'enrobé de forme trapézoïdale encastré à sa base et sur l'extrémité libre, on impose un déplacement sinusoïdale très faible d'amplitude constante créant une mise en flexion du corps d'épreuve en simulant l'effet du trafic. A partir de la force résultante, on calcule le module dans une gamme de température allant de « -10 à 40°C », et pour chaque température, quatre niveaux de fréquence qui sont : « 1, 3, 10 et 30 Hz ».

V.6 Conclusion

Ce dernier chapitre a permis d'exposer dans leur plus grande majorité les différents types de bitume et bétons bitumineux, les différentes méthodes de formulation et ainsi les principaux essais d'identification sur les matériaux utilisés dans la formulation des bétons bitumineux et ainsi que les différents essais de vérification de performances des enrobés formulés.