



Laboratoire d'Expértises, d'Etudes et d'Essais

مختبر الخبرات والدراسات والتجارب

*Manuel technique
de
l'Ingénieur Routier*

Les Enrobés A Chaud



Service des routes

Document établi par

Abdelaziz BOUMADIANE

Ingénieur Expert Routier

Sommaire

Partie I

I. GRANULATS :	6
I.1. ORIGINE ET MOYENS D'ELABORATION:	6
I.2. CARACTERISTIQUES ET SPECIFICATIONS :	7
I.2.1. Dureté :	7
I.2.2. Forme :	8
I.2.3. Propreté :	8
I.2.4. Granularité :	10
I.2.5. Angularité :	10
I.3. ESSAIS DE LABORATOIRE :	11
I.3.1. Essais d'information :	11
I.3.2. Essais d'agrément :	11
I.3.3. Les essais de recette :	16
II. LIANTS HYDROCARBONES :	18
II.1. ORIGINES ET FABRICATION DES BITUMES ROUTIERS :	18
II.1.1. Classification des bitumes :	18
II.1.2. Fabrication des bitumes :	19
II.1.3. Structure des bitumes :	20
II.2. CARACTERISTIQUES ET SPECIFICATIONS :	21
II.3. TRANSPORT ET STOCKAGE :	22
II.4. ESSAIS D'AGREMENT ET DE RECETTE :	22

Partie II

I. Objectif de l'étude de formulation :	24
II. Performances et spécifications :	24
II.1. GRANULARITE :	24
II.2. TYPE DE BITUMES UTILISES :	25
II.3. PERFORMANCES MECANQUES :	25
III. Choix des constituants :	26
III.1. GRANULATS :	26
III.2. LIANT HYDROCARBONE :	26
III.3. DOPES :	26
III.4. FILLERS D'APPORT :	26

IV. Composition théorique d'un béton bitumineux :	27
IV.1. DETERMINATION DU MELANGE MINERAL :	27
IV.2. DETERMINATION DU DOSAGE EN LIANT :	30
<i>Désignation</i>	48

Partie III

I. FONCTION D'UNE CENTRALE D'ENROBAGE :	41
II. TYPES DE CENTRALES D'ENROBAGE :	41
II.1. CENTRALES DISCONTINUES :	41
II.2. CENTRALES CONTINUES :	41
II.3. CENTRALES TAMBOUR SECHEUR ENROBEUR (TSE) :	42
II.3.1. Centrale automatique :	42
II.3.2. Centrale semi-automatique :	42
II.3.3. Centrale manuelle :	43
III. Eléments d'une centrale d'enrobage :	43
III.1. STOCKAGE ET CHAUFFAGE DU BITUME :	43
III.2. DOSAGE DES FINES D'APPORT :	43
III.3. DOSAGE DES GRANULATS :	43
III.4. CHAUFFAGE ET SECHAGE DES GRANULATS :	44
III.5. ALIMENTATION DU MALAXEUR EN GRANULATS :	44
III.6. INTRODUCTION ET DOSAGE DU LIANT :	44
III.7. MALAXAGE :	45
III.8. STOCKAGE ET CHARGEMENT DES ENROBES :	45
IV. SPECIFICATIONS SUR LE MATERIEL DE FABRICATION :	48
IV.1. SPECIFICATIONS SUR LES TOLERANCES DE FABRICATION :	48
IV.2. SPECIFICATIONS RELATIVES A LA TECHNOLOGIE DU MATERIEL :	48
V. REGLAGE D'UNE CENTRALE D'ENROBAGE :	50
V.1. REGLAGES PERIODIQUES :	50
V.2. REGLAGES POUR LA FABRICATION D'UNE COMPOSITION DONNEE :	50
VI. ESSAIS PRELIMINAIRES A LA FABRICATION :	53
VII. SUIVI DE LA FABRICATION :	54

Partie IV

I. TRANSPORT DES ENROBES BITUMINEUX :	58
II. PREPARATION DU SUPPORT :	58
III. REPANDAGE DES BETONS BITUMINEUX :	60
III.1. METHODES ET MATERIEL DE REPANDAGE :	60
III.2. REPANDAGE :	61
III.2.1. Température et types de répandages :	61
III.2.2. Etablissement du plan de répandage :	65
III.2.3. Exécution des joints longitudinaux :	65
III.2.4. Exécution des joints transversaux de reprise :	65
III.3. COMPACTAGE :	66
III.3.1. Atelier de compactage :	67
III.3.2. Planches d'étalonnage :	68
III.3.3. Méthodologie de réalisation d'une planche d'étalonnage :	69
III.4. CONTROLE DE LA QUALITE DE MISE EN ŒUVRE :	76
III.5. REGENERATION EN PLACE DES BETONS BITUMINEUX :	78

Première partie

Constituants des Bétons bitumineux

I. Granulats :

I.1. Origine et moyens d'élaboration:

D'une manière générale, les granulats destinés à la fabrication des bétons bitumineux peuvent avoir des origines différentes :

- ✓ Carrières de roches massives ;
- ✓ Carrières de matériaux alluvionnaires (ballastières) .

La fabrication des granulats est assurée par des installations de concassage-criblage dont la taille et la nature des différents composants varient selon l'importance des chantiers et la nature des matériaux bruts à traiter.

Les équipements standards communs à toutes les installations de concassage-criblage sont :

- ✓ Trémies d'alimentation et trémies tampon ;
- ✓ Concasseurs primaires à mâchoires ;
- ✓ Des concasseurs giratoires à cône (secondaire ou tertiaire)
- ✓ Des cribles vibrants ;
- ✓ Des convoyeurs ou sauterelles .

L'assemblage et le nombre de ces différents équipements est défini par la nature et les caractéristiques des granulats à produire, la nature du matériau brut à traiter.

Les stations de concassage-criblage sont souvent caractérisées par leur capacité de production exprimée en Tonne/heure , toutes catégories confondues.



1. Trémie d'alimentation
2. Concasseur primaire à mâchoires
3. Trémie tampon
4. Convoyeur
5. Crible vibrant
6. Concasseur giratoire à cône

I.2. Caractéristiques et spécifications :

Le comportement mécanique et la rhéologie des bétons bitumineux dépendent étroitement des caractéristiques physiques et mécaniques des granulats qui les constituent. On distingue deux types de caractéristiques :

- **Caractéristiques intrinsèques** : elles sont liées à la nature minéralogiques de la roche ou des matériaux bruts ayant servi à la fabrication des granulats . on citera l'exemple de la dureté.
- **Caractéristiques extrinsèques** : elles sont liées au mode de fabrication des granulats : granularité, propreté, forme et angularité.

I.2.1. Dureté :

Elle est caractérisée par deux principaux coefficients :

- Coefficient Los Angeles (LA) :

Il caractérise la résistance aux chocs des granulats . l'essai consiste à faire subir à un échantillon de granulats une série de chocs avec des boulets en acier de nuance Z 30 C13 , de 47 mm de diamètre et d'un poids de 420 à 445 g, et de déterminer la quantité de fines (éléments <1,6 mm) qui se sont produites au cours de l'essai . Le coefficient Los Angeles est calculé selon la formule suivante :

$$LA = (m/ M) \times 100 \quad \text{où}$$

m = masse des fines produites au cours de l'essai

M = masse de l'échantillon avant essai (M=5000g)

- Coefficient micro Deval humide (MDE) :

Il caractérise la résistance à l'usure des granulats. L'essai consiste à faire subir à un échantillon de granulat de masse M= 500 g , un total de 12 000 tours dans un cylindre en acier en présence d'une charge abrasive et de l'eau. La charge abrasive est constituée de 2 à 4 Kg de billes de diamètre 10 mm , en acier

inox de nuance Z 30 C13. Après essai, on procède à la détermination de la masse des fines (éléments < 1,6 mm) qui se sont produites au cours de l'essai. Le coefficient MDE est calculé par la formule suivante :

$$\text{MDE} = (m/M) \times 100 \quad \text{où}$$

m = masse des fines produites au cours de l'essai
M = masse initiale de l'échantillon (M= 500 g)

I.2.2. Forme :

La forme d'un granulat est caractérisée par le coefficient d'aplatissement (CA) qui représente le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$ avec :

G : grosseur du granulat
E : épaisseur du granulat

En pratique, l'essai consiste à fractionner un échantillon du matériau à tester au moyen d'une série de tamis et de passer le retenu de chaque tamis dans une grille à fentes parallèles. On détermine ensuite la masse des passants par chaque grille. Le coefficient d'aplatissement est alors calculé par la formule :

$$\text{CA} = \Sigma m_i / M \quad \text{où}$$

m_i = masse des passant à la grille i
M = masse de l'échantillon soumis à l'essai

I.2.3. Propreté :

- Propreté des sables :

Elle est appréciée par les essais d'équivalent de sable et de valeur au bleu de méthylène.

L'essai d'équivalent de sable :

Consiste à faire flocculer les particules fines contenues dans un échantillon de sable au moyen d'une solution lavante et de mesurer, après un temps de repos, la hauteur du sable sédimenté (h) et la hauteur totale sédimentée du sable et du flocculat (h') . l'équivalent de sable est donné par la formule :

$$\underline{ES = (h / h') \times 100}$$

L'essai de valeur au bleu de méthylène :

Consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène absorbée par un échantillon de sable et permet de renseigner sur l'activité des particules fines contenues dans cet échantillon . la valeur au bleu de méthylène (VB) est exprimée en gramme de bleu de méthylène pour 100 grammes de sable .

- Propreté des gravillons :

Elle est appréciée par la valeur de la propreté superficielle qui correspond au pourcentage de particules fines (éléments < 1mm) contenues dans un échantillon de gravillons . en pratique l'essai consiste à séparer , par lavage, les particules fines (<1mm) contenues dans un échantillons de gravette et de déterminer leur masse . la propreté superficielle est obtenue par la formule :

$$\underline{Ps = (m / M) \times 100 \text{ où}}$$

m= masse des fines < 1 mm

M= masse initiale de l'échantillon testé

La propreté des gravillons ou des sables peut, également, être appréciée au moyen des limites d'Atterberg déterminées sur la fraction des éléments < 0,43 mm isolées par lavage à partir de l'échantillon à tester . les limites concernées sont :

$$\underline{IP = WI - Wp}$$

WI : limite de liquidité

Wp : limite de plasticité

IP : indice de plasticité ;

I.2.4. Granularité :

Il s'agit de définir la classe granulaire du granulat en procédant à l'essai d'analyse granulométrique par tamisage. L'essai consiste à fractionner le matériau à tester au moyen d'une série de tamis et de déterminer par suite les pourcentages cumulés des passants à chaque tamis .

Un granulat est dit de classe granulaire d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes :

- ✓ Le refus au tamis d'ouverture D est inférieur à x %
- ✓ Le tamisât au tamis d'ouverture d est inférieur à x %
- ✓ Le tamisât au tamis d'ouverture d/2 est inférieur à y %

Avec :

- ✓ $x = 10$ si $D/d \geq 2$ et $x = 15$ si $D/d < 2$
- ✓ $y = 3$ %

Pour les sables 0/D, la dénomination d'une telle classe est valable si le refus au tamis d'ouverture D est inférieur à 10 % .

I.2.5. Angularité :

Elle définit le pourcentage d'éléments concassés contenus dans un matériau donné. Elle est caractérisée par l'indice de concassage ou le rapport de concassage .

- ✓ l'indice de concassage (IC) d'un matériau d/D est égale au pourcentage de passants au tamis d'ouverture D contenus dans la matériau brut utilisé pour sa fabrication .
- ✓ le rapport de concassage (RC) d'un matériau d1/D1 , fabriqué à partir d'un matériau d2/D2 est égal au rapport d2/D1
- ✓ un matériau est dit concassé pur lorsque son rapport de concassage est supérieur à 4.

Remarque : Les granulats élaborés à partir de roches massives sont des granulats concassés pur .

Pour ce qui est des spécifications sur les granulats destinés à la fabrication des bétons bitumineux pour couche de roulement ou de liaison, on présentera ci après les exigences du Cahier de Prescriptions Communes (CPC) du ministère de l'équipement :

Nature	Dureté		Propreté		Forme	Angularité
	LA	MD E	ES %	IP %	CA %	RC
Sables 0/D	-	-	> 40	NM	-	Concassé pur
Gravettes d/D	<2 5	<20	-	NM	< 20 si D > 10 mm < 25 si D < 10 mm	

I.3. Essais de laboratoire :

Selon l'avancement du processus de fabrication des granulats, on a affaire à trois types d'essais de laboratoire :

- ✓ essais d'information ;
- ✓ essais d'agrément ;
- ✓ essais de recette.

I.3.1. Essais d'information :

Les essais d'information sont généralement réalisés pendant la phase de prospection de carrières . ils ont pour objectif de vérifier les caractéristiques des matériau brut (dureté et propreté) et permettent d'orienter le choix des techniques d'élaboration des granulats , en particulier, la nature et l'importance des équipements qui constitueront la chaîne de concassage et de criblage.

I.3.2. Essais d'agrément :

Les essais d'agrément ont pour objectif de vérifier la conformité des caractéristiques des granulats fabriqués aux prescriptions des documents

contractuels (CPS, CPC) et permettent de fixer les valeurs de référence à prendre en considération lors des essais de contrôle ultérieurs (essais de recette).

D'autre part, les valeurs des paramètres d'identification obtenus sur les matériaux agréés serviront pour la réalisation de l'étude de formulation du béton bitumineux au laboratoire.

Les essais d'agrément sont entamés dès la première journée de fabrication et consistent en :

- ✓ l'identification du matériau brut utilisé pour la fabrication des granulats ;
- ✓ l'examen du montage de la station de concassage-criblage ;
- ✓ le prélèvement d'échantillons représentatifs des différentes classes granulaires fabriquées pour la réalisation des essais d'identification au laboratoire.

Les quantités minimales de matériaux nécessaires pour la réalisation des essais d'agrément et le nombre d'échantillons à prélever sont donnés dans le tableau suivant :

Classe granulaire	Quantité minimale	Nombre d'échantillons
Sables 0/D	La fabrication d'une journée avec un minimum de 100 m ³	8
Gravettes d/D	La fabrication d'une journée avec un minimum de 50 m ³	5

Le schéma directeur de conduite des essais d'agrément est donné dans la page suivante. Il comprend trois étapes essentielles :

- ✓ **1^{ère} étape** : vérification de la dureté
- ✓ **2^{ème} étape** : vérification de la propreté
- ✓ **3^{ème} étape** : vérification de la granulométrie, de la forme et de la dureté

Le programme des essais à réaliser sur les échantillons prélevés est le suivant :

- Pour les sables 0/D :

Une analyse granulométrique et un équivalent de sable sur chacun des 8 échantillons prélevés.

- Pour les gravettes d/D :

Une analyse granulométrique et essai de forme sur chacun des 5 échantillons prélevés . Un essai Los Angeles et un essai micro Deval sur le mélange des 5 échantillons prélevés.

La vérification de l'angularité des granulats se fait par l'analyse du montage de la station de concassage-criblage et la mesure des mailles du crible alimentant les organes de concassage.

Le jugement d 'agrément des granulats est prononcé lorsque :

- Pour la dureté :

- ✓ Le coefficient LA est inférieur à la limite imposée $S = 25$
- ✓ Le coefficient MDE est inférieur à la limite de 20
- ✓ Lorsque le coefficient LA est supérieur à 25, il est toléré une compensation dans la limite de 5 points entre le LA et le MDE à condition que le MDE reste toujours inférieur à 20.

- Pour la propreté des sables 0/D :

L'ES sur la fraction 0/5 mm est supérieur à 40 % : la propreté est satisfaisante.

L'ES sur la fraction 0/5 mm est inférieur à 40 % : on distingue deux cas :

1^{er} cas : D_{\max} du sable est supérieur à 5 mm : le matériau est refusé

2^{ème} cas : D_{\max} du sable est inférieur à 5mm : on effectue une mesure de l'indice de plasticité. Deux cas de figure peuvent se présenter :

- ✓ Si IP non mesurable : la propreté du sable est provisoirement agréée. On vérifiera, cependant, lors de l'étude de formulation que l'ES sur la fraction 0/5 mm du mélange minéral global est supérieur à 40 % .
- ✓ Si IP est mesurable, le sable n'est pas agréé.

- Pour la propreté des gravettes d/D :

Lorsque l'IP n'est pas mesurable, la propreté des gravettes est agréée .

- Pour la granulométrie :

L'agrément de la granulométrie consiste à définir la classe granulaire d/D pour les gravettes et D pour les sables tout en respectant les règles suivantes :

- ✓ Continuité de la courbe granulométrique moyenne du granulat : on vérifiera que :
 - Si $D \geq 2,5 d$ le tamisât à $(d+D) / 2$ est compris entre 33% et 66 %
 - Si $D < 2,5 d$ le tamisât au tamis médian doit satisfaire ce qui suit :

Classe granulaire d/D (mm)	4 / 6,3	6,3 / 10	6,3 / 14	10/14
Tamis médian (mm)	5	8	10	12,5
Fourchette à respecter à ce tamis (%)	30 à 55	37 à 62	45 à 70	52 à 77

✓ Homogénéité et régularité :

Il s'agit de la vérification de la régularité de fabrication des granulats pour assurer, ultérieurement l'homogénéité du mélange minéral et la stabilité des réglages des postes d'enrobage.

Les conditions traduisant l'homogénéité de la granulométrie d'un granulat sont exprimées par des fuseau de régularité tels que :

- **Pour les gravettes d /D :**

L'étendue maximale du fuseau de régularité est de :

- 10 % aux tamis d et D
- 25 % au tamis $(d+D)/2$

- **Pour les sables 0/D :**

L'étendue maximale du fuseau de régularité est de :

- 10 % aux tamis D et 0,5 mm
- 15 % aux tamis de 2 et 4 mm si $D \neq$ de 2 ou 4 mm
- 4 % au tamis de 0,08 mm si la teneur en fines < 12 %
- 6 % au tamis de 0,08 mm si la teneur en fines ≥ 12 %

• **Pour la forme :**

L'agrément de la forme des gravettes est prononcé lorsque le coefficient d'aplatissement est inférieur aux valeurs limites imposées :

- $CA < 20$ % si $D_{max} \geq 10$ mm
- $CA < 25$ % si $4 < D_{max} < 10$ mm

- Pour l'angularité :

L'angularité des granulats est agréée lorsque le rapport de concassage est supérieur à 4.

I.3.3. Les essais de recette :

Les essais de recette ont pour objectif le suivi de la qualité des granulats au cours de la fabrication, la vérification de la conformité des caractéristiques des granulats aux exigences des documents contractuels et aux données des essais d'agrément et enfin, l'organisation des opérations de stockage des granulats fabriqués .

La fréquence des prélèvements et la nature des essais à réaliser sont donnés dans le tableau suivant :

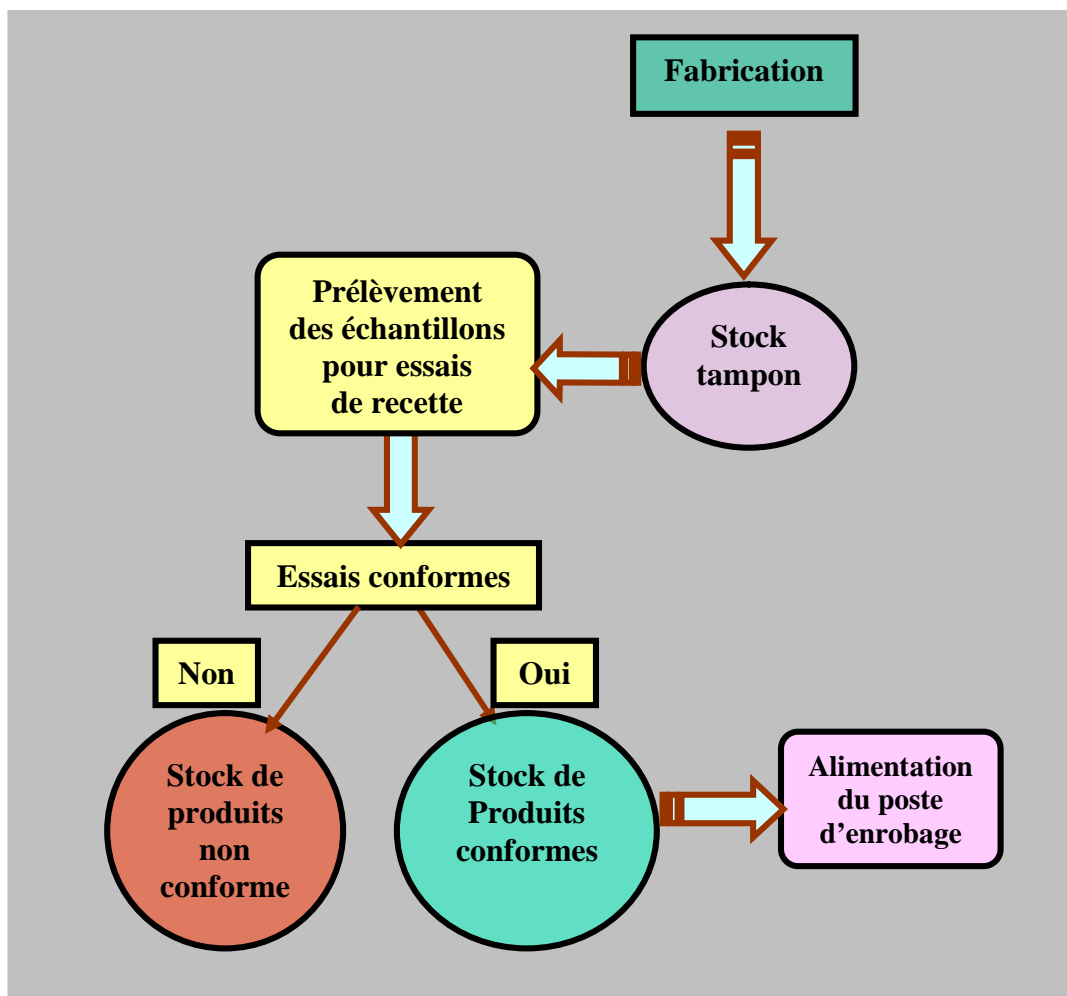
Nature du matériau	Paramètre à contrôler	Désignation de l'essai	Fréquence de l'essai
Gravette d/D et sables 0/D	Granularité Propreté	Analyse granulométrique Indice de plasticité Equivalent de sable	1/200 m ³ 1/200 m ³ 1/200 m ³
	Angularité Forme Dureté	Rapport de concassage Coefficient d'aplatissement Los Angeles et micro Deval	1/500 m ³ 1/500 m ³ 1/500 m ³
Fillers d'apport	Granularité Propreté	Analyse granulométrique Indice de plasticité	1/100 m ³ 1/100 m ³

La conduite des essais de recette se fait généralement par la réception de lots homogènes puis la mise en stocks des matériaux réceptionnés. Selon les essais à réaliser, les lots homogènes sont des lots de 200 à 500 m³, pour les gravettes et sables et de 100 m³ pour les fines d'apport. Ces lots constituent un stock tampon sur lequel sont prélevés les échantillons pour essais de laboratoire. Selon les résultats des essais réalisés, on a deux situations :

- ✓ Les matériaux prélevés sur les stocks tampons présentent des caractéristiques conformes aux documents contractuels et aux essais d'agrément, dans ce cas ils sont transférés sur un stock dit de matériaux conformes qui servira pour l'alimentation en granulats de la station d'enrobage.
- ✓ Au moins l'une des caractéristiques d'identification est défailante, dans ce cas le lot des matériaux identifiés est transféré sur un stock dit de matériaux non conformes qui sera évacué hors du chantier.

Ces opérations de réception et d'organisation des stocks doit être maîtrisée afin d'éviter tout erreur d'alimentation du poste d'enrobage par des matériaux conformes et par suite aboutir à une défailance des caractéristiques du béton bitumineux qui sera fabriqué.

Le schéma suivant résume les modalités de réception et de stockage des granulats :



Concernant les opérations de transport et de stockage des granulats, elles doivent être effectuées de façon à éviter la pollution des matériaux, leur ségrégation et leur évolution. Chaque classe granulaire est stockée séparément. Les stocks doivent être suffisamment éloignés l'un de l'autre pour éviter le mélange des classes granulaires.

Les granulats sont stockés soit en tas séparés sur des plates formes aménagées à cet effet, soit dans des silos ayant une capacité suffisante pour assurer en continu la fabrication d'au moins une demi journée de mélange granulaire. Les fines d'apport sont spécialement transportées dans des conteneurs étanches et stockées dans des silos dont la capacité minimale permet d'assurer une journée de production.

Les voies de circulation des engins de chargement et de transport des granulats doivent être entretenues afin d'éviter la contamination des stocks par les poussières.

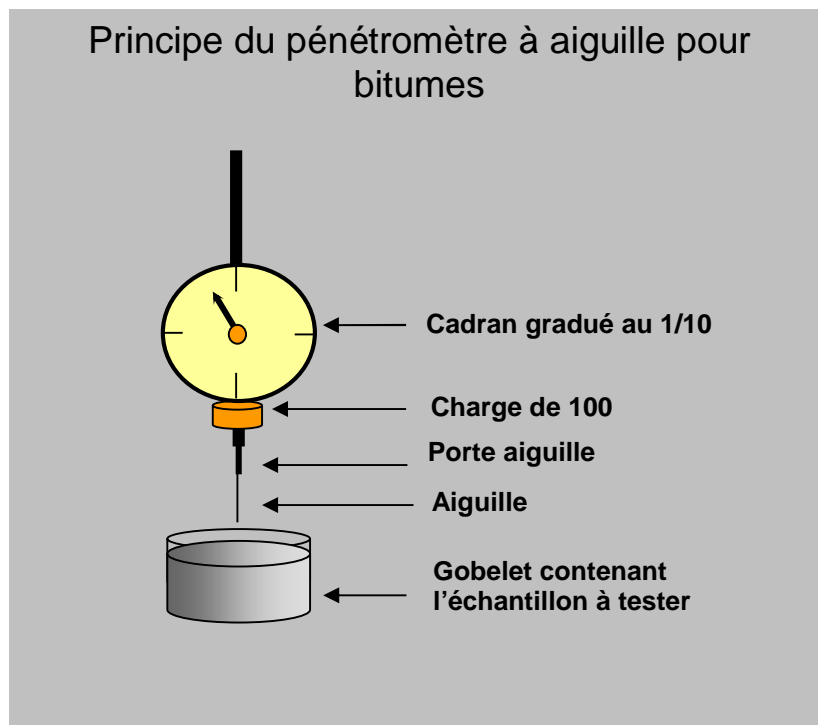
II. Liants hydrocarbonés :

II.1. Origines et fabrication des bitumes routiers :

Les bitumes routiers sont obtenus à partir du résidu de la distillation atmosphérique du pétrole brut et par combinaison diverses de procédés et de produits de base, selon le brut traité et le liant bitumineux visé.

II.1.1. Classification des bitumes :

Les bitumes produits par les raffineries sont classés en différentes catégories selon leur pénétration. Dans un échantillon de bitume, la pénétration est exprimée en 1/10 mm et correspond à l'enfoncement d'une aiguille calibrée, soumise à une charge de 100 g pendant 5 secondes à la température de 25 °C. Chaque catégorie de bitume est définie par les valeurs extrêmes de la pénétration. Pour les bitumes routiers, les classes les plus utilisées sont : 180/220, 80/100, 60/70, 40/50 et 20/30.



II.1.2. Fabrication des bitumes :

Quatre modes de fabrication des bitumes peuvent être distingués :

- ◆ Bitumes de distillation directe :

Le résidu de distillation atmosphérique des pétroles lourds asphaltiques suivie d'une distillation sous vide conduit aux bitumes de distillation directe qui permettent de préparer toute la gamme des bitumes routiers .

- ◆ Bitumes reconstitués :

Ils sont le produit de combinaison de bitumes de distillation directe et des huiles de graissage provenant du raffinage des lubrifiants par des solvants sélectifs .

- ◆ Bitumes soufflés :

Ce procédé consiste à souffler de l'air dans le résidu de la distillation sous vide, porté à une température voisine de 250 °C et à obtenir directement de cette façon un bitume de caractéristiques souhaitées par exemple la pénétrabilité .

◆ Bitumes soufflés et reconstitués :

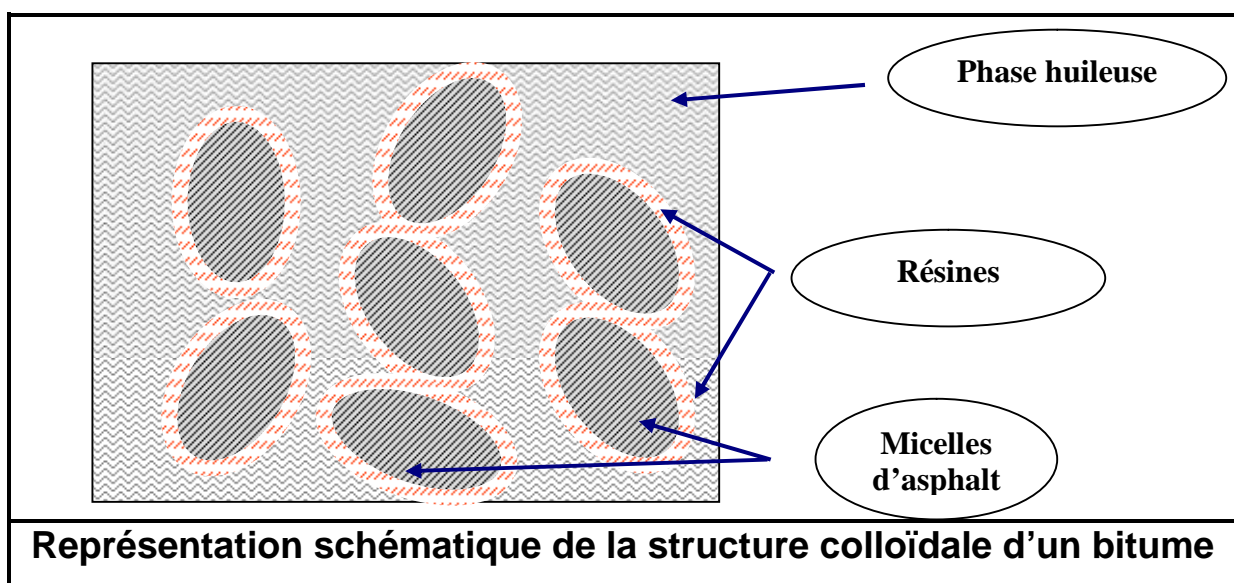
Ce procédé consiste à souffler plus longtemps un résidu de distillation jusqu'à obtention d'un produit de haute viscosité . à partir de cette base de départ, par mélange avec d'autres produits disponibles à la raffinerie , on peut obtenir toute la gamme des bitumes routiers .

II.1.3. Structure des bitumes :

Le bitume est un composé hydrocarboné de constitution complexe. Les analyses chimiques mettent en évidence les constituants essentiels suivants :

- ✓ Carbone : 79 à 88 %
- ✓ Hydrogène : 7 à 13 %
- ✓ Oxygène : 2 à 8 %
- ✓ Azote : 0 à 3 %
- ✓ Traces de métaux : Fe, Ni, Va, Ca, Ti, Mg, Co, Sn, Zn, et Ca

En général un bitume est un composé colloïdal constitué d'une suspension de micelles d'asphaltènes, peptisées par des résines dans un milieu d'huiles saturées et aromatiques . Cette structure est schématisée ci après :



Pour la plus part des bitumes la composition approchée est la suivante :

- ✓ 10 à 30 % d'asphaltènes : agglomérats polymoléculaires résultat d'une condensation d'un grand nombre de pseudo-monomères différenciés par la nature de leurs squelette carbonique et par les hétéroatomes et les fonctions que supporte le réseau moléculaire .
- ✓ 40 à 60 % de maltènes : (résines + huiles) constituées par une condensation d'un grand nombre de molécules aromatiques néphthéniques et hétérocycliques reliées par des ponts aliphatiques relativement courts.

II.2. Caractéristiques et spécifications :

Les principales caractéristiques et spécifications définies par le CPC et la norme Marocaine NM 03-4-002 pour les bitumes destinés aux travaux routiers, en particulier, la fabrication des bétons bitumineux , sont résumées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Norme d'essai	Classes				
		180/220	80/100	60/70	40/50	20/30
Pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C (1/10 mm)	NM 03 4 012	180 à 220	80 à 100	60 à 70	40 à 50	20 à 30
Ductilité (cm)	NM 03 4 013	> 100	> 100	> 80	> 60	> 25
Densité relative , méthode du pycnomètre	NM 03 4 014	1.00 /1.07	1.00/1.10	1.00/1.10	1.00/1.10	1.00/1.10
Point de ramollissement , méthode bille et anneau (°C)	NM 03 4 015	34 à 43	41 à 51	43 à 60	47 à 60	52 à 68
Effet de la chaleur et de l'air Pénétrabilité résiduelle %	NM 03 4 016	> 42	> 47	> 52	> 55	> 60
Perte de masse à la chaleur %	NM 03 4 017	< 2	< 2	< 1	<1	<1
Solubilité %	NM 03 4 18	>99.5	>99.5	>99.5	>99.5	>99.5
Point d'éclair et point de feu en vase ouvert (°C)	NM 03 4 19	> 230	> 230	> 230	> 250	> 250
Teneur en paraffine %	NM 03 4 20	< 4.5	< 4.5	< 4.5	< 4.5	< 4.5

Chaque classe de bitume est caractérisée par une température d'utilisation. Ces températures figurent dans le tableau suivant :

Classe de bitume	80/120	60/70	40/50	20/30
Température d'utilisation °C	140	150	160	180

II.3. Transport et stockage :

Les bitumes sont transportés dans des citernes calorifugées munies de dispositif de réchauffage qui permet de ramener le liant à une température qui permet de procéder au pompage et au transvasement dans d'autres conteneurs.

Le stockage est lui aussi effectué dans des cuves munies de dispositif de chauffage capable de porter le bitume à la température d'utilisation.

Le chauffage lors des opérations de transport et de stockage ne doit en aucun cas conduire à une altération des caractéristiques du bitume.

Les dispositifs de transport et de stockage des liants hydrocarbonés doivent être équipés d'instruments de mesure indiquant constamment la température du liant

II.4. Essais d'agrément et de recette :

Les essais d'agrément sont réalisés sur un échantillon de bitume remis au laboratoire à l'occasion de l'étude de formulation du béton bitumineux. Il est procédé à la réalisation de la totalité des essais figurant dans le tableau précédent .

Les essais de recette sont réalisés sur chaque nouvel approvisionnement sur chantier . Un échantillon est prélevé dans la citerne du transporteur et subira la totalité des essais figurant dans le tableau précédent . Le bitume livré sur chantier ne sera transvasé dans la cuve d'alimentation de la centrale d'enrobage q'une fois les résultats des essais effectués sont conformes aux spécifications requises pour le type de liant livré .

Deuxième partie

Etude de Formulation des Bétons bitumineux

I. Objectif de l'étude de formulation :

L'étude de formulation d'un béton bitumineux a pour objectifs :

- ✓ De déterminer les caractéristiques de l'enrobé :
 - Le pourcentage des vides
 - La tenue à l'eau de l'enrobé
 - Les performances mécaniques

- ✓ De définir la composition de l'enrobés par les paramètres suivants :
 - La granularité
 - La nature des granulats
 - La nature et la teneur en fines
 - Le type et la teneur en liant
 - Le type et le dosage de dope d'adhésivité (le cas échéant)

II. Performances et spécifications :

Une étude de formulation de béton bitumineux doit aboutir à une formule qui répond aux spécifications des documents contractuels (CPC et CPS) . ci après nous donnerons les spécifications requises par le CPC pour les bétons bitumineux utilisés en couche de roulement :

II.1. Granularité :

Elle est définie par le fuseau granulaire suivant (EB 0/10 mm):

% de passants au tamis de : en mm			
0.08	2	6	10
5 à 9	30 à 45	65 à 80	100

II.2. Type de bitumes utilisés :

Le bitume utilisé pour la fabrication des bétons bitumineux appartient à l'une des classes 40/50 ou 60/70 ou 80/100 .

II.3. Performances mécaniques :

L'évaluation de l'aptitude au compactage, du comportement mécanique et de la tenue à l'eau d'un béton bitumineux sont traduits par une série de spécifications auxquelles doit satisfaire la formule étudiée au laboratoire. Ces spécifications sont regroupées dans le tableau suivant :

Caractéristiques	Spécifications
Module de richesse K	3.45 à 3.90
Essai Marshall <ul style="list-style-type: none"> • Compacité % • Stabilité (Kg) <ul style="list-style-type: none"> • bitume 40/50 • bitume 60/70 • bitume 80/100 • Fluage (mm) 	93 à 97 > 1000 > 1000 > 950 < 4
Essai Duriez (L C P C) <ul style="list-style-type: none"> • Compacité % • Compression (bar) <ul style="list-style-type: none"> Bitume 40/50 Bitume 60/70 Bitume 80/100 • Rapport RH/RS 	90 à 95 > 60 > 55 > 50 > 0.75

III. Choix des constituants :

III.1. Granulats :

Les granulats sont choisis de façon à assurer la granularité du béton bitumineux étudié. Ils doivent au préalable subir avec succès les essais d'agrément. Si au cours de l'étude de formulation, l'ajout de classes granulaires s'avère nécessaire, ces classes doivent également être agréées .

Les essais d'agrément doivent être complétés par la mesure de la masse volumique réelle de chacune des classes granulaires choisies pour pouvoir déterminer par la suite, la compacité de l'enrobé étudié.

III.2. Liant hydrocarboné :

Le liant à choisir est le même que celui qui sera utilisé pour la fabrication de l'enrobé sur chantier. Le bitume sera choisi en fonction des conditions climatiques (en particulier la température) de la zone où est situé le projet ainsi que les conditions de sollicitations définies essentiellement par le volume de trafic .

III.3. Dopes :

Il est intéressant, avant de lancer l'étude de formulation de l'enrobé, de procéder à des essais d'adhésivité pour vérifier la compatibilité du liant utilisé avec la nature minéralogique des granulats à enrober. En cas de problèmes d'adhésivité, il est nécessaire de traiter le bitume avec un dope approprié . l'étude de formulation devra alors être conduite avec le bitume dopé .

III.4. Fillers d'apport :

Lorsque les fractions granulaires proposées pour la réalisation de l'étude de formulation de l'enrobé montrent un manque de fines (éléments < 0.08 mm) , le recours à des fines d'apport est nécessaire afin de garantir une compacité suffisante de l'enrobé étudié. Ces fines doivent être non plastiques . En général il est fait appel au ciment pour jouer ce rôle.

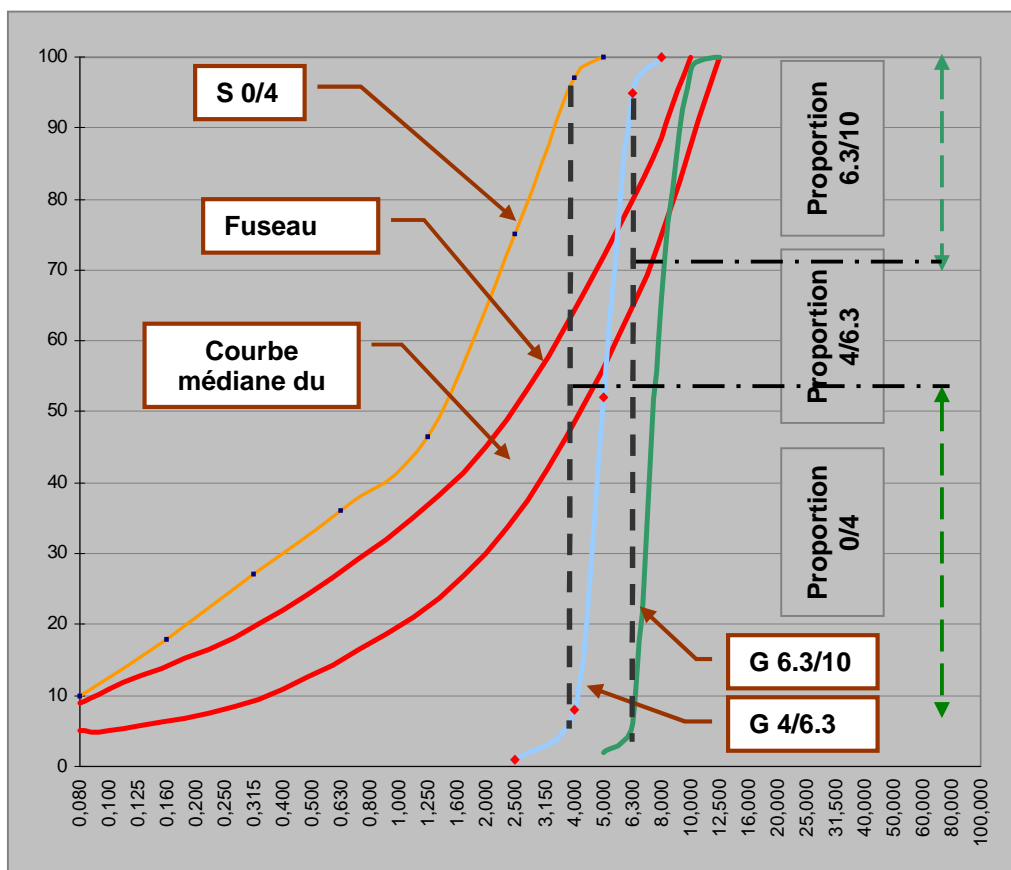
IV. Composition théorique d'un béton bitumineux :

La détermination de la composition théorique d'un béton bitumineux comporte deux phases principales :

- Détermination de la courbe granulométrique du mélange minéral . On pourra ,éventuellement, déterminer plusieurs mélanges possibles ;
- Déterminer les teneurs en bitume possibles pour chacun des mélanges granulaires fixés .

IV.1. Détermination du mélange minéral :

A partir des courbes granulométriques moyennes des différentes classes granulaires choisies pour la réalisation de l'étude de formulation, on compose un mélange minéral dont la courbe granulométrique est inscrite dans les limites du fuseau défini par les spécifications . Plusieurs méthodes sont utilisées pour la détermination des courbes de mélanges . On examinera dans la suite l'une des méthodes les plus simples et rapides .



La méthode consiste à :

Tracer sur le même graphique les courbes granulométriques moyennes des classes granulaires choisies pour la composition du mélange granulaire, le fuseau granulométrique relatif au mélange minéral de l'enrobé étudié et la courbe médiane de ce fuseau ;

Tracer la droite joignant le point correspondant à 5% de passants sur la courbe de la première gravette, au point correspondant à 95 % de passants sur la courbe de la deuxième gravette (ordre décroissant des Dmax)

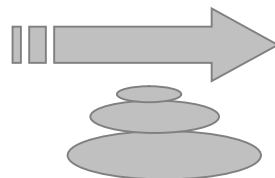
Le point d'intersection de cette droite avec la courbe médiane du fuseau détermine le pourcentage pondéral de la première gravette dans le mélange minéral.

Les opérations 2 et 3 sont répétées pour l'obtention des proportions des autres classes granulaires.

Remarque :

En général, les proportions déterminées par cette méthode sont difficiles à appliquer lors des réglages des postes d'enrobage, c'est pour cette raison que des ajustages sont nécessaires pour arrondir ces proportions à des valeurs facilement applicables en pratique. Dans l'exemple que nous avons choisi, les proportions obtenues sont les suivantes :

- gravette 6.3/10 : 29 %
- gravette 4/6.3 : 18 %
- sable 0/4 : 53 %



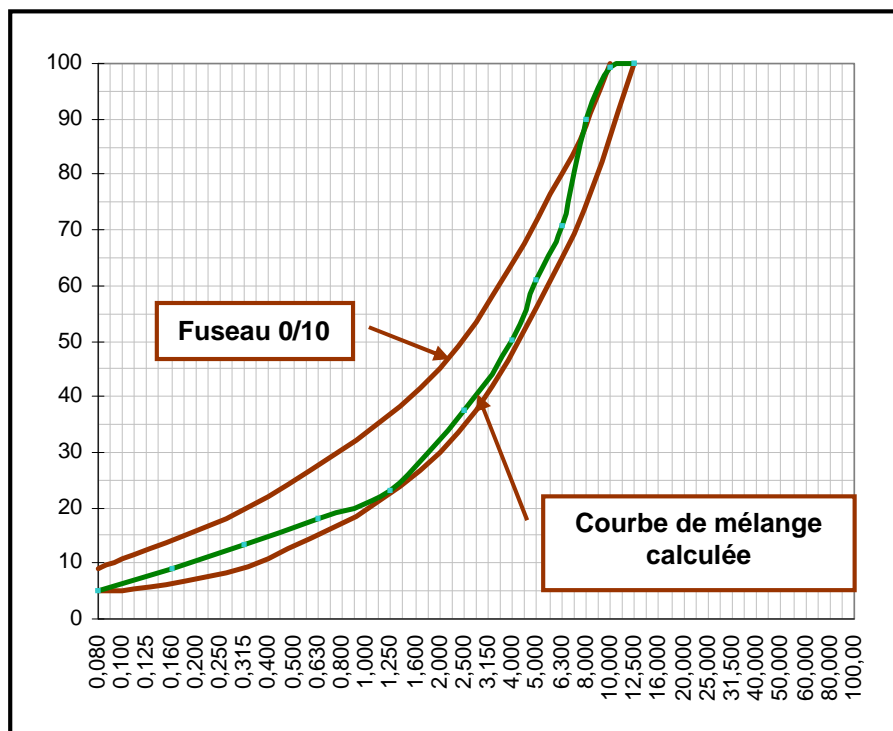
- gravette 6.3/10 : 30 %
- gravette 4/6.3 : 20 %
- sable 0/4 : 50 %

Afin de faciliter la fabrication du mélange minéral au niveau du poste d'enrobage, on arrondira ces proportions aux valeurs suivantes :

A partir des courbes moyennes des classes granulaires , on calculera la courbe du mélange minéral : le pourcentage de passants à un tamis pour la courbe de mélange est la somme des pourcentages de passants au même tamis des courbes des constituants pondérés par les proportions correspondantes.

La courbe granulométrique du mélange minéral calculée devra ensuite être tracée dans un graphique et être comparée au fuseau de spécifications.

Dans notre exemple, on aboutira à la courbe suivante :



La courbe granulométrique théorique obtenue est tangente au fuseau de spécifications pour la fraction 1/1,6 mm tout en étant inscrite dans les limites du fuseau . Il faudra d'autre part procéder à un essai d'analyse granulométrique sur un échantillon de mélange minéral reconstitué au laboratoire selon les proportions retenues afin d'apprécier la courbe réelle du mélange minéral et de procéder aux éventuelles corrections .

IV.2. Détermination du dosage en liant :

Les teneurs en bitumes qui serviront pour la réalisation de l'étude de formulation seront fixées par le module de richesse K et la surface spécifique Σ du mélange minéral retenu .

- Le module de richesse K symbolise l'épaisseur du filme de bitume qui enrobe les granulats . il est cerné par les spécifications dans une fourchette de 3.45 à 3.90 .
- La surface spécifique caractérise la surface globale développée par les grains constitutifs du mélange minéral . elle est calculée à partir de la courbe granulométrique par la relation :

$$\Sigma = 0.20 g + 2.2 S + 12 s + 135 f \text{ exprimée en m}^2/\text{Kg} , \text{ avec}$$

- g : % d'éléments > 6,3 mm
- S : % d'éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm
- s : % d'éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm
- f : % d'éléments < 0.08 mm

La relation liant la teneur en bitume de l'enrobé à la surface spécifique conventionnelle du mélange minéral est traduite par la formule suivante :

$$P = \alpha \cdot K \cdot (\Sigma)^{1/5} \text{ avec :}$$

P : teneur en bitume en %

α : coefficient correcteur tenant compte de la masse volumique des granulats : $\alpha = 2.65 / \text{MVRg}$

Les teneurs en bitumes qui serviront pour la réalisation de l'étude de formulation du béton bitumineux doivent être choisies de façon à ce que le module de richesse reste dans la fourchette spécifiée : $3.45 < K < 3.90$

V. Vérification expérimentale de la formule théorique :

La vérification expérimentale de la formule théorique de l'enrobé étudié consiste à procéder aux études suivantes :

- étude de la compactabilité au moyen de l'essai MARSHALL ou de l'essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG)
- étude de la tenue à l'eau de l'enrobé au moyen de l'essai DURIEZ (essai LCPC)

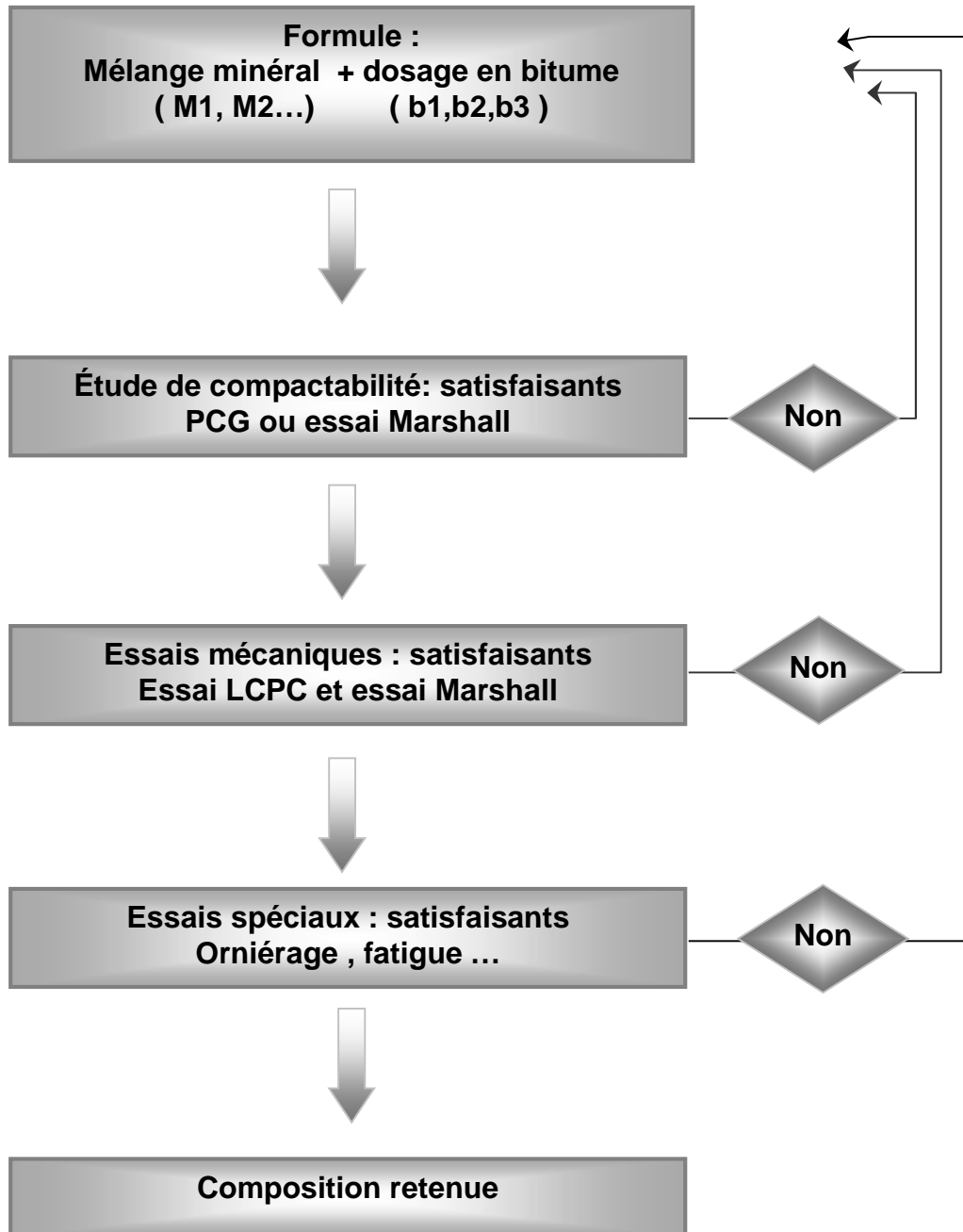
Le principe de ces études consiste à fabriquer au laboratoire des gâchées expérimentales à partir d'un mélange minéral M1 et un dosage en bitume b1 correspondant à un module de richesse proche de la moyenne de la fourchette spécifiée . Si les résultats des essais de compactabilité sont satisfaisants, ces essais seront reconduits avec le même mélange minéral est des dosages en bitume b2 et b3 situés de part et d'autre du dosage b1 et ce afin d'apprécier les variations des paramètres de compactage en fonction de la teneur en bitume de l'enrobés .

Lorsque les essais de compactabilité auront abouti à des résultats insuffisants, ils seront repris avec un autre mélange minéral M2 et un dosage en bitume b1 et le reste de l'étude est entamé en cas de résultats satisfaisants .

Le couple (M_i , b_i) de mélange minéral et de dosage en bitume ayant conduit à des résultats satisfaisants pour les essais de compactabilité , servira pour la fabrication de la gâchée expérimentale pour les essais de tenue à l'eau ; l'essai LCPC .

L'enchaînement de la réalisation de ces études est schématisé ci après :

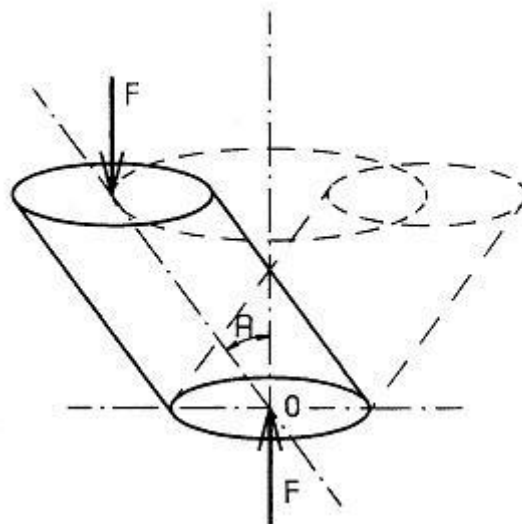
Etapes de vérification expérimentale d'une formule de béton bitumineux



V.1. Etude de la compactabilité :

V.1.1. Essai de compactage à la PCG : NF P 98-252

Cet essai a pour objectif de déterminer l'évolution du pourcentage des vides d'un enrobé bitumineux soumis à un compactage isotherme, obtenu par combinaison d'un cisaillement giratoire et d'une force axiale. L'essai consiste à faire subir à une éprouvette d'enrobé n girations avec une inclinaison d'un angle au sommet de $2\alpha = 2^\circ$ et en appliquant une force de 12 KN avec des vitesses de rotation de 6 à 32 Tr/ min. La hauteur de l'éprouvette est mesurée au cours de l'essai à différents nombre de giration.



Les résultats obtenus sont représentés sous forme d'un graphique avec en ordonnées le pourcentage des vides et en abscisse le nombre de girations.

La compacité absolue pouvant être atteinte sur chantier avec un atelier normal de compactage pour une épaisseur e (en cm) est celle obtenue à la PCG pour un nombre de giration $n = 10 e$.

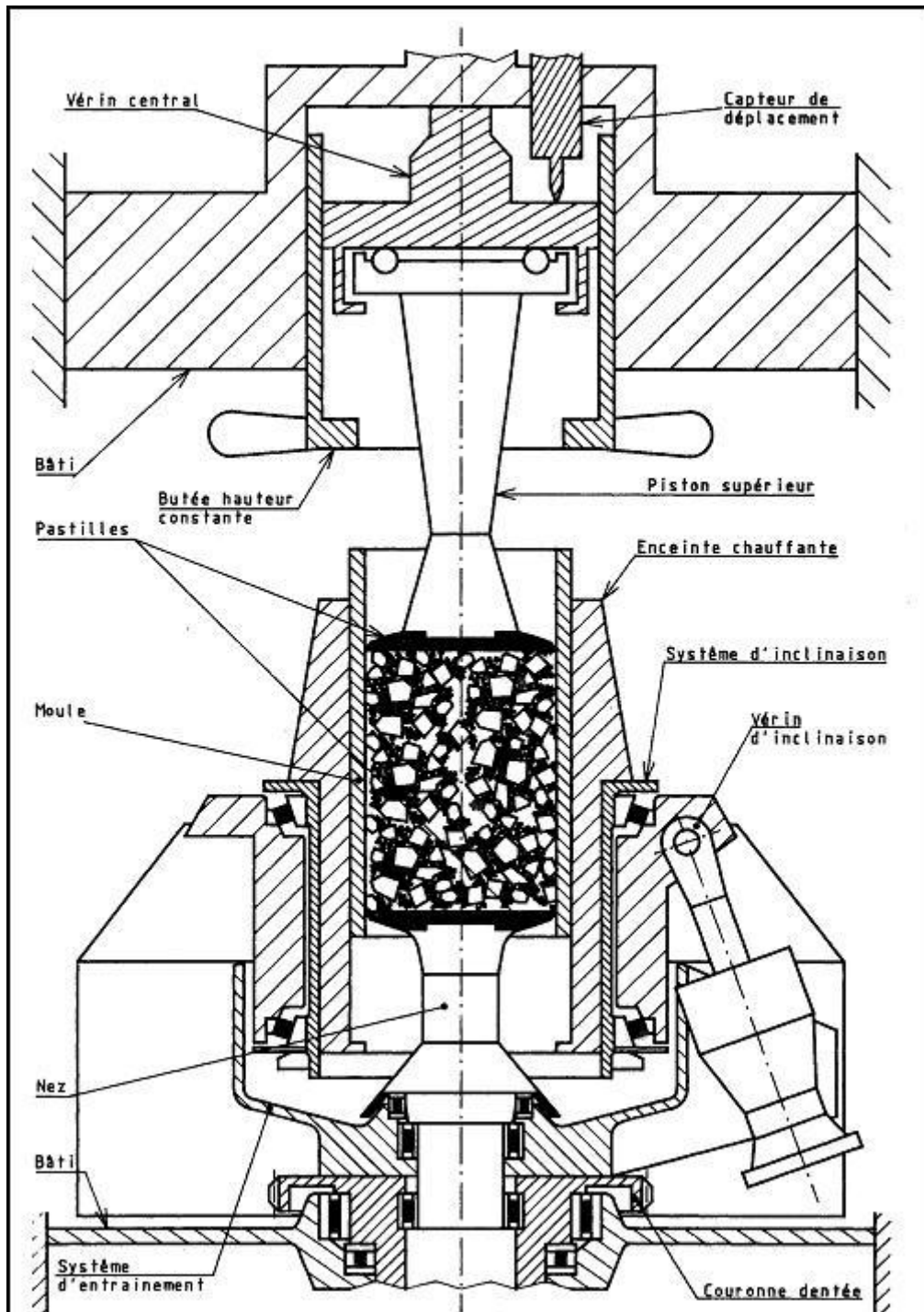


Schéma du principe de compactage à la PCG

La compactabilité à la PCG d'une formule de béton bitumineux est jugée satisfaisante lorsque :

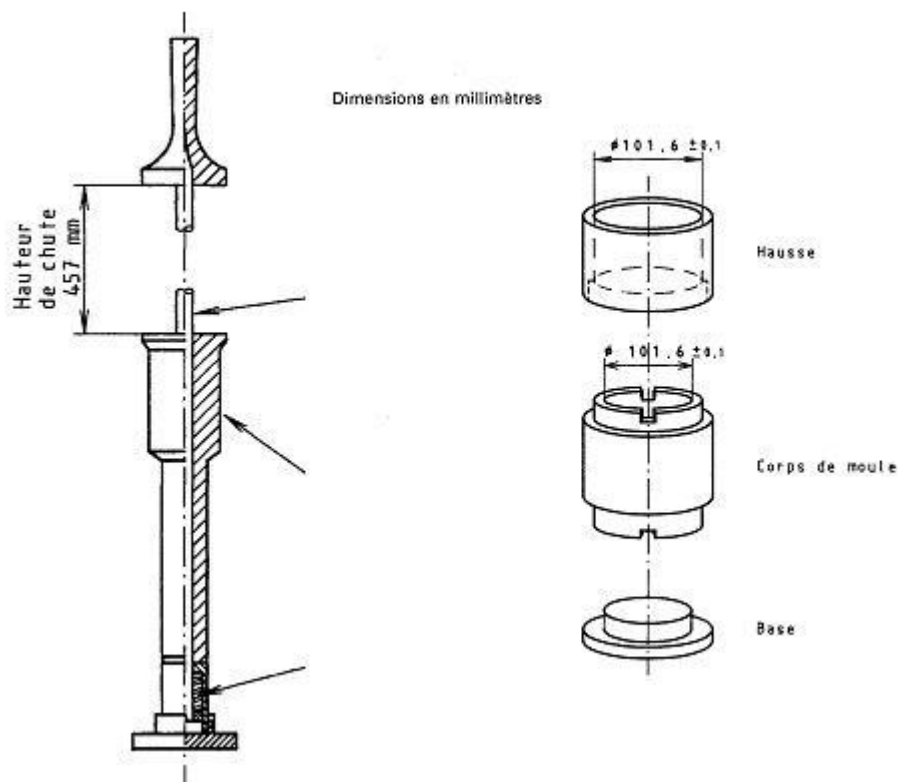
- ✓ La compacité à 10 girations est inférieure à 89 %
- ✓ La compacité à 60 girations est comprise entre 92 et 96 %

De plus, parmi les formules testées, on retiendra celle présentant l'évolution la plus rapide de la compacité : droite de plus forte pente.

V.1.2. Compactabilité à l'essai Marshall : NF P 98-251-2

Le but de cet essai est de déterminer, pour une température et une énergie de compactage données, le pourcentage des vides, la stabilité et le fluage Marshall d'un enrobé bitumineux.

Le principe de l'essai consiste à confectionner des éprouvettes d'enrobés bitumineux par compactage, dans des moules cylindriques, au moyen d'une dame normalisée. l'énergie de compactage correspond à 50 coups de dame sur chaque face de l'éprouvette.



Moule et dame Marshall

Les éprouvettes ainsi confectionnées serviront pour :

Détermination de la compacité de l'enrobé :

La compacité de l'éprouvette de l'enrobé est donnée par la formule :

$$C = \frac{M_{v_a}}{M_{v_r}}$$

Où : M_{v_a} : masse volumique par pesée hydrostatique (g/cm^3)

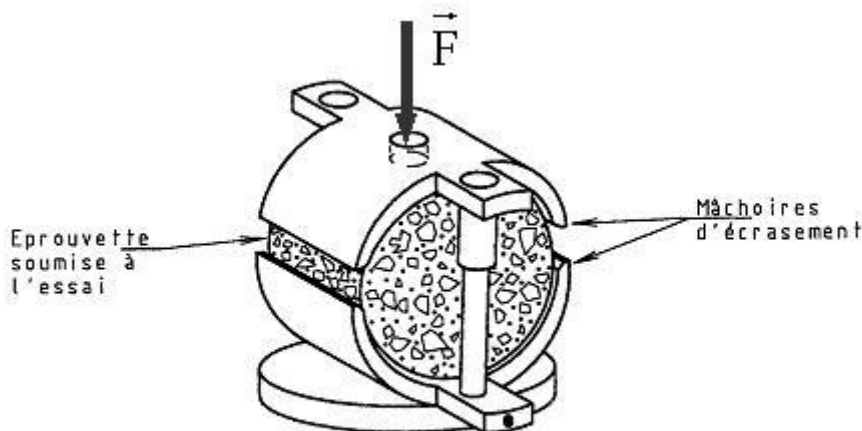
M_{v_r} : masse volumique pleine de l'enrobé , calculée comme suivant :

$$M_{v_r} = \frac{100+b}{\sum \frac{p_i}{M_{v_{g_i}}} + \frac{b}{M_{v_b}}}$$

- b = dosage en bitume en %
- p_i = pourcentage en poids du $i^{\text{ème}}$ constituant granulaire en %
- $M_{v_{g_i}}$ = masse volumique réelle du $i^{\text{ème}}$ constituant granulaire
- M_{v_b} = masse volumique du bitume prise égale à 1 g/cm^3

Détermination de la stabilité Marshall :

Il s'agit de l'effort maximum de rupture (en daN) de l'éprouvette ayant été comprimée suivant une génératrice dans un moule d'écrasement et par une presse dont la vitesse d'avancement est réglée à 0.85 mm/s .



Détermination du fluage Marshall :

C'est l'affaissement en 1/10 de mm , de l'éprouvette au moment de la rupture La compactabilité par l'essai Marshall consiste à déterminer l'évolution de la compacité de l'enrobé en fonction de l'énergie de compactage. On détermine la compacité d'éprouvettes Marshall confectionnée à des énergies de 25 , 50 et 75 coups de dame. On trace alors la courbe compacité absolue en fonction de l'énergie de compactage.

La compactabilité est jugée satisfaisante lorsque la compacité à 50 coups est comprise entre 93 et 97 %.

De la même façon que la PCG on retiendra la formule présentant l'évolution la plus rapide de la compacité traduisant une maniabilité optimale du mélange hydrocarboné .

V.2. Essais mécaniques :

Les essais mécaniques sont effectués sur la formule retenue suite aux étude de compactabilité à la PCG ou à l'essai Marshall .

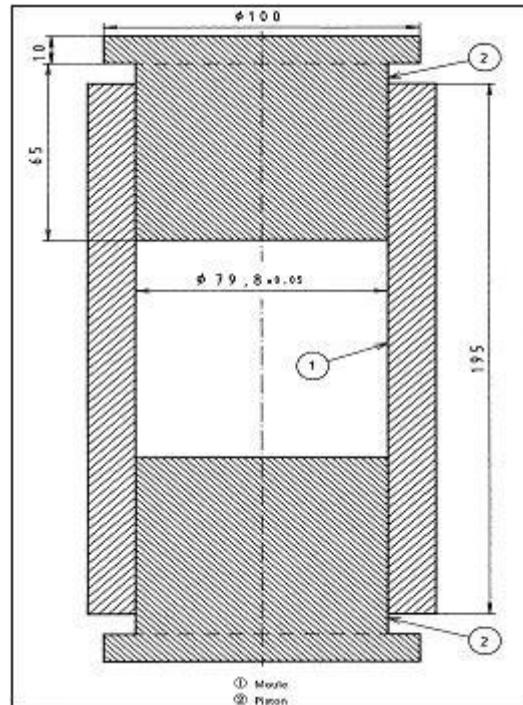
Dans le cas d'une étude ordinaire, les caractéristiques mécaniques sont testées essentiellement au moyen des essais LCPC (Duriez) et Marshall.

V.2.1. Essai LCPC : NF P 98-251-1

L'essai LCPC a pour but de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue à l'eau d'un enrobé bitumineux à chaud à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion .

L'essai est généralement réalisé à une température de 18 °C et consiste fabriquer, par compactage statique à double effet sous une charge de 60 KN et pendant un temps de charge de 300 s, deux lots d'éprouvettes qui seront conservés comme suit :

- ✓ 1^{er} lot : conservé à sec pendant 7 jours à une température de 18 °C et une hygrométrie de 50 %
- ✓ 2^{ème} lot : immergé dans l'eau pendant 7 jours à une température de 18 °C.



Dimensions du moule pour éprouvettes LCPC d'un béton bitumineux

Après le temps de conservation, on détermine la résistance à la compression simple des éprouvettes :

- ✓ R_s : résistance des éprouvettes conservées à sec (en bar)
- ✓ R_h : résistance des éprouvettes immergées (en bar)

La tenue à l'eau est appréciée par le rapport R_h / R_s qui doit être supérieur à 0.75, pour un béton bitumineux 0/10 .

On pourra déterminer, aussi , la compacité LCPC (ou le pourcentage des vides) en faisant le rapport de la masse volumique par pesée hydrostatique des

éprouvettes et la masse volumique pleine de l'enrobé . Cette compacité servira pour le contrôle de compactage de l'enrobé sur chantier.

V.2.2. Essai Marshall :

Il s'agit de déterminer la stabilité et le fluage Marshall selon la méthode exposées plus haut .

VI. Choix de la formule définitive :

La composition définitive à retenir lors d'une étude de formulation d'un béton bitumineux est celle qui aura satisfait les études de compactabilité et présenté des performances mécaniques conformes aux exigences des documents contractuels .

Une étude de formulation de béton bitumineux doit ressortir au minimum les informations suivantes :

- ✓ L'origine et l'identification de chacune des classes granulaires utilisée pour la réalisation de l'étude ;
- ✓ L'origine et l'identification du bitume utilisé et éventuellement le dope d'adhésivité ;
- ✓ Indiquer le pourcentage pondéral de chacun des constituants ;
- ✓ Donner la courbe granulométrique du mélange minéral retenu par l'étude ;
- ✓ Donner les résultats de l'étude de compactabilité ;
- ✓ Donner les résultats des essais mécaniques Marshall et LCPC ;
- ✓ Donner la densité hydrostatique de référence obtenue par l'essai LCPC.

Il est important de signaler qu'une étude de formulation est valable tant que les constituants utilisés dans sa réalisation n'ont pas changé. En cas de changement de l'une des caractéristiques de l'un des constituants , l'étude devra être reprise . Selon la nature des caractéristiques qui ont changé, on pourra se contenter de reprendre uniquement certaines étapes de l'étude .

Troisième partie

Fabrication des Bétons bitumineux

I. Fonction d'une centrale d'enrobage :

Les bétons bitumineux sont fabriqués dans des centrales d'enrobage . Les fonctions principales d'une centrale d'enrobage sont les suivantes :

- ✓ Le stockage et la manutention des constituants ;
- ✓ Le dosage des granulats, des liants hydrocarbonés et éventuellement des additifs (dopes) selon les proportions définies par l'étude de formulation ;
- ✓ Le séchage et le chauffage à une température déterminée ;
- ✓ Le traitement des gaz issus du séchage et du chauffage afin de récupérer les éléments fins, d'une part, et de minimiser la pollution atmosphérique d'autre part ;
- ✓ Le malaxage et l'homogénéisation du mélange ;
- ✓ La manutention et le stockage des produits fabriqués.

II. Types de centrales d'enrobage :

Selon leur mode de fonctionnement, les centrales d'enrobage sont classées selon les catégories suivantes:

II.1. Centrales discontinues :

Les opérations de préparation du mélange et de malaxage sont réalisées par gâchées successives dans un malaxeur interrompant le flux de matériaux .

II.2. Centrales continues :

Les opérations de préparation du mélange et du malaxage sont réalisées par des équipements et systèmes de manutention continus et dans un malaxeur ouvert n'interrompant pas le flux de matériaux .

II.3. Centrales Tambour Sécheur Enrobeur (TSE) :

Ces centrales sont caractérisées par la réalisation , au sein du même élément de la centrale, des opérations de séchage, de chauffage et d'enrobage des granulats. Elles peuvent être automatiques, semi-automatiques ou manuelles :

II.3.1. Centrale automatique :

Dans une centrale automatique, l'automatisme permet de :

- Recevoir les programmes de production ;
- Mémoriser la nature et la quantité de chacun des constituants ainsi que la production demandée ;
- Commander et contrôler le fonctionnement de la centrale sans l'intervention de l'opérateur sauf , éventuellement, pour effectuer la vidange du malaxeur ;
- La centrale est pilotée par un opérateur qui a à sa disposition des écrans lui permettant de suivre en temps réel l'état de fonctionnement de tous les organes de la centrale ainsi que toutes les informations sur la fabrication . l'automatisme permet à l'opérateur, en cas de nécessité , de passer en mode manuel .

II.3.2. Centrale semi-automatique :

Dans une centrales semi-automatiques l'opérateur effectue les opérations suivantes :

- L'affichage de la composition ;
- Le démarrage du cycle de production ;
- L'ouverture et la fermeture du malaxeur.

Le reste des opérations est automatisé.

II.3.3. Centrale manuelle :

Dans une centrale manuelle toutes les opérations élémentaires sont commandées par l'opérateur.

III. Eléments d'une centrale d'enrobage :

Quelque soit le type de la centrale d'enrobage , elle doit disposer d'un minimum d'équipements assurant les fonctions suivantes :

III.1. Stockage et chauffage du bitume :

La centrale doit disposer d'un parc de stockage de bitume d'une capacité suffisante pour assurer un fonctionnement continu compatible avec les performances de la centrale. Ces éléments de stockage sont équipés de dispositifs de chauffage capable d'amener le liant à la température d'utilisation .

III.2. Dosage des fines d'apport :

Les installations de dosage des fines d'apport doivent être équipées de dispositifs permettant d'effectuer le prélèvement des fines avant leur introduction dans le mélange. Elles comportent nécessairement une unité de dosage entre le silo et le malaxeur. Les fines d'apport doivent être dosées et introduite en continu , dans le cas des centrales continues et TSE . dans le cas des centrales discontinues, elles sont pesées dans une trémie spécialement réservée à cet effet .

III.3. Dosage des granulats :

Il est assuré par une série de trémies doseuses équipées chacune d'une trappe de réglage d'ouverture et d'un extracteur à bande à vitesse variable . le nombre de trémies est au moins égale à celui des fractions granulaires qui seront utilisées pour la fabrication du béton bitumineux. Le cloisonnement des trémies doseuses entre elles doit permettre d'éviter tout mélange des fractions granulaires. Le dosage des granulats est obtenu , soit par le réglage de l'ouverture de la trappe, soit par le réglage de la vitesse de la bande de l'extracteur.

III.4. Chauffage et séchage des granulats :

La centrale doit être équipée de moyens mécaniques capables d'introduire les granulats dans le tambour sécheur d'une manière uniforme afin d'obtenir une production à température constante. Le TS doit permettre d'abaisser la teneur en eau des granulats de telle façon que la teneur en eau globale de l'enrobé fabriqué reste inférieure à 0.5 % . d'autre part, le TS doit assurer un chauffage des granulats à une température compatible avec la classe du liant utilisé sans provoquer un vieillissement anormal de ce dernier.

III.5. Alimentation du malaxeur en granulats :

Pour les centrales à tambour, sécheur, enrobeur (TSE) les granulats , préalablement dosés, sont introduits dans le tambour au moyen d'un convoyeur à bande équipé d'un système de pesage en continu qui mesure le débit des produits entrants . ce débit sert de référence au système automatique de dosage de bitume . Pour les centrales discontinues, elles doivent être équipées de bascules capables d'effectuer des pesées en dynamique . le pesage étant automatique.

III.6. Introduction et dosage du liant :

La centrale doit avoir au moins un dispositif d'alimentation et de dosage du liant comprenant un système pour contrôle extérieur. Pour les TSE et les centrales continues , le dosage est réalisé par une pompe à vitesse variable et le débit du liant est contrôlé par un compteur ou débitmètre étalonné . le débit du liant est asservi et commandé par le débit d'alimentation en granulats secs . pour les centrales discontinues, le dosage du liant est pondéral ou volumétrique. Le dosage pondéral est fait par une bascule équipée d'un bac de pesage d'une capacité permettant d'atteindre au moins 10 % du poids de la gâchée maximale . le dosage volumétrique est fait par une pompe munie d'un débitmètre étalonné et fonctionnant en permanence , un dispositif automatique permet d'envoyer le liant , soit vers l'injecteur , soit vers le circuit de retour . l'introduction du liant est réalisée de manière à ne pas

provoquer son vieillissement ou sa calcination et ce en réglant la position du point d'injection et en évitant les pulvérisations fines .

III.7. Malaxage :

La centrale doit être équipée de dispositif capable de fabriquer des enrobés homogènes. Pour les TSE le malaxage est effectué par l'extrémité du tambour par laquelle le liant est introduit. Pour les centrales continues, le malaxeur à flux continu doit être équipé d'un volet réglable permettant d'ajuster le temps de séjours dans le malaxeur. Pour les centrales discontinues, le malaxeur doit comporter un dispositif permettant de régler le temps de malaxage à blanc et de malaxage avec liant associé à un dispositif de verrouillage interdisant la vidange du malaxeur avant l'écoulement du temps de malaxage global réglé.

III.8. Stockage et chargement des enrobés :

Afin d'éviter la ségrégation de l'enrobé fabriqué lors des chargements des camions , les centrales continues et les TSE sont obligatoirement équipées de trémies anti- ségrégation. Dans les centrales discontinues, le chargement directe est autorisé si la hauteur de chute de l'enrobé est inférieure à 3m . Au cas contraire , une trémie anti-ségrégation est mise en place . si les enrobés sont stockés avant livraison, il doivent l'être dans une trémie de stockage calorifugée.

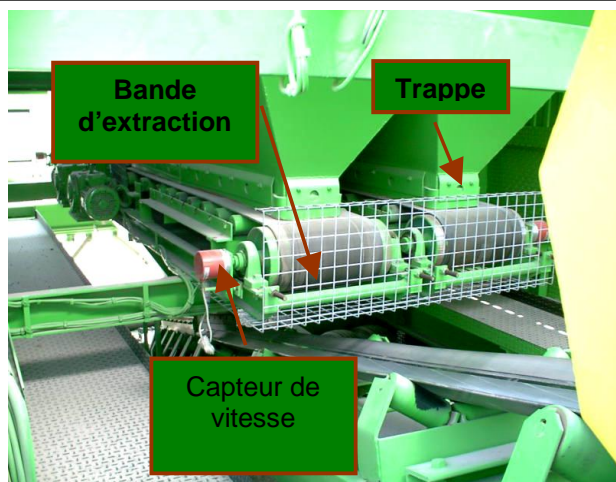
Les planches suivantes illustrent quelques exemples de centrales d'enrobage :



Vue d'une centrale d'enrobage



Vue des stocks et des trémies de granulats



Bande d'extraction

Trappe

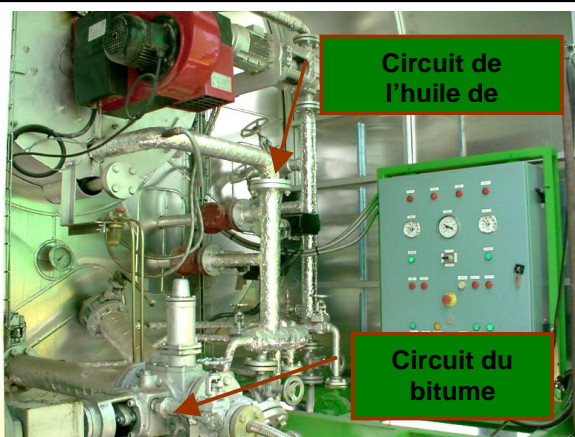
Capteur de vitesse

Vue des doseurs de granulats



Indicateur de niveau

vue de la citerne de stockage de bitume



Circuit de l'huile de

Circuit du bitume

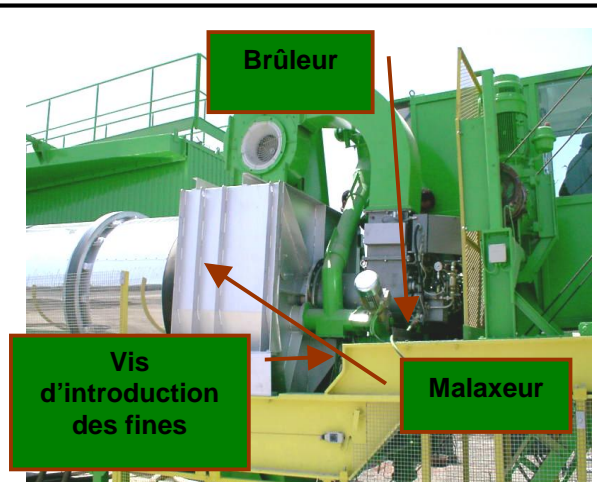
Vue du système de chauffage de bitume



Vue de la pompe doseuse du bitume



Vue du tambour sécheur



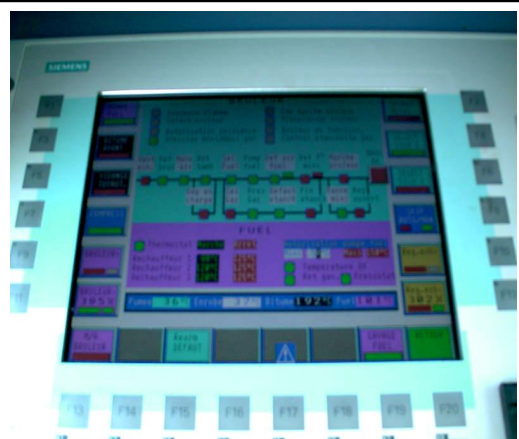
Vue du brûleur et du malaxeur



Vue du filtre dépoussiéreur



Vue de la trémie de stockage des enrobés



Vue du pupitre de commande et de l'écran de contrôle de la centrale

IV. Spécifications sur le matériel de fabrication :

On distinguera deux types de spécifications :

- ✓ Spécifications sur la régularité et les tolérances concernant le produit fabriqué ;
- ✓ Spécifications liées à la technologie du matériel .

IV.1. Spécifications sur les tolérances de fabrication :

Elles sont fixées par les documents contractuels (CPC, CPS ...) . on donnera ci après, celles définies par le CPC du ministère de l'équipement pour un béton bitumineux 0/10 mm :

Désignation	Tolérances
Dosage en bitume	$\pm 2 \%$
Dosage en granulats	$\pm 3 \%$
Dosage en sable	$\pm 5 \%$
Température de l'enrobé à la sortie de la centrale	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Température du bitume	$\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$
Teneur en eau des granulats après séchage	$< 0.5 \%$

IV.2. Spécifications relatives à la technologie du matériel :

De part la technologie des équipements qui les composent, les centrales d'enrobage sont classées ,soit au niveau 1 , soit au niveau 2. Les critères de ce classement sont donnés ci après :

Fonction	Paramètre	Niveau 1	Niveau 2
Stockage et chauffage du liant	Tolérances sur variation de T° du liant Régulation de température	± 10 °C non obligatoire	± 5 °C obligatoire
Stockage et dosage des fines d'apport TSE et C continue	Stockage Dosage Tolérance de dosage	Silos Volum / pondér ± 15 %	Silos Pondéral ± 10 %
Stockage et dosage des fines d'apport C discontinue	Stockage Dosage Tolérance de dosage sur 1 gâchée	Silos Trémie peseuse ± 15 %	Silos Trémie peseuse ± 10 %
Dosage des granulats froids	Dosage gravillons propres et sable roulé Tolérances dosage Dosage sables broyés ou concassés Tolérances dosages	Volumétrique ± 5 % volumétrique ± 10 %	Volumétrique ± 5 % pondéral ± 5 %
Séchage et chauffage des granulats	Précision de mesure de température des granulats	± 5 °C	± 5 °C
Dosage des fines récupérées	Réintroduction	Directe après passage dans une trémie tampon (c continue et discontinue) Directe dans le tambour (TSE)	
Alimentation en granulats chauds du malaxeur (c discontinue)	Tolérance sur le poids total de la gâchée Tolérance sur le poids de chaque fraction granulaire	± 3 % ± 5 %	± 2 % ± 3 %
Introduction et dosage du liant dans le malaxeur	Dosage Tolérances	Volumétrique (tout type de central) ou pondéral (centrale discontinue) ± 2 %	
Automatisme et contrôle	Démarrage séquentiel des doseurs granulats et fines Conjugateurs des doseurs à granulats et fines Mémorisation des formules Contrôle et enregistrement des données de fabrication	Non obligatoire Obligatoire Non obligatoire Non obligatoire	Obligatoire Obligatoire Obligatoire Obligatoire
Automatisme et contrôle Centrales continues	Asservissement du débit du bitume au débit des granulats	Asservissement pompe à bitume à l'alimentateur métallique des granulats	
Automatisme et contrôle TSE	Asservissement du débit du bitume au débit des granulats	Mesure continue du débit des granulats humides et froids avec une précision de ± 2 % Correction d'humidité pour calcul du débit des granulats secs Affichage et correction densité du liant Asservissement pompe à bitume au débit des granulats secs	Mesure continue du débit des granulats humides et froids avec une précision de ± 2 % Correction d'humidité pour calcul du débit des granulats secs Correction automatique du liant en fonction de la T° Asservissement pompe à bitume au débit des granulats secs
Automatisme et contrôle Centrales discontinues	Asservissement des fonctions de déroulement cyclique	Détermination des séquences	Enregistrement et détermination des séquences

V. Réglage d'une centrale d'enrobage :

V.1. Réglages périodiques :

Il s'agit des réglages rentrant dans le cadre de la maintenance périodique de la centrale d'enrobage ,effectués généralement toutes les 1000 heures de travail ou à l'occasion d'un transfert de la centrale. Ces réglages comportent :

- Le rétablissement de l'état mécanique de la centrale , réalisé conformément aux instructions du constructeur;
- Le calibrage et l'étalonnage des différents équipements de mesure, réalisés par un organisme compétent en matière de métrologie ou à défaut, conformément à des procédures de vérification préalablement établies et validées.

V.2. Réglages pour la fabrication d'une composition donnée :

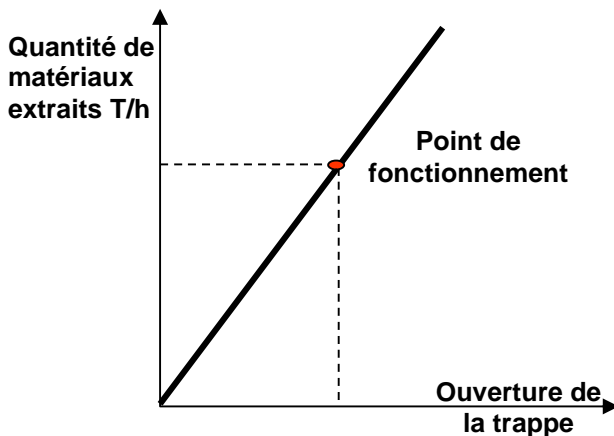
Il s'agit d'effectuer les différentes opérations nécessaires pour faire fabriquer à la centrale un enrobé bitumineux issu d'une étude de formulation préétablie . Ces réglages supposent que tous les organes de la centrale sont en bon état de fonctionnement et que les informations qu'ils affichent et les mesures qu'ils effectuent sont fiables. Les opérations à effectuer dans ce cas sont les suivantes :

V.2.1. Réglage des pré-doseurs à granulats :

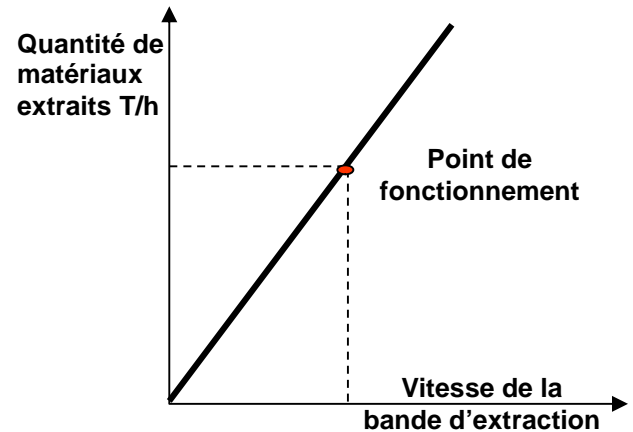
Le réglage du pré-doseur consiste à déterminer, pour une vitesse donnée de la bande transporteuse, le poids de matériau transporté pendant une unité de temps , en fonction de la hauteur de la trappe d'ouverture de la sortie de la trémie. On trace une courbe à vitesse constante, donnant la quantité de matériau sec en fonction de la hauteur de la trappe. A partir de cette droite on extrapole la hauteur à régler pour obtenir la quantité de matériau voulue en tenant compte du débit global de la centrale d'enrobage . Dans certaines trémies, la hauteur de la trappe est fixe ou

prédéterminées. Dans ce cas , on procède comme précédemment mais en faisant varier la vitesse de la bande transporteuse .

Ces réglages doivent tenir compte de la teneur en eau des granulats, particulièrement, les sables afin de ramener les dosages aux proportions de matériaux secs.



Réglage à vitesse constante de la bande d'extraction



Réglage à ouverture fixe de la trappe de la trémie d'alimentation

Ces réglages doivent respecter les tolérances de dosages en granulats, a savoir :

± 3 % pour les gravettes

± 5 % pour les sables .

V.2.2. Réglage du dosage des fines d'apport :

Les fillers sont contrôlés par mesure pondérale qu'ils proviennent de silos de fillers d'apport ou de silos de récupération des fines par le filtre dépoussiéreur . l'extraction se fait généralement par vis peseuse déversant sur un tapis également peseur. Le réglage du débit désiré doit se faire par le filler approvisionné et consiste à tracer la droite donnant le poids sec de fines en fonction de la vitesse de la vis. Le point de fonctionnement correspondant au pourcentage de fines prévu dans le mélange minéral est déterminé à partir de cette courbe .

V.2.3. Réglage du sécheur :

La température des granulats est fonction des débits des granulats, du temps de présence dans le sécheur et du réglage du brûleur. La température maximale à ne pas dépasser est de 180 °C et la température minimale est celle exigée pour la classe de bitume utilisée . des mesures de températures sont effectuées par le thermomètre situé à la sortie du sécheur et celui situé dans la trémie tampon . ces mesures doivent respecter les tolérances sur la température des granulats : pour une série de mesures T_i (mesures faites sur une journée) on calcule la moyenne T_m et on vérifie que $T_i - T_m < \pm 5 \text{ °C}$.

V.2.4. Réglage du bitume :

Pour ce qui est des températures du bitume , les spécifications prévoient les plages d'utilisations suivantes :

- Bitume 80/100 : 130 à 140 °C
- Bitume 60/70 : 140 à 150 °C
- Bitume 40/50 : 150 à 160 °C

Pour les centrales continues et TSE , le dosage en bitume est généralement volumétrique est asservi à l'approvisionnement en granulats . lorsque ce type de centrales est équipé de débitmètre à bitume, on calcule le débit horaire et on le compare à celui des granulats. Sinon on fait débiter la pompe à bitume dans une cuve qu'on pèse par la suite.

Pour les centrales discontinues, on récupère dans une cuve le bitume destiné à la fabrication d'une gâchée qui doit être pesé et rapporté au poids total de la gâchée. Ces réglages doivent satisfaire les tolérances sur le dosage en bitume qui sont de $\pm 2 \%$.

V.2.5. Réglage du malaxage :

Le malaxage doit être réglé pour éviter des problèmes de ségrégation et assurer un enrobage satisfaisant des granulats. Le réglage porte essentiellement sur le temps de malaxage qui dépend de la nature des granulats à enrober et du dosage en liant. Au cours des essais de la centrale, on effectuera plusieurs prélèvements d'enrobés sur lesquels on détermine le pourcentage de liant et la courbe granulométrique du mélange minéral. Ces essais doivent conduire à un dosage en liant homogène ($\pm 2\%$) et des courbes granulométriques régulières et inscrites dans le fuseau de spécifications .

VI. Essais préliminaires à la fabrication :

Au cours des essais de la centrale et avant le démarrage effectif de la fabrication, on procède à des prélèvements d'enrobés sur lesquels on exécute toute la gamme des essais prévus au contrôle normal à savoir :

- Le dosage en liant ;
- La granulométrie du mélange minéral ;
- La température à la sortie du malaxeur ;
- La température à la sortie de la centrale ;
- L'essai Marshall ;
- L'essai Duriez , LCPC.

Ces essais devront satisfaire à toutes les spécifications prévues par les documents contractuels et constituent un moyen de vérification des réglages effectués.

D'autre part, on effectuera au moyen d'un pont bascule, des pesées du produit fabriqué pour s'assurer que le débit de la centrale est bien celui pour lequel les réglages ont été effectués .

VII. Suivi de la fabrication :

Le suivi de la fabrication consiste en une série de mesures et d'essais à effectuer pour s'assurer que l'enrobé fabriqué satisfait à tout moment , les spécifications contractuelles. Ce suivi porte essentiellement sur :

VII.1.1. Le suivi des températures :

Quelque soit le type de centrale (thermomètres enregistreurs ou à affichage directe) une lecture de température est effectuée toutes les heures :

- Dans le circuit d'alimentation de bitume ;
- A la sortie du sécheur ;
- A la trémie tampon ;
- A la trémie de stockage.

Les résultats obtenus doivent être exploités pour la vérifications des tolérances sur la température du bitume et celle des granulats. En cas d'anomalies, il sera procédé à la vérification du réglage du brûleur et du circuit de chauffage du liant .

VII.1.2. Le suivi des teneurs en eau :

Les teneurs en eau des granulats , en particulier celle des sables doivent être suivies pour effectuer les corrections nécessaires aux débit des prédoseurs . les spécifications prévoient une mesure de teneur en eau par jour et par classe granulaire ainsi qu'une mesure de teneur en eau des granulats séchés pour tous les 500 tonnes de matériaux enrobés . Ces mesures doivent être renforcées dans le cas de conditions climatiques instables ou lorsque l'état hydrique des granulats approvisionnés n'est pas homogène.

VII.1.3. Le suivi de la régularité du produit enrobé :

Ce suivi se fait à travers les prélèvements effectués à la sortie de la centrale d'enrobage ou sur les camions d'approvisionnement du chantier. Ces prélèvements sont effectués sur des lots de 500 tonnes ou par journée de production. Ils serviront pour la détermination de la teneur en liant et de la granulométrie du mélange minéral. En plus de la conformité de ces paramètres aux spécifications contractuelles, le jugement de la régularité est fait en s'assurant des conditions suivantes :

Teneur en liant	Granulométrie du mélange minéral		
	Passants au tamis de : (en mm)		
	0.08	2	6.3
$\pm 2 \%$ du dosage visé	$\pm 1 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 5 \%$
	Tolérances définies autour du pourcentage prévu à chaque tamis		

Ce n'est qu'après 3 à 4 jours continus de non respect de ces fourchettes dans le contrôle journalier que l'on décidera que la fabrication n'est pas conforme et qu'il est nécessaire de procéder à de nouveaux réglages de la centrale . lorsque on dépasse le double de ces tolérances , la centrale doit être immédiatement arrêtée pour effectuer les réglages nécessaires .

VII.1.4. Contrôle de réception :

Les contrôles de réception de la fabrication des bétons bitumineux consistent à vérifier les performances mécaniques au moyen des essais Marshall et LCPC. La cadence de réalisation de ces essais est la suivante :

- 1 essai Marshall tous les 500 T et au minimum un essai par jour ;
- 1 essai LCPC tous les 2000 T .

Le jugement de la conformité des essais de réception est fait sur un minimum de 16 valeurs qui seront comparés aux critères suivants :

Nature du produit		Béton bitumineux 0/10		
Classe du bitume		80/100	60/70	40 /50
Résistance LPC en bars	80 % des valeurs	> 50	> 55	> 60
	95 % des valeurs	--	> 50	> 55
Stabilité Marshall en Kg	80 % des valeurs	> 950	> 1000	> 1000
	95 % des valeurs	--	> 900	> 900

quatrième partie

Mise en oeuvre des Bétons bitumineux

Dans cette partie, on traitera l'organisation et le contrôle de la mise en œuvre des bétons bitumineux.

I. Transport des enrobés bitumineux :

Le transport des matériaux enrobés est un facteur essentiel de la réussite d'un chantier. A cet effet, un parc suffisant de camions est mis à disposition pour, compte tenu de la durée du trajet, assurer avec régularité l'évacuation de la production du poste d'enrobage et l'alimentation de l'atelier de répandage. Les camions doivent être à benne métallique qui doivent être nettoyés de tout corps étranger (y compris le reste refroidis des enrobés) avant chaque chargement. Les bennes doivent être lubrifiées avant utilisation avec un produit anti-adhérent . L'emploi produits pouvant dissoudre le bitume pour lubrification (fuel, gasoil) est interdite. En plus, les camions de transport des bétons bitumineux doivent :

- ✓ Présenter des caractéristiques qui les rendent aptes à déverser leur chargements dans le matériel de répandage en évitant au maximum les risques de ségrégation .
- ✓ Etre équipés d'une bâche capable de protéger les enrobés et d'empêcher leur refroidissement .
- ✓ Etre équipés d'un dispositif d'identification .
- ✓ Lors du chargement des camions, les enrobés doivent être régulièrement répartis dans la benne afin d'éviter la ségrégation au cours du transport .

II. Préparation du support :

Avant mise en œuvre des bétons bitumineux , le support devant les recevoir nécessite certaines préparations. La nature des préparations à effectuer dépend de la nature et de l'état du support.

Cas de revêtement de chaussée neuve :

Un bon profil et une bonne portance doivent être obtenus. Le support doit recevoir une couche d'accrochage en émulsion cationique de bitume . Le dosage en bitume résiduel dépend de l'état du support et de la technique de l'enrobé utilisé .

Cas d'ancienne chaussée :

Immédiatement avant la mise en place de la couche de béton bitumineux, il sera procédé au :

- ✓ Balayage et grattage mécanique ou manuel de la surface à traiter et éventuellement un soufflage à l'air comprimé ;
- ✓ Brûlage des plaques de ressuage et des bandes de signalisation horizontale , en cas d'application de couches minces d'enrobés ;
- ✓ En cas de déformations importantes du support, il set procédé au reprofilage préalable au moyen d'enrobés à chaud ou à froid . Ces matériaux doivent être suffisamment compactés pour assurer la stabilité de la couche supérieure.
- ✓ La réalisation des travaux de mise à niveau de la chaussée qui consistent, selon les cas, à surélever les regards, les bouches de canalisations et éventuellement les bordures de trottoirs ou bien les accotements en ras compagne ;
- ✓ Mise en place d'une couche d'accrochage.

	
<p>Mise en œuvre d'une couche d'accrochage en émulsion de bitume</p>	<p>Mise en œuvre d'une couche de reprofilage en enrobés à chaud au moyen d'une niveleuse</p>

III. Répandage des bétons bitumineux :

La mise en œuvre des bétons bitumineux est effectuée de manière à éviter la ségrégation et à respecter les caractéristiques fixées de géométrie, d'uni, de pourcentage de vides et d'adhérence .

Le répandage des bétons bitumineux ne se fait que lorsque l'état de surface de la chaussée et les conditions météorologiques sont compatibles avec une bonne exécution des travaux et une bonne tenue de ceux ci .

III.1. Méthodes et matériel de répandage :

D'une façon générale, les bétons bitumineux sont mis en œuvre au moyen d'un finisseur . Le répandage à la niveleuse n'est autorisé que pour :

- ✓ L'exécution de reprofilage sur chaussées déformées avant exécution de la couche de roulement au finisseur,
- ✓ Le répandage de bétons bitumineux fins ,
- ✓ Le répandage des enrobés bitumineux en quantités limitées et sur des chantiers isolés et de longueur réduite.



Vues montrant la mise en œuvre de bétons bitumineux au moyen de finisseurs

III.2. Répandage :

III.2.1. Température et types de répandages :

Température de répandage : la température de répandage est fixée de façon à garantir les objectifs fixés (pourcentage de vides, uni, adhérence) et d'assurer la régularité de l'épaisseur et de la qualité de la couche. La température minimale de répandage dépend de la classe de bitume utilisé :

Classe de bitume	80/100	60/70	40/50
Température minimale °C	120	130	135

Ces températures sont majorées de 10 °C en cas de pluie ou en arrière saison. La mesure de la température de l'enrobé en cours de répandage est mesurée dans la trémie ou dans la chambre de répartition du finisseur.

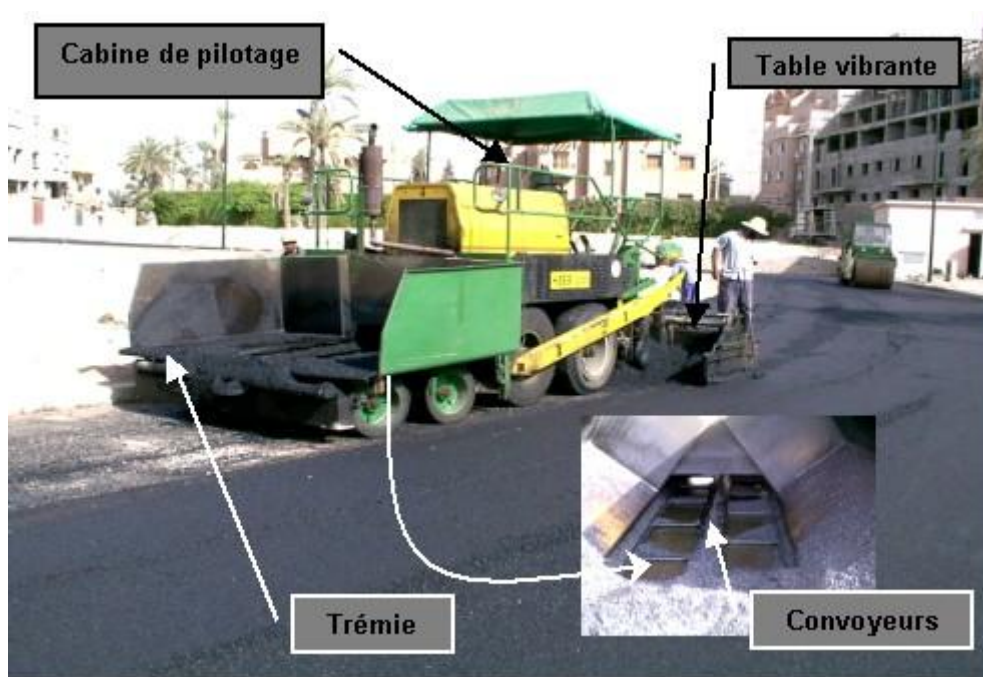
Répandage manuel : le répandage manuel est autorisé pour les endroits inaccessibles aux engins mécaniques (angles, près des regards ...) . il doit se faire de façon à éviter la ségrégation du matériau mis en œuvre et d'assurer l'épaisseur de la couche après compactage.

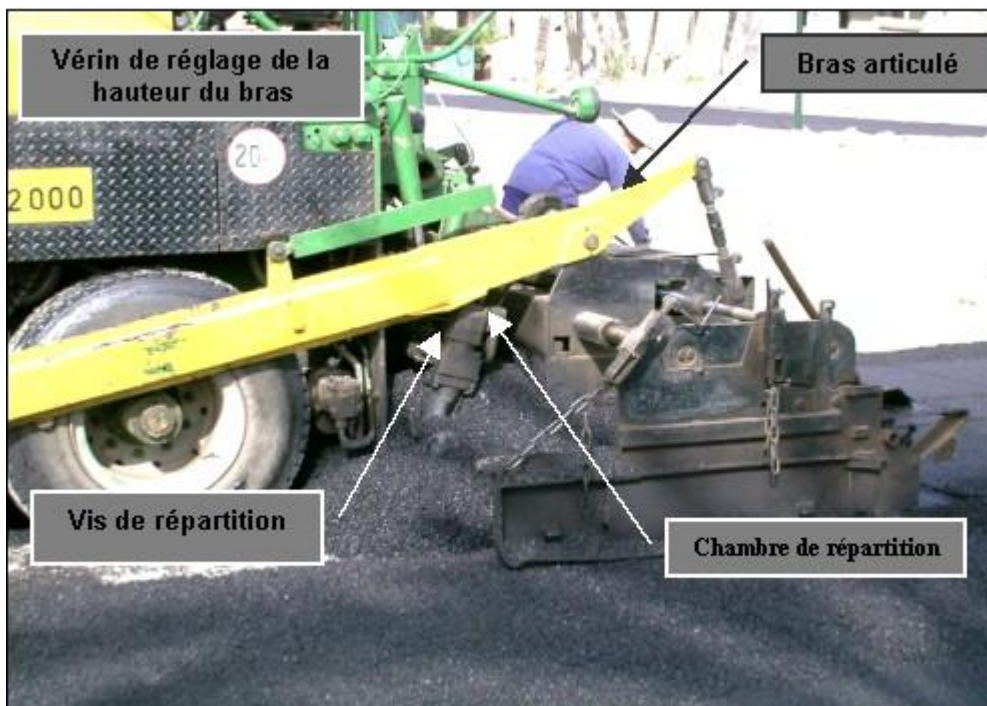
Répançage à la niveleuse : en cas de répançage des enrobés à la niveleuse, ils sont déposés devant celle ci en cordon de section uniforme et d'une longueur n'excèdent pas 100 m . La lame de la niveleuse est sensiblement perpendiculaire à la direction de déplacement et comporte des articulations pour pouvoir épouser le bombement de la chaussée . La lame doit comporter, aussi, des volets latéraux pour accumuler l'enrobé devant celle ci .

Répançage au finisseur : un finisseur est un engin comportant un train moteur sur chenilles ou pneus et :

- Portant un système d'alimentation en matériaux avec trémie de réception et vis de répartition transversale,
- Tirant par deux bras articulés un outil de réglage de la couche formé d'une table s'appuyant sur le matériau. Cette table comporte des vibreurs et est équipée de dispositif de chauffage .

La largeur de travail peut être modifiable en marche. La hauteur des bras par rapport au tracteur peut être ,soit commandée manuellement soit fixe (travail à vis calée) soit à commande automatique (travail guidé).





Les équipements essentiels dans un finisseur sont :

- Une trémie d'alimentation équipée de convoyeurs
- Une chambre de répartition équipée d'une vis de répartition hélicoïdale
- Une table de pré-compaction équipée de vibreurs et chauffée .cette table peut être extensible
- Des palpeurs permettant un remplissage correcte de la chambre de répartition
- Des dispositifs de guidage
- Des dispositifs de réglage de la hauteur des bras par rapport au tracteur.

La nature et la disposition des éléments constitutifs de la table vibrante doivent répondre aux exigences du profil en travers et de la largeur à répandre . la fréquence des vibreurs et leurs positions sont réglés en liaison avec la vitesse de travail pour obtenir un niveau satisfaisant de pré-compaction compatible avec l'épaisseur répandue . le bas de la vis de répartition est positionné au dessus de l'épaisseur moyenne à répandre . l'automate d'alimentation est réglé de manière à maintenir le niveau de l'enrobé au dessus de l'axe et au dessous du haut de la vis. La table vibrante ne doit pas laisser de trace sur la surface de l'enrobé mis en œuvre.

Les modes de guidage possibles avec un finisseur sont :

- **Vis calée** : les hauteur des articulation des bras par rapport au tracteurs sont fixes .
- **Guidage manuel** : les hauteurs des articulations des bras sont commandées manuellement .
- **Guidage court** : les hauteurs des articulation des bras sont guidées par une roulette ou ski court.
- **Guidage à référence mobile** : la hauteur des articulations est guidée par une poutre de longueur supérieure à 11 m .
- **Guidage référence fixe** : les hauteurs des articulations sont guidées par un fil ou un rayon laser .

D'une façon générale, le répannage des bétons bitumineux pour couche de roulement est effectué avec un guidage vis calée ou un guidage court dans le cas de raccordement de pentes .

III.2.2. Etablissement du plan de répannage :

Le plan de répannage définit les conditions de réalisation du répannage au plan géométrique : nombre d'engins de répannage, largeur et longueur de bandes , ordre et sens de réalisation des diverses bandes. Il est étudié de manière :

- A limiter la longueur totale des joints longitudinaux et transversaux ;
- A limiter au maximum les zones où il faut recourir à une mise en œuvre avec de petites largeurs ou à une mise en œuvre manuelle ;
- A conserver, au maximum , les qualités générales de la couche mise en œuvre.

III.2.3. Exécution des joints longitudinaux :

Le joint longitudinal d'une couche ne doit jamais se trouver superposé au joint longitudinal de la couche immédiatement inférieure . pour cela on adopte un décalage d'au moins 20 cm entre joints . De plus le joint longitudinal de la couche de roulement doit se trouver le plus possible au voisinage des bandes de signalisation pour éviter qu'il se trouve sous le passage des roues. Le répannage de la nouvelle bande est conduit de façon à recouvrir d'au moins 2 cm le bord longitudinal de la bande adjacente. Les enrobés recouvrant l'ancienne bande sont soigneusement éliminés par la suite. Dans le cas de finisseurs travaillant en parallèle , la distance entre eux ne doit en aucun cas excéder 20 m .

III.2.4. Exécution des joints transversaux de reprise :

Les joints transversaux des différentes couches sont décalés d'au moins 1 m . Lors de chaque reprise, le bord de l'ancienne bande est coupé sur toute son épaisseur de façon à exposer une surface fraîche. Cette coupe est pratiquée pour

éliminer la partie en biseau augmentée d'au moins 50 cm . La surface dégagée par cette découpe est enduite à l'émulsion de bitume , juste avant la mise en place de la nouvelle bande .

III.3. Compactage :

Le compactage a pour objectif d'amener le matériau répandu au pourcentage de vides permettant d'obtenir les performances souhaitées, tout en conservant les caractéristiques superficielles (uni et adhérence) compatibles avec la sécurité et le confort de l'utilisateur.

Le compactage est réalisé par un atelier formé de divers engins de compactage agissant dans un ordre déterminé et selon un plan de balayage de la surface à compacter . le matériel utilisé peut être des compacteurs à pneumatiques ,des compacteurs vibrants ou des compacteurs statiques lisses . Pour les zones difficiles d'accès , le compactage est réalisé par des dames ou des plaques vibrantes de dimensions adaptées .



Vue montrant un atelier de compactage comportant des compacteurs à pneus et un compacteur vibrant lisse.

III.3.1. Atelier de compactage :

III.3.1.1. Caractéristiques des compacteurs :

Les caractéristiques principales des compacteurs à prendre en compte sont :

- La largeur unitaire de compactage
- La charge statique transmise à l'enrobé
 - ✓ Charge par roue et pression de gonflage pour les compacteurs à pneus ;
 - ✓ Masse par centimètre de génératrice des cylindres vibrants ou statiques ;
 - ✓ Pression statiques des plaques vibrantes .
- Les caractéristiques de vibration d'un engin vibrant : fréquence et moment excentrique .

III.3.1.2. Choix de l'atelier de compactage :

L'atelier de compactage doit permettre d'amener l'enrobé aux performances souhaitées dans un délais compatible avec le refroidissement de l'enrobé après mise en œuvre. Ils sont équipés de dispositifs empêchant le collage des enrobés aux roues ou aux billes .

III.3.1.3. Réglages de l'atelier de compactage :

Ces réglages sont effectués en début de chantier et porte sur :

- Pour les compacteurs à cylindres vibrants et bandage lisse :
 - ✓ Masse par longueur de génératrice ,
 - ✓ Moment d'excentricité,
 - ✓ Fréquence de vibration,
 - ✓ Vitesse de translation.

- Pour les compacteurs à pneus :
 - ✓ Charge par roue,
 - ✓ Pression de gonflage des pneus ,
 - ✓ Vitesse de translation.

- Pour l'atelier de compactage :
 - ✓ L'ordre d'intervention des engins et le nombre de passe de chaque engin,
 - ✓ Le plan de balayage de chaque engin,
 - ✓ Les distances minimales et maximales entre le finisseur et les compacteurs : pour les compacteurs à pneumatiques il faut veiller à conserver une température de surface des pneumatiques suffisante . Pour cela il faut éviter d'arroser les roues et les protéger du vent par des jupes. En ce qui concerne les compacteurs à cylindre lisse, les billes sont munies de dispositif d'arrosage efficace .

III.3.1.4. Modalités de compactage :

Les modalités de compactage sont définies par la réalisation de planches d'étalonnage .

III.3.2. Planches d'étalonnage :

Une planche d'étalonnage a pour objectifs de fixer les modalités de mise en œuvre des enrobés bitumineux, en particulier , la composition de l'atelier de compactage et son fonctionnement : charge, plan de balayage, vitesse d'avancement , pression de gonflage , intensité de vibration, température de l'enrobé ...etc.

Une planche d'étalonnage peut être soit :

Une planche de vérification : qui permet de vérifier le bon fonctionnement du matériel et que la composition et l'emploi de l'atelier initialement choisis permettent d'atteindre une compacité du béton bitumineux conforme aux exigences contractuelles . Ce cas correspond à des chantiers où l'on met en œuvre des enrobés déjà utilisés avec succès et avec un atelier identique ou similaires lors d'un chantier antérieur.

Une planche d'essais : qui permet de contrôler le bon fonctionnement du matériel et déterminer la composition et les modalités de l'emploi de l'atelier de compactage en surveillant l'évolution de la courbe de compactage de l'enrobé . les modalités d'emploi sont celles qui permettent d'aboutir, de la façon la plus optimale, aux compacités conformes aux documents contractuels . Ce cas correspond aux chantiers où l'on met en œuvre de nouvelles formules d'enrobés ou des formules déjà utilisées mais avec un atelier ou une épaisseur différents . La planche consiste en plusieurs planches unitaires où l'on fait varier un ou deux paramètres de fonctionnement de l'atelier, le plus souvent, le nombre de passes d'un compacteur.

Une planche de référence : qui permet d'établir ,au début de chantier, une population de compacités de référence qui va servir pour le contrôle ultérieur du chantier.

III.3.3. Méthodologie de réalisation d'une planche d'étalonnage :

Connaissant le volume de matériaux à mettre en œuvre et la distance entre le chantier et la station d'enrobage, on élabore un projet de mise en œuvre prévoyant les moyens de transport (type et nombre) , les moyens de répannage (nombre de finisseurs et largeur de répannage) et les moyens de compactage (nombre et type d'engins) . La conception d'une planche d'étalonnage peut alors se dérouler en suivant trois étapes principales :

III.3.3.1. Préparation de la planche d'étalonnage :

Cette préparation consiste à définir un programme d'essais en commun accord avec l'administration . Ce programme porte sur :

- Le choix du type de la planche à exécuter,
- Situer l'emplacement de la planche à réaliser,
- Définir le programme d'essai de laboratoire.

Choix du type de la planche : il s'agit de définir s'il faut réaliser une planche de vérification ou une planche d'essais .

Choix du site de la planche : la planche d'étalonnage doit être réalisée sur une section représentative des conditions et de l'état moyen du chantier (déformabilité, état de surface, éloignement de la centrale d'enrobage, conditions de circulation ...etc.) . D'un point de vue géométrique, chaque planche unitaire doit présenter des dimensions minimales compatibles avec les conditions de fonctionnement normales de l'atelier de répandage et celui de compactage et d'assurer la surface minimale nécessaire à la réalisation des essais de laboratoire.

Programme des essais de laboratoire : ce programme consiste essentiellement en la réalisation des essais suivants :

- ✓ La mesure des températures de l'enrobé,
- ✓ Le prélèvement d'échantillons d'enrobé pour la réalisation des essais Marshall, LCPC, teneur en bitume et granulométrie du mélange minéral,
- ✓ Le relevé de l'épaisseur de la couche réalisée,
- ✓ La mesure de compacités (cas de la planche de vérification),
- ✓ Suivi de l'évolution des compacités en fonction du nombre de passes des compacteur (cas de la planche d'essai),
- ✓ Relevé des caractéristiques des engins de répandage et de transport,
- ✓ Relevé des caractéristiques des engins de compactage.

III.3.3.2. Exécution de la planche d'étalonnage :

L'exécution de la planche d'étalonnage est réalisée en présence de l'administration et du laboratoire chargé du contrôle du chantier. Elle consiste à réaliser le programme de mise en œuvre arrêté lors de la première étape . Le laboratoire procède au contrôle de tous les paramètres d'exécution , en particulier , les mesures de températures, de compacités et de l'épaisseur de la couche après finition.

Atelier de répannage : pour l'atelier de répannage , il faut fixer les paramètres suivants :

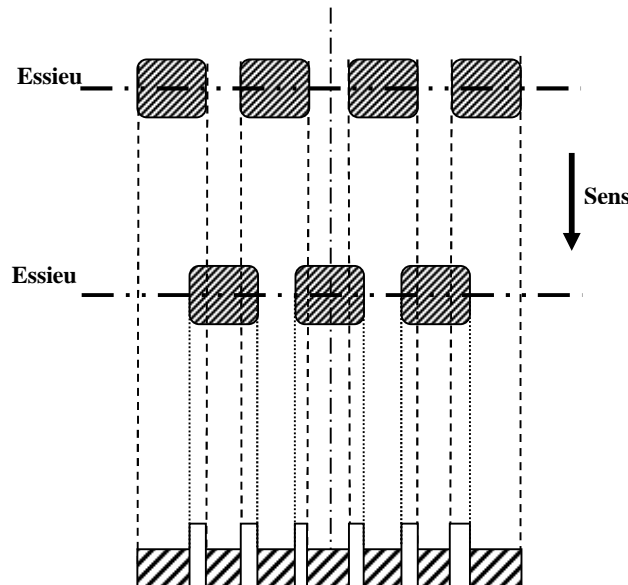
- ✓ L'épaisseur de la couche compactée,
- ✓ La largeur de répannage : le répannage peut se faire par demi-largeur ou en pleine largeur au moyen de deux finisseurs. Pour les finisseurs, il faut que les dimensions de la table soit compatibles avec la largeur de répannage (extension éventuelle des vis et des tables) .
- ✓ La vitesse d'avancement : la vitesse d'avancement doit être maintenue constante afin d'assurer un bon uni de la couche,
- ✓ Le niveau de l'enrobé dans la chambre de répartition : ce niveau doit être maintenu constant ,
- ✓ La fréquence de vibration de la table : la fréquence de vibration de la table doit être maintenue constante . On adopte , en général , la fréquence maximale des vibreurs.
- ✓ L'épaisseur de répannage : l'épaisseur de l'enrobé après répannage et pré-compactage doit être de 1.20 à 1.25 fois l'épaisseur finale visée .

Atelier de compactage : selon l'apport de chaque engin dans l'opération de compactage , on distinguera :

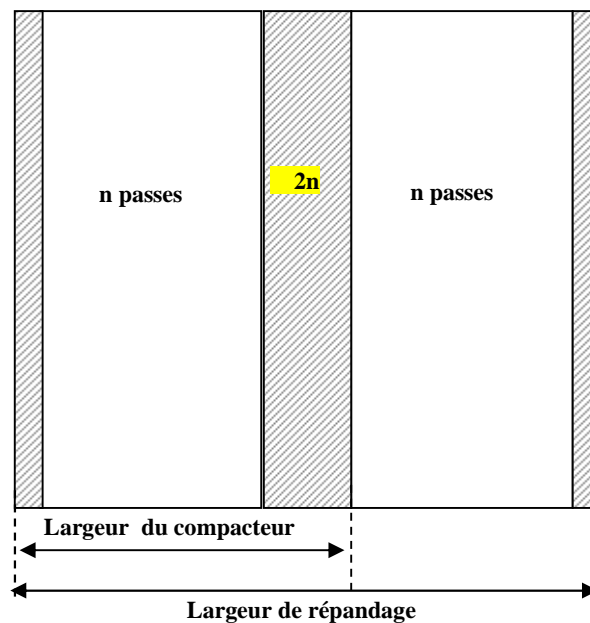
- ✓ Le compacteur principal : c'est l'engin qui effectue l'essentiel du compactage de la couche . dans le cas des bétons bitumineux, le compacteur principal est souvent un compacteur à pneus ou un compacteur mixte vibrant.

- ✓ Le compacteur de finition : c'est l'engin qui procède à la finition de la couche pour éliminer les traces du compacteur principal et donner l'uni nécessaire à la couche compactée. Généralement , l'engin de finition est un compacteur à cylindre lisse de 6 à 10 tonnes .

On précisera pour chaque engin, l'ordre d'intervention, la largeur de l'engin et le plan de balayage défini sur la base du diagramme de couverture de l'engin .



Exemple de diagramme de couverture d'un compacteur à pneus



**Exemple de diagramme de balayage d'un compacteur :
L compacteur > 1/2 L finisseur**

Le plan de balayage de chaque engin (essentiellement l'engin principal) doit être organisé de telle façon que l'on connaisse avec précision, le nombre de passes de l'engin en tout point de la surface de la planche.

Le choix de la zone utile pour les essais de laboratoire doit porter sur celle qui représente une aire homogène correspondant à un nombre connu et minimum de passes de l'engin principal de compactage. On évitera les zone de recouvrement et de non recouvrement de l'engin ainsi que les bords de la planche .

III.3.3.3. Essais de laboratoire :

Mesure des températures : durant la réalisation de la planche d'étalonnage des mesures de températures doivent se faire régulièrement :

- ✓ Dans les camions d'approvisionnement,
- ✓ Dans la trémie ou derrière la table du finisseur ,
- ✓ Au niveau du tapis depuis le début du compactage jusqu'à sa fin.

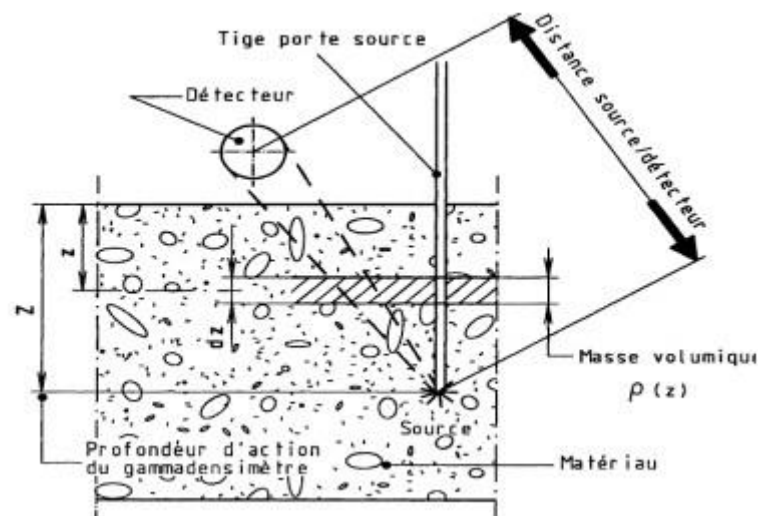
Contrôle de compactage : le contrôle de compactage porte sur

- ✓ La mesure de la vitesse des compacteurs,
- ✓ La vérification du respect du plan de balayage prédéfini et la détermination du nombre de passe au niveau des zones utiles,
- ✓ La mesure des densités.

Les mesures de densités effectuées doivent permettre de juger l'évolution des compacités en fonction du nombre de passe (cas de la planche d'essai) et de juger la compacité atteinte par référence à la densité de référence obtenue par l'essai LCPC lors de l'étude de formulation de l'enrobé mis en œuvre. Le nombre minimal de mesures à effectuer est de 20 par planche unitaire. Les mesures sont faites par carottage ou par la méthode du gamma densimètre .



Vue montrant le carottage d'une couche d'enrobé



Principe de mesure de densité par la méthode du gamma densimètre

Mesures des épaisseurs : elles sont effectuées sur les 20 carottes prélevées . l'épaisseur à retenir pour une carotte est la moyenne de trois mesures réparties sur le pourtour de celle-ci .

Jugement du compactage :

Le jugement du compactage est fait à travers l'analyse des compacités obtenues sur la planche d'étalonnage (rapport de la densité de la carotte ou lue au gamma densimètre à la densité de référence LCPC de l'étude de formulation) . deux types de traitements sont possibles :

- Traitement statistique : sur les vingt mesures effectuées, on détermine la moyenne m et l'écart type σ des compacités. On détermine la valeur inférieure probable à 95 % par la formule :

$$C_{95\%} = m + 1.64 \cdot \sigma$$

On détermine ,aussi, la valeur minimale absolue des 20 compacités C_{\min} .

Traitement ponctuel : (valable dans le cas de carottage) on classe les 20 compacités obtenues par ordre décroissant et on dégage les valeurs :

- $C_{n^{\circ}19}$, correspondant à 95 % des valeurs
- $C_{n^{\circ}20}$, correspondant à la valeur minimale.

Le compactage est déclaré satisfaisant si :

- $C_{95\%} \geq 100 \%$ et $C_{\min} \geq 95 \%$ (traitement statistique)
- $C_{n^{\circ}19} \geq 100 \%$ et $C_{n^{\circ}20} \geq 95 \%$ (traitement ponctuel)

On distingue alors deux cas :

Cas de la planche de vérification : lorsque le compactage est jugé satisfaisant, selon les critères sus définis, les modalités de réalisation de la planche sont retenues pour la suite du chantier. Dans le cas contraire, une nouvelle planche doit être réalisée en apportant les modifications nécessaires aux paramètres de la planche et en suivant la même méthodologie.

Cas de la planche d'essais : on retient pour la poursuite du chantier la planche unitaire qui a abouti à un compactage satisfaisant aux critères sus mentionnés .

Les résultats d'une planche d'essais font l'objet d'un rapport détaillé qui rappelle l'ensemble des paramètres fixés concernant la préparation du support, le matériel de transport, de répannage et de compactage de l'enrobé, le fonctionnement de l'ensemble de ces ateliers , les résultats et les conclusions des essais de laboratoire. En plus, la réussite d'une planche doit être , également, jugé par l'uni , l'adhérence et l'état de surface de l'enrobé après compactage .

III.4. Contrôle de la qualité de mise en œuvre :

Le contrôle de la qualité de mise en œuvre des bétons bitumineux porte sur les points suivants :

- ✓ La vérification des moyens de transport,
- ✓ La mesure des températures de l'enrobé, dans les camions et dans la trémie du finisseur,
- ✓ La vérification de l'application des modalités de répannage et de compactage définies lors de la planche d'étalonnage ,
- ✓ Le suivi de la fabrication de l'enrobé par la centrale d'enrobage,
- ✓ La réalisation des essais de réception de la mise en œuvre .

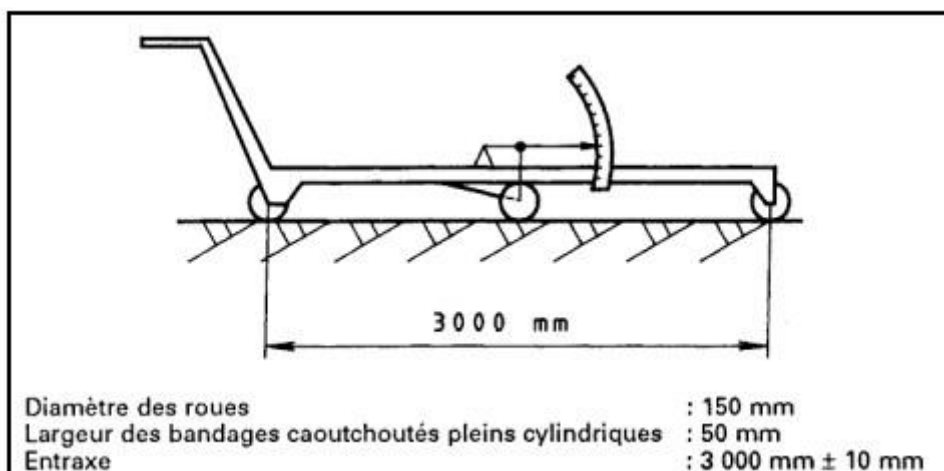
Les essais de réception de la mise en œuvre consistent essentiellement en :

La réalisation du contrôle de compactage : ce contrôle est réalisé par la méthode du carottage direct ou par le gamma densimètre . les essais par carottage sont implantés tous les 250 m avec un minimum de 20 mesures ,quelque soit la longueur du chantier. Les mesures par le gamma densimètre sont à grand débit est sont implantées en général tous les 30 m. Les densités obtenues sont comparées à la densité de référence LCPC et les compacités correspondantes sont traitées soit statistiquement, soit par un traitement ponctuel . Les critères de conformités du compactage sont alors :

- $C_{95\%} \geq 100 \%$ et $C_{\min} \geq 95 \%$ (traitement statistique)
- $C_{n^{\circ}19} \geq 100 \%$ et $C_{n^{\circ}20} \geq 95 \%$ (traitement ponctuel)

Mesure des épaisseurs : les mesures des épaisseurs de la couche mise en œuvre sont effectuée sur les carottes ayant servi au contrôle de compactage. Les épaisseurs mesurées sont alors .

Contrôle de l'uni : ce contrôle vise à relever en continu les variations du profil longitudinal de la couche par rapport à son profil en long moyen . Cette qualité est appréciée au moyen d'une série de mesures par un analyseur dynamique de profil en long.



Exemple d'un analyseur dynamique de profil

Contrôle d'adhérence : les caractéristiques d'adhérence sont évaluées au moyen de deux paramètres :

- **Macro-texture** : elle est mesurée par la hauteur au sable vraie (HSv) . cette mesure est réalisée le plus rapidement possible, après la mise en œuvre et dans un délais inférieur à deux semaines . les mesures sont implantées tous les 20 m et sont réalisées sur chaque voie de circulation. Les spécifications de macro-textures sont fixées en fonction du type de chaussée (route nationale, autoroute ...) de leur localisation (voie urbaine , ras compagne) du trafic et de la nature de l'enrobé mis en œuvre. Il peut s'agir de valeurs exigibles immédiatement après la mise en œuvre ou de valeurs minimales à respecter pendant un temps déterminé . L'essai de hauteur au sable consiste à mesurer la hauteur moyenne de la texture de la surface de l'enrobé par le remplissage des creux par un volume de sable normalisé.
- **Coefficient de frottement** : il s'agit du coefficient de frottement longitudinal (CFL) et du coefficient de frottement transversal (CFT) . les mesures sont réalisées après 3 à 12 mois de la mise en œuvre .

III.5. Régénération en place des bétons bitumineux :

Les procédés de régénération en place des bétons bitumineux se caractérisent par la réutilisation totale ou partielle de l'enrobé en place en associant dans le même matériel les fonctions de fabrication et de répandage. Les principales techniques de régénération en place sont :

Le thermoreprofilage : cette technique consiste en une remise au profil d'une couche de béton bitumineux par chauffage, fractionnement, mise en forme et recomptage , sans enlèvement de matériaux ni apport d'enrobés neufs. Le matériel employé assure les fonctions suivantes :

- ✓ Chauffage du revêtement sur quelques centimètres de profondeur,
- ✓ Fractionnement de l'enrobé en place,
- ✓ répartition transversale et mise en profil

La thermorégénération : cette technique consiste en une remise au profil d'une chaussée par chauffage, fractionnement, enlèvement du matériau excédentaire, réglage, mise en place d'une couche d'enrobé neuf et compactage de l'ensemble.

Recyclage en place par chauffage de la chaussée : cette technique consiste en un traitement en place de la chaussée par chauffage, fractionnement, malaxage de l'enrobé ancien avec les correctifs nécessaires (enrobés, granulats, ou liant de régénération) remise en œuvre du mélange obtenu, réglage et compactage .

Recyclage en place par fraisage à froid et malaxage à froid ou à chaud : cette technique consiste en traitement en place d'une chaussée par fraisage à froid, recyclage des fraisats dans un matériel auto-moteur permettant un recyclage à chaud ou à froid des enrobés fraisés avec un fort taux de recyclage .