

RÉPUBLIQUE DU SÉNÉGAL



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

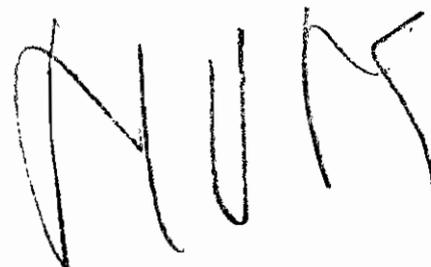
**PROJET DE FIN D'ÉTUDES**

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME

D'INGÉNIEUR DE CONCEPTION.

GC.0179

TITRE: "ÉTUDE DE L'UTILISATION DU SABLE-BITUME  
EN COUCHE DE BASE ROUTIERE".



AUTEUR:

Khoult N'DIAYE

DIRECTEUR:

Massamba DIENE, Ph.D

DIRECTEUR EXTERNE: Jean Vautrin, BCEOM

Juillet 1993.

à l'illustre Xadimou Rassoul,  
à ma mère bien aimée,  
à mon très cher père,  
à mes frères et soeurs,  
à tous ceux qui me sont chers.

## REMERCIEMENTS

Nous adressons nos très sincères remerciements à Monsieur **Massamba DIENE**, professeur de géotechnique à l'Ecole Polytechnique de Thiès et directeur du projet ,pour sa disponibilité et son engagement constant à nos côtés.

Ces remerciements vont également à l'endroit de:

- Monsieur Jean **VAUTRIN** du BCEOM pour sa disponibilité et sa sollicitude
- Monsieur Jean **EGRET** du BCEOM pour nous avoir éclairé sur plusieurs points
- l'Entreprise Jean **LEFEBVRE**, tout son personel et son Directeur Monsieur **Bara TALL**, pour leur concours très apprécié
- Tous les élèves ingénieurs de l'Ecole Polytechnique de Thiès et particulièrement ceux de la quatrième année génie civil pour leur soutien en des moments difficiles,
- **Mme Rose FAYE**, secrétaire à l'E.P.T. pour son appui dans le traitement de texte du rapport
- En fin tout ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce projet de fin d'études.

## SOMMAIRE

La construction routière constitue aujourd'hui l'une des priorités de la politique d'ajustement structurel du Sénégal.

La rareté et la mauvaise répartition géographique des matériaux routiers usuels (latérites) conduisent à la recherche de matériaux de substitution disponibles directement sur les sites des chantiers. C'est ainsi qu'il s'est avéré intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser le sable-bitume en couche de base dans le cadre P.A.S.T.

Pour ce faire, un programme expérimental a été mis au point et réalisé au laboratoire de voirie de l'Ecole Polytechnique de Thiès. Ce programme a, entre autres, permis d'étudier au point de vue résistance et déformabilité diverses formulations de sable-bitume obtenues à partir de mélanges de sable de mer, de dune, de basalte 0/3 et bitume 40/50.

Les résultats obtenus montrent que, pour des formulations à base de sable conforme aux spécifications techniques admises en construction, les exigences de stabilité et de fluage sont facilement satisfaites pour des pourcentages de bitume raisonnables (i.e. inférieurs à 6% ).

Une estimation de coût a été faite sur le tronçon Guéoul-Baralé en utilisant les formulations de sable-bitume retenues à la suite de l'étude expérimentale. La comparaison du coût du kilomètre de couche de base obtenu avec ceux des variantes latérite crue et

latérite traitée au ciment démontre que les mélanges réalisés à partir de sable de dune, de basalte 0/3 et bitume 40/50 constituent des substituts très économiques pouvant concurrencer les graveleux latéritiques dans les endroits où elles sont rares du fait de l'incidence du transport. Il reste que le rapport a abordé avant tout les problèmes géotechniques de la question et laisse en suspens l'incidence du coût de la mise en oeuvre.

Cependant, il serait souhaitable d'étudier plus en détail les matériaux constituants et aussi d'évaluer avec précision le coût de la mise en oeuvre de chaque solution.

**TABLE DES MATIERES**

<b><u>Matières</u></b>	<b><u>Page</u></b>
Remerciements.....	i
Sommaire.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	viii
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>5</b>
1.1 Utilisation des sable-bitumes en construction routière .....	5
1.2 Les matériaux mis en oeuvre.....	6
1.2.1 Les sables.....	6
1.2.2 Les liants.....	7
1.2.2.1 Les émulsions.....	7
1.2.2.2 Les bitumes fluidifiés.....	7
1.2.2.3 Les bitumes purs.....	8
1.2.2.4 Les Cut-Backs.....	8
1.3 Modes de mise en oeuvre.....	9
1.3.1 Mise en oeuvre à froid.....	9
1.3.2 Mise en oeuvre à chaud.....	10
1.4 Les performances.....	11
1.5 Les dégradations.....	16

<b>Chapitre 2: ETUDE EXPÉRIMENTALE.....</b>	<b>19</b>
2.1 Analuse granulométrique des sables.....	19
2.2 Pénétrabilité du bitume.....	23
2.3 Essais Marshall sur les différents mélanges.	25
2.3.1 Théorie.....	25
2.3.2 Résultats obtenus.....	25
2.3.2.1 Mélanges sable de mer-bitume..	26
2.3.2.2 Mélanges sable de dune(90%) et basalte 0/3 (10%)-bitume.....	26
2.3.2.3 Mélanges sable de dune(80%) et basalte 0/3 (20%)-bitume.....	27
2.3.2.4 Mélanges sable de dune(70%) et basalte 0/3 (30%)-bitume.....	27
<b>Chapitre 3: ANALYSE ECONOMIQUE.....</b>	<b>28</b>
3.1 Le trafic.....	28
3.2 Les différentes variantes.....	29
3.2.1 Latérite non traitée.....	29
3.2.2 Latérite traitée au ciment.....	30
3.2.3 Le sable-bitume.....	31
3.3 Etude économique.....	32
3.3.1 Latérite non traitée.....	32
3.3.2 Latérite traitée au ciment.....	33
3.3.3 Sable-bitume.....	35
3.3.3.1 Sable de mer-bitume.....	35
3.3.3.2 Sable de dune (90%) et basalte	

0/3 (10%)-bitume.....	36
3.3.3.3 Sable de dune (80%) et basalte	
0/3 (20%)-bitume.....	37
3.3.3.4 Sable de dune (70%) et basalte	
0/3 (30%)-bitume.....	38
<b>CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIES.....</b>	<b>44</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>46</b>

## LISTE DES FIGURES

- Fig 2.1 : Courbes granulométriques du sable de mer, du sable de dune et du basalte 0/3
- Fig 2.2 : Courbes granulométriques des différents mélanges sable de dune et basalte 0/3
- Fig 2.3 : Courbe de stabilité : sable de mer-bitume
- Fig 2.4 : Courbe de fluage : sable de mer-bitume
- Fig 2.5 : Courbes de stabilité : Mélanges sable de dune-basalte 0/3 et bitume
- Fig 2.6 : Courbes de fluage : Mélanges sable de dune-basalte 0/3 et bitume

## LISTE DES TABLEAUX

- Tab 1.1 : Caractéristiques minimales
- Tab 1.2 : Actions à entreprendre pour améliorer les performances
- Tab 1.3 : Seuils minimaux de performances selon la nature de la couche de base et le niveau du trafic
- Tab 2.1 : Récapitulatif des résultats: courbures et uniformités
- Tab 2.2 : Résultats essai Marshall: sable de mer-bitume
- Tab 2.3 : Résultats essai Marshall: sable de dune(90%)-basalte 0/3 (10%)-bitume
- Tab 2.4 : Résultats essai Marshall: sable de dune(80%)-basalte 0/3 (20%)-bitume
- Tab 2.5 : Résultats essai Marshall: sable de dune(70%)-basalte 0/3 (30%)-bitume
- Tab 3.1 : Résultats de comptage véhicules sur la route nationale 2 entre Kébémér et Louga
- Tab 3.2 : Résultats de comptage véhicules sur la route nationale 2 entre Saint-louis et Louga
- Tab 3.3 : Comparaison des combinaisons retenues
- Tab 3.4 : Prix de location de camion
- Tab 3.5 : Récapitulation des solutions
- Tab 3.6 : Discrétisation du linéaire en fonction du prix

## INTRODUCTION

La route constitue, de par le rôle économique et social qu'elle joue dans un pays, un facteur de développement.

Au Sénégal, des investissements importants ont été consentis au lendemain des indépendances afin d'accroître le réseau routier. Ce qui s'est traduit par un bond du linéaire de routes bitumées qui est passé aussi de 636 km en 1960 à 2960 km au 31.12.1978. Ce chiffre n'ayant fait depuis lors que s'accroître pour se situer actuellement autour de 5000 km.

En 1982, une étude confiée au BCEOM avait eu pour but d'examiner le réseau de routes bitumées du Sénégal, en vue de déterminer les nécessités d'entretien, de renforcement ou de reconstruction de ces routes bitumées. Le diagnostic initial avait alors porté sur 1150 Km de routes, principalement situées sur le centre nord.

Tout ceci sera fait dans le cadre du Programme d'ajustement Sectoriel du Transport (P.A.S.T.). Concernant les travaux de renforcement, sur un programme prévu de 854 Km pour un investissement de 40,8 milliards de FCFA, il a été réalisé 347 km (Ross-Bethio-Ourossogui) pour un coût d'environ 7 milliards de FCFA et 287 Km sont en cours de réalisation dans les régions de THIES, DIOURBEL, KAOLACK et DAKAR. Actuellement, le marché de la tranche "B" du PAST est lancé. Cette tranche, en plus des régions

précédemment citées, touche aussi les régions de SAINT-LOUIS, LOUGA et ZIGUINCHOR. Le lot "b" de cette tranche concerne la route nationale 2 allant de MEKHE à SAINT-LOUIS. Ce que l'on a remarqué c'est que pour la réalisation de ce lot, la seule carrière de latérite qui est disponible est celle de Lam-Lam située à environ 10 km de Thiès-ville. Dans la région de Louga, il est remarqué un manque de gisement de latérite exploitable pour les besoins du renforcement. Par contre le sable de construction apparaît comme le matériau le plus uniformément réparti sur le territoire sénégalais. Dès lors, il s'avère intéressant d'étudier la possibilité d'utiliser le sable-bitume comme matériau de substitution à la place de la latérite dont le coût d'acheminement est manifestement élevé.

Donc l'étude de l'utilisation du sable-bitume en couche de base, en remplacement de la latérite traitée ou non, a pour objectif de voir dans quelle mesure cette solution sera possible tout en ne nuisant pas aux qualités techniques requises et ceci à moindre coût.

Pour voir l'existence ou non d'une telle possibilité de substitution du sable bitume à la latérite traitée ou non, il faut nécessairement une étude technique de ce mélange (sable-bitume) en déterminant sa stabilité et son fluage et une étude économique comparative avec les solutions existantes.

Pour cela on a :

- essayé d'analyser les matériaux qui vont constituer les différents éléments de mélange à considérer de manière séparée.

- choisi plusieurs types de mélanges à étudier en étant assez réaliste sur ces choix car tenant compte de ce qui existe et ne voulant pas perdre trop de temps. Tous les scénari de mélange de sable-bitume retenus sont réalisés en laboratoire sous forme d'éprouvettes cylindriques.

- soumis aux essais de stabilité et de fluage les éprouvettes confectionnées pour avoir les caractéristiques techniques des différents mélanges pour le choix final.

- effectué une étude économique intervient comme critère décisif pour le choix définitif de l'une ou plusieurs des solutions préalablement retenues.

- comparé cette ou ces solutions finales aux solutions existantes (latérite naturelle, latérite traitée) sur le plan économique pour voir s'il est opportun ou non d'utiliser le sable bitume à la place de la latérite traitée ou non. Pour être concret, on a choisi de prendre comme élément servant à la comparaison le tronçon Guéoul-Baralé. Ce tronçon long de 46 Km environ situé de part et d'autre de la ville de LOUGA sur la route nationale 2 (RN 2) est une partie du lot b de la tranche "B" du P.A.S.T.

Notre étude a consisté à faire une étude bibliographique pour situer le sable-bitume et voir son évolution. Ensuite il est effectué une étude expérimentale pour voir les possibilités

techniques de son utilisation. Puis une analyse économique est réalisée pour étudier s'il est économiquement réaliste de l'utiliser comme substitut des autres matériaux utilisés habituellement. Enfin quelques recommandations sont faites pour les éventuels utilisateurs.

## CHAPITRE 1

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 - 1. Utilisation des sables-bitumes en construction routière

Les possibilités d'emploi d'un sable bitume sont liées au niveau de ses performances. En effet selon la formule utilisée, on peut avoir du sable-bitume en couche de fondation, en couche de base et même en couche de roulement.

Les sables améliorés à l'émulsion de bitume ou au bitume fluidifié sont utilisables dans les chaussées neuves en couche de base pour des trafics faibles à modérés (inférieurs à 3.000 véhicules par jour), sous réserve que les performances atteintes le permettent.

Leur utilisation est envisageable pour des trafics supérieurs mais uniquement en couche de fondation et également en couche de base de renforcement mais pour des trafics n'excédant pas 1.000 véhicules par jour. Selon le niveau de trafic et la nature de la plateforme, les épaisseurs employées se situent entre 10 et 20 cm.

Pour les sables améliorés au bitume, il n'y a pas, à priori, de limitation d'emploi. Les formules les plus performantes peuvent avoir des usages comparables à ceux des graves-bitume. Lorsque le niveau de performance d'un sable-bitume ne permet pas de dépasser le niveau d'une couche de fondation, le problème de compétitivité de cette technique par rapport à d'autres solutions. Ils sont également utilisables en couche de base de renforcement jusqu'à un seuil de trafic dépendant du niveau de performances. Selon le niveau de trafic et la nature de la plate-forme, les épaisseurs les plus couramment employées se situent entre 10 et 25 cm.

L'emploi en couche de roulement des sables-bitume est valable pour des chaussées à trafic faible à moyen (inférieur à 1.000 véhicules par jour). L'épaisseur employée est généralement de l'ordre de 3 cm avec une certaine tolérance.

1 - 2 Les matériaux mis en oeuvre

Les matériaux utilisés, pour la confection d'un sable bitume, sont les sables et les liants hydrocarbonnés selon la méthode de mise en oeuvre adaptée.

1 - 2 Les sables

Ils doivent avoir une bonne portance, ce qui nécessite un minimum de fines et n'exclut pas une légère plasticité. L'étude granulométrique permet de déterminer la teneur en éléments fins (c'est-à-dire diamètre inférieur à 0,02 mm) qui est à la fois déterminante pour le comportement du mélange au gel (critère de Casagrande) et pour le choix du dosage en liant. Cette étude informe également sur la forme la plus adéquate de la courbe granulométrique qui influence l'aptitude au compactage et la teneur en vides du mélange. D'une manière générale, plus la granulométrie sera étalée, plus les performances mécaniques seront élevées : logiquement, elles augmenteront dans le sens : sable fin - sable moyen - sable grossier.

A titre indicatif, sont susceptibles d'être employés les sables ayant les caractéristiques suivantes :

- teneur en fines ( particules inférieures à 80 microns (Normes Françaises) ) : 5 à 30 %

- Coefficient d'uniformité  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 5$

- Equivalent de sable  $15 < ES < 50$

- Indice de Plasticité  $IP < 15\%$  et Limite de liquidité  $LL < 35\%$

Ces formules de composition sont des indications moyennes valables à la fois pour les sols-bitume et les sables enrobés à froid. Elles correspondent à la nécessité d'avoir naturellement avant traitement une bonne stabilité. Dans le cas de l'enrobage à chaud, les sables utilisés doivent être propres ( $ES > 40$ ) et sans argile (IP non mesurable). Par ailleurs, ils doivent contenir moins de 0,2 % de matières organiques. Dans le cas contraire, il faudra veiller à leur absence de nocivité (tenue à l'immersion).

### 1 2.2 Les liants

Dans le cas de l'enrobage à froid, les liants employés doivent pouvoir bien se disperser dans le matériau à température ambiante.

#### 1 - 2.2.1 Les émulsions

En général, ce sont les émulsions cationiques soit à rupture lente, soit surstabilisées, qui sont utilisées pour s'assurer que leur rupture n'ait lieu qu'après compactage.

L'émulsion doit rester parfaitement stable au moment du malaxage si l'on veut éviter la formation de nodules de bitume rendant le traitement beaucoup moins efficace. Sa pénétration devra être d'autant plus élevée que la teneur en fines est importante; que la plasticité est forte. L'intérêt de son emploi est d'avoir après rupture un liant visqueux (bitume pur) assurant une bonne stabilité.

En climat sec, les émulsions anioniques sont utilisées. Elles sont aussi bonnes pour des sables légèrement plastiques contrairement aux émulsions cationiques.

#### 1 - 2.2.2 Les bitumes fluidifiés

Leur emploi pour un matériau est fonction de leur viscosité. En effet plus le matériau est cohérent (donc riche en fines et/ou plastique), plus la viscosité à utiliser devrait être faible pour faciliter la dispersion du liant et inversement un matériau moins

cohérent peut s'enrober avec un liant plus visqueux (la diffusion au sein du matériau est plus aisée) sa viscosité plus élevée confortera, par ailleurs, la stabilité du matériau. Aussi la viscosité du liant dépend de l'énergie de malaxage.

Les bitumes fluidifiés peuvent être employés avec des sables à teneur en eau faible ou nulle, d'où l'intérêt de leur utilisation dans des régions sèches.

#### 1 - 2.2.3 Les bitumes purs (enrobage à chaud)

Pour un sable donné, les performances seront d'autant plus élevées que le liant employé sera dur. On utilisera donc un bitume pur de pénétration la plus faible possible. Ce souci d'utiliser un liant de grande dureté tient au fait que le principal problème avec les sables-bitume est d'obtenir une bonne résistance et une faible déformabilité.

#### 1 - 2.2.4 Les Cut-backs

Les Cut-backs, ou bitumes fluxés, sont destinés à permettre un emploi soit à la température ambiante, soit après un chauffage modéré. La viscosité du bitume est considérablement abaissée par adjonction d'un fluxant, produit pétrolier plus ou moins volatil. Le fluxant est destiné à s'évaporer après emploi du cut-back de sorte que le liant résiduel soit du bitume, c'est à dire un liant suffisamment rigide pour résister aux efforts dus aux véhicules. Ces cut-back, qui se présentent sous la forme de liquides noirs plus ou moins visqueux, sont caractérisés schématiquement par :

- la nature du fluxant qui conditionne la vitesse de séchage ;
- la quantité du fluxant qui conditionne la viscosité à l'emploi.

Les spécifications françaises relatives aux cut-backs distinguent les cut-back courants , les cut-backs à séchage rapide, et les cut-back mixtes.

### 1 - 3 Modes de mise en oeuvre

Les mélanges de sable-bitume se préparent par mélange direct sur la chaussée au moyen de niveleuses à lames, au moyen d'installation de malaxage mobile ou encore par fabrication dans une centrale.

Si le malaxage est opéré à la lame, les charrues à disques doivent suivre le distributeur de liant bitumineux jusqu'à ce que celui-ci soit parfaitement mélangé à l'agrégat minéral. Après un mélange parfait, le malaxage est poursuivi au moyen de niveleuses automatrices.

Si le malaxage est réalisé en centrale, l'agrégat minéral et le liant bitumineux doivent être parfaitement mélangés jusqu'à ce que tout le liant soit réparti dans l'agrégat qui sera parfaitement enrobé. Le mélange obtenu peut être placé en cordons.

#### 1 - 3.1 Mise en oeuvre à froid

La fabrication peut être réalisée en place ou en centrale. Bien qu'un traitement en centrale donne une meilleure homogénéité, la rusticité de la technique fait que dans la majorité des cas, c'est le traitement en place qui est retenu (chantiers neufs).

Un aspect important est l'aération du mélange pour passer de la teneur en eau d'enrobage à la teneur en eau de compactage (cas des émulsions) ou pour éliminer une partie des éléments volatils (cas des cut-backs et des bitumes fluidifiés). Cette opération pourra se faire, soit par reprise à la lame de niveleuse avec mise en cordon, soit par passages successifs du mélangeur rotatif utilisé pour la stabilisation.

Ensuite, suit l'opération de compactage qui doit être engagé dès que l'élimination de l'excédent d'eau ou de solvant le permet; à cette étape, une trop longue attente est aussi néfaste qu'un compactage prématuré. Le compactage est réalisé généralement avec des compacteurs à pneus (charge par roue: 2 à 3 tonnes) faiblement gonflés (2 bars). Les compacteurs mixtes ou vibrants conviennent

aussi. La finition est assurée par un cylindre lisse léger. Il faut noter enfin selon les quantités du matériau (riche en fines par exemple), on adopte une manière de compactage pour éviter certaines difficultés inhérentes.

### 1 - 3.2 Mise en oeuvre à chaud

Pour des questions de facilité de mise en oeuvre (compactage), il est conseillé de retenir la température de chauffage la plus basse compatible à une déshydratation parfaite des granulats et un enrobage satisfaisant. Généralement, la centrale est implantée sur le site même d'extraction du sable pourvu que celui de mise en place ne soit pas trop éloigné. Il y a lieu d'être très attentif à la qualité du sable extrait (propreté, homogénéité de la granulométrie) et de surveiller en particulier l'élimination de la découverte et de manières telles que racines d'arbres, etc... ainsi que l'homogénéité de la teneur en eau (problème de température constante de chauffage).

Le transport par camions bâchés et si possible calorifiés est recommandé pour éviter le refroidissement durant le transport et surtout afin d'éliminer tout risque de refroidissement localisé.

La mise en oeuvre, selon les cas, peut se faire soit à la niveleuse, soit au finisseur. Ce dernier reste toutefois l'appareil recommandé car il permet d'obtenir avec ce type de matériau un précompactage intéressant, et de mettre en oeuvre des couches épaisses de 10 à 25 cm.

Selon les types de sables-bitume, la température idéale à laquelle on peut faire intervenir les engins de compactage est de 100 à 90 °C et la fin d'intervention se situe vers 70°C. Il s'agit là d'ordres de grandeur qui varieront en fonction de la portance qui, elle-même, sera dépendante de la texture du mélange et des engins de compactage.

Plusieurs types d'engins peuvent être utilisés soit :

- compacteurs à pneus automoteurs d'une charge voisine de 1 à 3 tonnes par roue, avec pression de gonflage < 2 bars,
- cylindres vibrants ou compacteurs mixtes,
- plaques vibrantes.

#### 1 - 4 Les performances

Il s'agira, à ce stade, de vérifier l'efficacité du traitement en comparant les performances obtenues à celles des normes prescrites ; la valeur de ces normes étant fixée par l'expérience et les conditions climatiques de chaque pays. Le problème essentiel consiste à déterminer la teneur optimale en liant convenablement et à juger de l'aptitude du sol à être stabilisé avec un liant hydrocarboné. Il n'existe pas de méthode normalisée et les meilleurs méthodes généralement utilisées sont celle de l'essai Hubbard-Field (H.F.) et celle de Marshall. La stabilité du mélange sable-bitume ne dépend pas uniquement de la gradation du sable, mais d'autres facteurs qui sont des facteurs de surface de l'agrégat.

Dans le cas où on utilise du bitume pur, le mélange est étudié le plus souvent avec l'essai Hubbard Field (moule de 5 x 2,5 cm). On demande en général une stabilité H.F supérieures à 4000 N (Réf.7-45). La méthode de Marshall est parfois utilisée et on exige une stabilité supérieure à 2500 N (Réf.7-45).

Pour un mélange sable-émulsion de bitume, le sable doit alors être d'une quantité telle que lorsqu'il est mélangé à l'eau dans la proportion de 1,75 % de son poids sec, il a un indice portant de Floride d'au moins 2,1 kg/cm<sup>2</sup>. En outre, lorsqu'il est mélangé avec l'émulsion et l'eau de gâchage, il doit avoir un indice portant de Floride modifié de 10,5 kg/cm<sup>2</sup>, une fois l'émulsion rompue et l'agglutination réalisée.

Le sable mélangé au cut-back doit avoir une stabilité telle que si on le mélange avec 4,5 % (en poids de sable sec) de cut-back, et si on le laisse durant 16 h dans une étuve à 38°C en une couche non compactée de 25 cm d'épaisseur, puis qu'on le moule et qu'on le compacte à 25°C, selon la méthode Hubbard-Field, on obtient une stabilité d'au moins 5440 N (Réf.1-413).

Pour les sables enrobés à froid, à titre indicatif, les niveaux minima de caractéristiques à considérer sont ceux indiqués au tableau.

Tableau 1.1: Caractéristiques mininales

(Source: Référence 5 )

( L'essai utilisé: H.F.)

Valeur min de stabilité	Conservation de 7 jours à température ambiante en atmosphère ventilée	BASE		FONDATION	
		Trafic INF A 1000V/J	Trafic INF A 3000V/J	Trafic INF A 3000V/J	Trafic INF A 12000V/J
	Avant écrasement 1h à 60°C				
	7 jours immersion ou imbibition à la base et 1h à 60°C	500 daN	700 daN	300 daN	400 daN
		200 daN	350 daN	150 daN	200 daN

Lorsque les performances requises ne sont pas atteintes, il y a lieu d'envisager d'entreprendre les actions exposées au tableau dans le but d'améliorer les performances.

Tableau 1.2: Actions à entreprendre pour améliorer  
les performances

( Source: Référence 5)

	Stabilité à sec trop faible	Stabilité après im- mersion trop faible	Gonfle- ment trop impor- tant	Absorb- tion trop impor- tant
Utiliser un dope d'adhési- vité (se con- former aux in- dications du fournisseur)		↑		
Utiliser de la chaux grasse (1 à 2%)		↑	↑	
Augmenter le frottement in- terne de la formule par a- jout de sable de concassage (20 à 40 %)	↑			
Augmenter la compacité de la formule par ajout d'un sa- ble naturel ou de broyage plus riche en fines (20 à 40%)	↑	↑	↑	↑
Augmenter la teneur en liant	↑	↑	↑	↑
Augmenter la viscosité du liant	↑			
Evaluer l'évo- lution de la stabilité à long terme en effectuant l'essai sur des échantillons conservés à 60°C jusqu'à poids constant	↑			

Pour les sables enrobés à chaud, dans le cas des trafics faibles ou modérés, on se référera aux niveaux de performances recommandés pour les sables enrobés à froid. Pour les trafics plus élevés, le niveau de performance pourra être évalué à l'aide de l'essai de compression LCPC-DURIEZ.

A titre indicatif, les seuils minimaux du tableau suivant pourront être retenus (résistance à la compression à sec exprimée en MPa et mesurée à 18°C).

Tableau 1.3: Seuils minimaux de performances  
selon la nature de la couche et  
le niveau de trafic

( Source: Référence 5)

Couche de chaussée	BASE		FONDATION	
	T < 300	T < 750	T < 300	T < 750
Trafic en poids-lourds par jour sur la voie la plus chargée (*)				
Résistance mini (conservation à l'air)	4 MPa	6 MPa	2 MPa	4 MPa
% perte maxi de résistance après immersion	40	50	50	50

Ces seuils sont sensiblement en accord avec ceux utilisés pour les sables enrobés à froid. On considère en effet d'une façon générale, qu'une stabilité Hubbard-Field de 350 daN à 60°C correspond à une résistance à la compression LCPC-Duriez de l'ordre de 2 MPa à 18°C, il ne s'agit évidemment pas d'une relation exacte (qui varie selon la nature du sable et du bitume), mais d'un ordre de grandeur moyenne.

#### 1 - 5 Les dégradations

Le comportement du sable-bitume est caractérisé par les spécifications suivantes :

- la stabilité immédiate et à long terme
- le comportement après immersion
- le gonflement
- le pourcentage d'eau absorbée

Les désordres qui se manifestent rapidement après la mise en oeuvre se rattachent généralement à l'une des causes suivantes:

- des écarts par rapport aux spécifications sur le matériau,
- des conditions météorologiques défavorables au moment de la mise en oeuvre,
- des écarts de mise en oeuvre
  - . sous compactage de la couche de sable traité ou de la sous-couche,
  - . surdosage en liant,

. mauvais accrochage entre le sable traité et la couche de roulement.

A long terme, on peut voir qu'au niveau des accotements, le sable traité au bitume est souvent en surlargeur par rapport à la couche de roulement. Dans bien des cas, cette surlargeur n'est pas protégée et est donc exposée aux variations climatiques d'où une tendance à se rigidifier par vieillissement du liant. Si les écarts de température sont importants, un phénomène de fissuration de retrait peut se développer et s'étendre ensuite à la chaussée.

Les sables traités au bitume conservent généralement une teneur en vides importante les rendant capables d'absorber beaucoup d'eau. A l'état imbibés, leur niveau de performances est beaucoup plus faible et des dégradations peuvent apparaître.

Si la stabilité est essentiellement assurée par le bitume, il existe une température critique au delà de laquelle le matériau devient sensible à l'ornièrage.

Des dégradations de rives peuvent apparaître et s'étendre à la chaussée. Une cause fréquente de ces dégradations est la détérioration de l'épaulement de la couche de sable traité soit par érosion, soit par usure à la suite d'une circulation motorisée ou non s'effectuant sur l'accotement.

Cette étude bibliographique a permis de cerner globalement l'ensemble des problèmes ainsi que leurs solutions à entrevoir dans une étude éventuelle d'un mélange sable-bitume. L'étude devra concerner le comportement et les caractéristiques des matériaux à

utiliser ainsi que ceux du mélange suivant différentes proportions. Ces dernières seront définies en rapport avec cette même étude bibliographique.

Nous allons, maintenant, entamer l'étude expérimentale pour ainsi déterminer les performances réelles des différents mélanges à étudier.

CHAPITRE 2

ETUDE EXPERIMENTALE

Cette partie du projet est la plus importante. En effet, il s'agit d'examiner plusieurs cas de figure avec l'utilisation du sable-bitume en couche de base. Les valeurs qui sont à déterminer dans cette étude nous édifieront sur l'aptitude du sable-bitume utilisé comme couche de base à supporter les trafics courants auxquels sont confrontés nos routes.

II - 1 Analyse granulométrique des sables

Elle est faite selon la norme ASTM et nous permet de déterminer, à partir de la courbe granulométrique, les diamètres  $D_{10}$ ,  $D_{30}$  et  $D_{60}$  correspondant respectivement aux diamètres des particules à 10% , 30% , 60% de passant. Ces diamètres vont servir au calcul du degré d'uniformité U et de la courbe C selon les formules suivantes:

$$* U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$* C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

Ces valeurs nous renseignent sur les caractéristiques du sable. En effet on considère qu'un coefficient de courbure compris entre 1 et 3 donne un sable à granulométrie bien étalée à condition que U soit plus grande que 4 pour les graviers et plus grand que 6 pour les sables. Le degré d'uniformité renseigne sur la forme de la

courbe; pour des valeurs de  $U$  supérieures à 15, on conclut qu'on a une granulométrie très étalée.

L'importance de l'étalement de la granulométrie sur les performances mécaniques a été soulignée au chapitre 1. En effet, plus la granulométrie sera étalée, plus les performances mécaniques seront élevées.

L'analyse granulométrique nous a conduit au tableau de la page suivante.

Tableau 2.1 récapitulatif des résultats

Matériaux	Courbure	Uniformité
Sable de mer	0.95	1.6
Sable de dune	1.1	3.2
Basalte concassé 0/3	3.4	33.85
Sable de dune(90%) et Basalte 0/3 (10%)	0.366	5.75
Sable de dune(80%) et Basalte 0/3 (20%)	0.4	4.78
Sable de dune(70%) et Basalte 0/3 (30%)	0.4	4.6

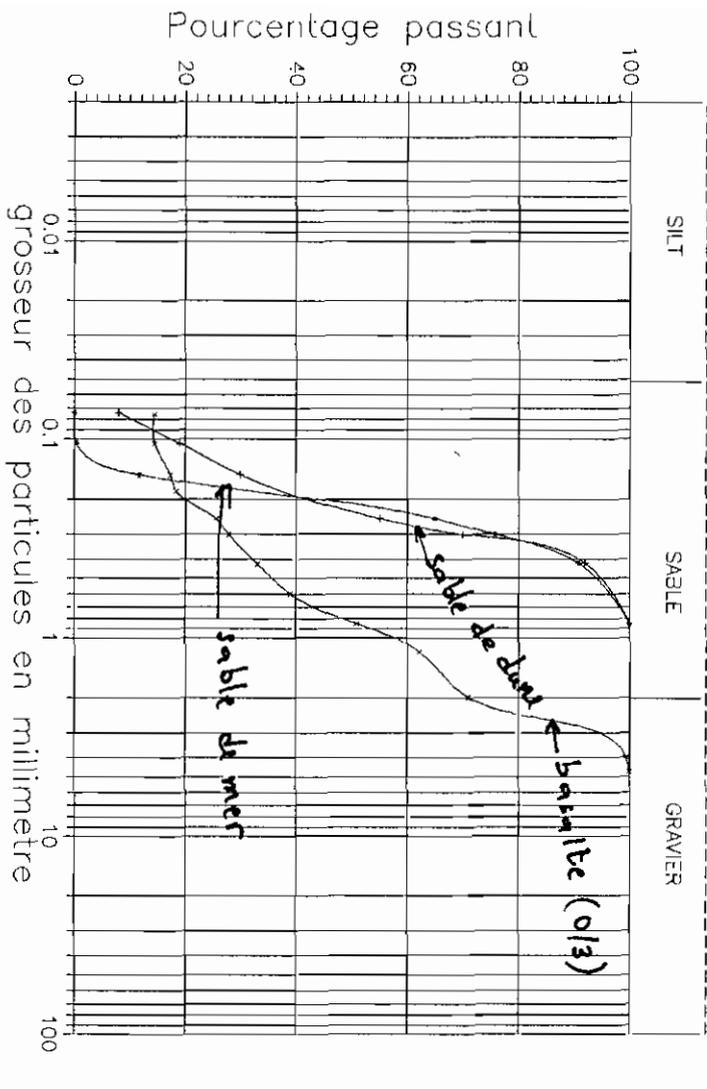


Fig 2.1 : courbes granulométriques : sable de dune, de mer et basalte 0/3

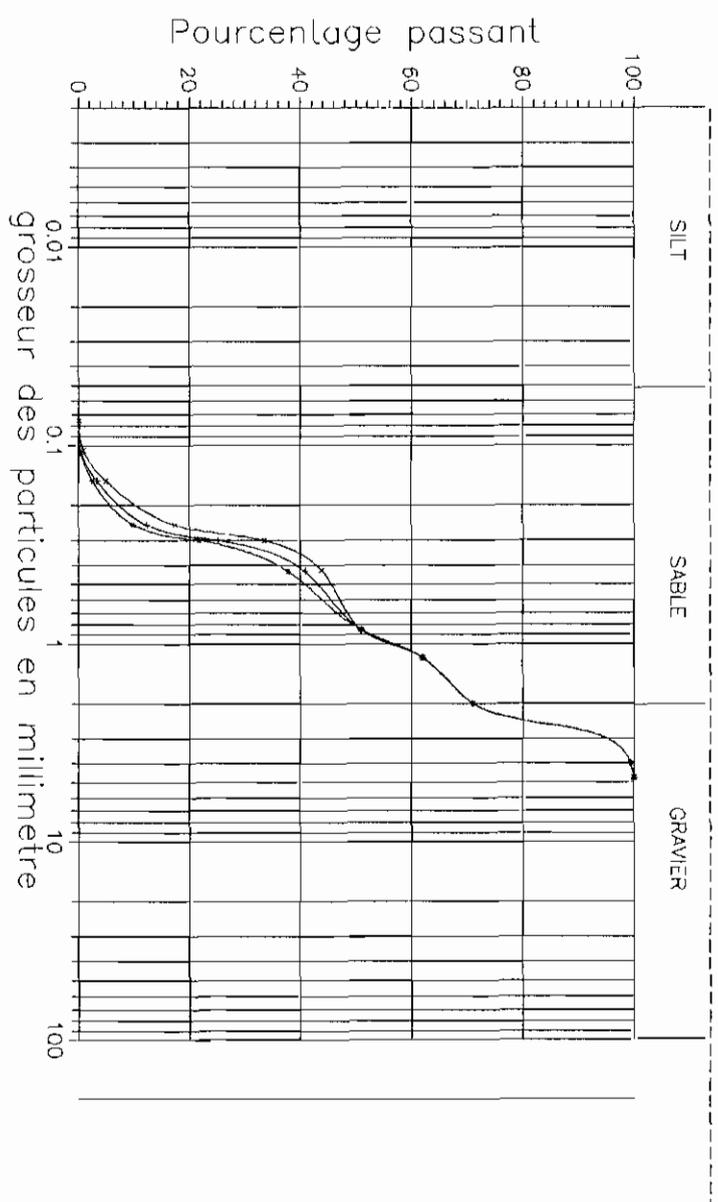


Fig 2.2 : courbes granulométriques : mélanges sable de dune - bosaille 0/3

On constate, en regardant les valeurs de U trouvées et consignées dans le tableau précédent, que les quatres derniers matériaux du tableau peuvent bien être utilisés pour le compte de cette étude si on réfère à l'étude bibliographique (chapitre 1).

II - 2 Pénétrabilité du bitume :

L'objectif de cet essai la vérification de la dureté du bitume utilisé dans l'étude expérimentale. Il s'agit pour nous de voir si ce bitume est conforme aux spécifications de dureté.

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

La pénétration d'un liant se mesure, selon la norme ASTM D5-73 (1978), à 25°C, au moyen d'une aiguille standardisée que l'on fait pénétrer dans le liant durant 5 s, sous une charge de 100 g ; la pénétration standard est donnée par le nombre de dixièmes de millimètres d'enfoncement de l'aiguille dans le bitume. Plus la pénétration est élevée, plus le liant est mou.

La pénétration sera la moyenne à une unité près de trois essais au moins. A partir de cette valeur de la pénétration, le bitume sera situé à partir de la classification suivante :

- les bitumes durs de pénétration 40/50
- les bitumes un peu moins durs de pénétration 60/70
- les bitumes demi-durs de pénétration 80/100
- les bitumes demi-mous de pénétration 180/200
- les bitumes mous de pénétration 280/300
- les bitumes très mous de pénétration 300/350
- les bitumes fluides de pénétration > 350

Dans le cas présent, après essai, on a obtenu les résultats suivants :

Mesures	Présentation	Moyenne
1 <sup>re</sup>	47.2	
2 <sup>e</sup>	45.8	46.5
3 <sup>e</sup>	46.4	

Avec une pénétration de 46,5 et à partir de la classification précédente, on peut dire qu'il s'agit bien d'un bitume 40/50 (dur) qui est bien adapté en Afrique et utilisé couramment au Sénégal.

## II - 3 Essais de Stabilité et de fluage des différents mélanges sable-bitumes :

### II - 3.1 Théorie

Il faut signaler tout d'abord que pour des problèmes de disponibilité d'appareil, c'est l'essai MARSHALL qui est utilisé. Cela implique, évidemment, une restriction de l'étude expérimentale aux sable-bitumes fabriqués à chaud ( en centrale ).

(Pour la procédure de l'essai, voir annexes).

### II - 3.2 RESULTATS OBTENUS

Les essais effectués sur les différents mélanges de sable-bitume ont donné des résultats qui sont présentés sous forme de tableaux donnant pour chaque type de mélange sable-bitume la stabilité marshall et le fluage en fonction de la teneur en bitume. Ces valeurs permettent de tracer les graphiques de la stabilité et du fluage en fonction du pourcentage de bitume. Ces différentes courbes vont aider au choix de formulation optimale économiquement réaliste. On entend par là que la formulation choisie ne sera pas forcément celle qui a la plus grande stabilité ni le plus petit fluage, mais elle devra avoir une stabilité et un fluage acceptable avec le moins de bitume et de basalte 0/3 possible, ces derniers composants étant particulièrement onéreux.

Chaque formulation considérée fera l'objet d'une étude économique et l'ensemble des résultats obtenus fera l'objet d'une comparaison du point de vue de performance mécanique. Rappelons tout simplement que, pour que le sable bitume puisse être retenu comme couche de base d'une chaussée, il faut qu'il ait une stabilité Marshall supérieure à 2500 N et un fluage inférieur à 5 mm. (Réf : étude bibliographique, chapitre 1, page 11 ).

II - 3.2.1: Mélange sable de mer-bitume

-Tableau 2.2 des résultats:essai Marshall

% bitume	Stabilité(N)	Fluage (mm)
5	2414.3	3.05
7	2468.06	2.6
9.5	3026.6	3.94
12	2406.3	2.4

\_ Courbe de stabilité ( fig 2.3 )

\_ Courbe de fluage ( fig 2.4 )

\_ Combinaison retenue : stabilité=2600 N ;

fluage =2,7 mm ;

pourcentage de bitume de 8 %.

II.3.2.2 Mélange sable de dune(90%) et basalte 0/3 (10%)-bitume:

-Tableau 2.3 des résultats:essai Marshall

% bitume	Stabilité (N)	Fluage (mm)
4.5	2947.43	1.11
6.5	3410.64	1.63
9	4084.09	1.72
11.5	3085	1.61

- Courbe de stabilité ( fig 2.5 )

-Courbe de fluage ( fig 2.6 )

Combinaison retenue : stabilité= 2947.43 N;

fluage = 1.11 mm;

pourcentage de bitume de 4.5%.

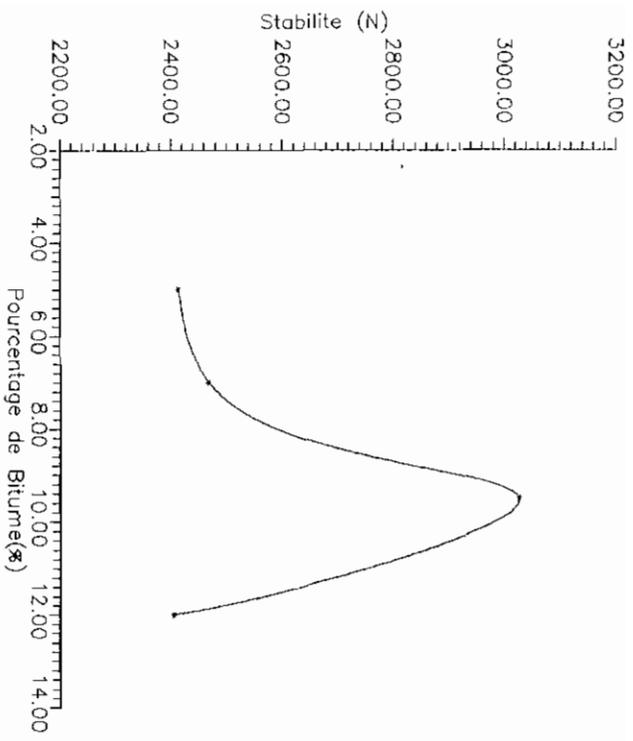


Fig. 2.3 : courbe de stabilité : sable de mer-bitume

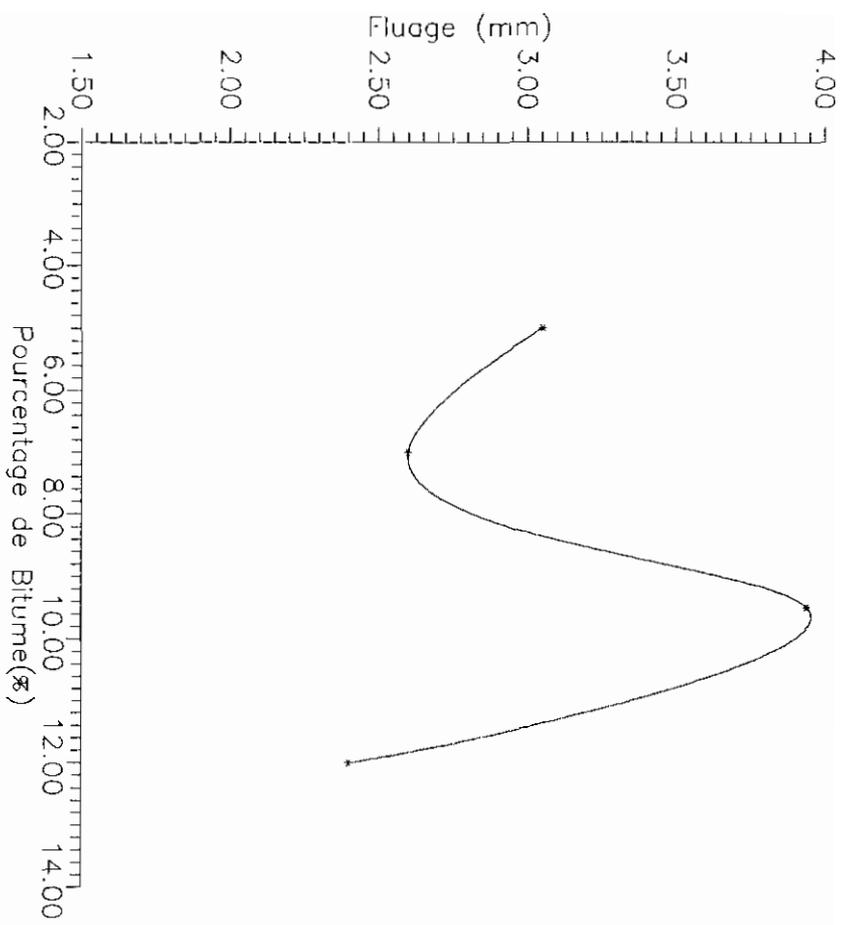


Fig. 2.4 : courbe de fluage : sable de mer-bitume

II.3.2.3: Mélange sable de dune(80%) et basalte 0/3 (20%)-bitume:

-Tableau 2.4 des résultats:essai Marshall

% bitume	Stabilité (N)	Fluage (mm)
4	3789.9	1.42
6	4707.8	1.3
8.5	4083.4	1.83
11	4615.2	2.12

-Courbe de stabilité ( fig 2.5 )

-Courbe de fluage ( fig 2.6 )

Combinaison retenue : stabilité=3789.9 N;

fluage =1.42 mm;

pourcentage de bitume de 4%.

II.3.2.4:Mélange sable de dune(70%) et basalte 0/3 (30%)-bitume:

-Tableau 2.5 des résultats:essai Marshall

% bitume	Stabilité (N)	Fluage (mm)
3.5	4233.6	2.26
5.5	3807.1	2.35
8	3696.9	2.54
10.5	3272.8	2.8

-Courbe de stabilité ( fig 2.5 )

-Courbe de fluage ( fig 2.6 )

Combinaison retenue : stabilité=4233.6 N;

fluage =2.26 mm;

pourcentage de bitume de 3.5%.

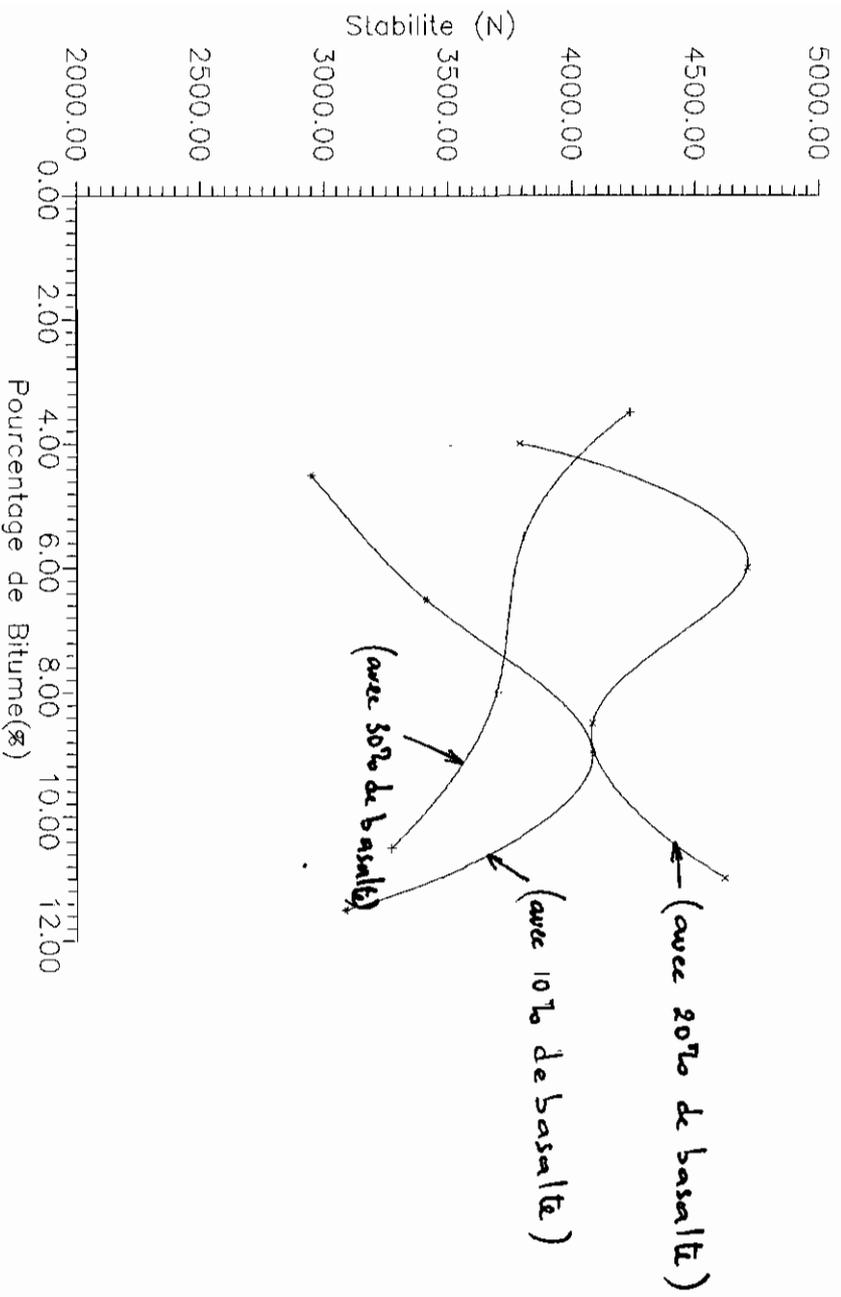


Fig. 2.5 : courbe de stabilité : melanges sable de dune, basalte 0/a - bitume

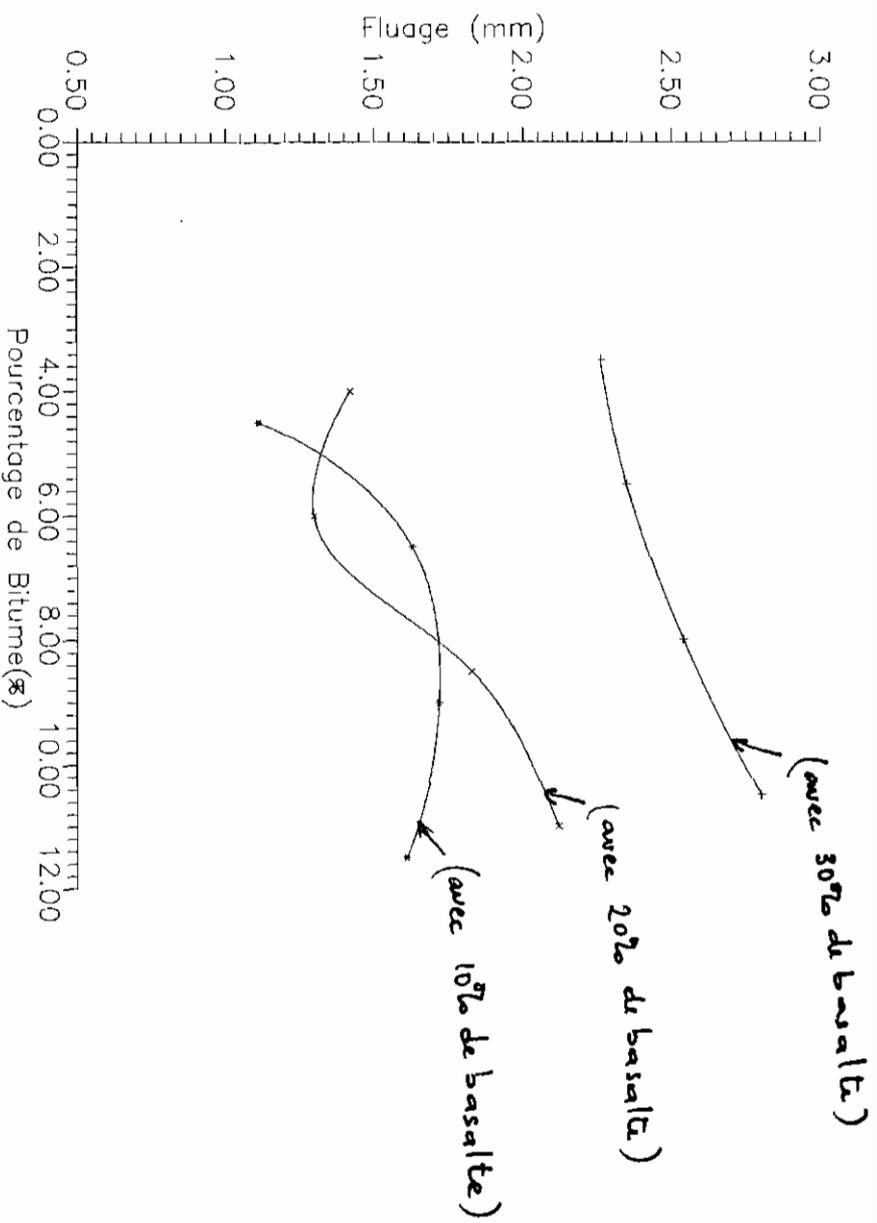


Fig. 2.6 : courbe de fluage : melanges sable de dune, basalte 0/3 - bitume

## CHAPITRE III

### ANALYSE ECONOMIQUE

L'importance de cette analyse réside dans le fait qu'elle conditionne la prise de décision sur l'utilisation de la présente technique expérimentée. Une comparaison sera donc effectuée entre la latérite non traitée, celle traitée au ciment et le sable-bitume sur les plans technique et économique. Cette comparaison se fera en s'appuyant sur un cas pratique à savoir le tronçon de la route nationale 2 allant de Guéoul à Baralé, deux provinces du Sénégal.

#### III - 1 Le Trafic

En avril 1992, il a été effectué un compactage routier en vue de déterminer le trafic sur le réseau routier sénégalais. En s'appuyant sur les résultats obtenus, on peut déterminer le trafic concernant le tronçon Guéoul-Baralé.

Les tableaux suivants donnent les résultats des comptages sur les tronçons Kébémér-Guéoul-Louga et Louga-Baralé-Saint-Louis.

TABLEAU 3.1: voir page suivante

TABLEAU 3.2: voir page suivante

( Source: Ministère de l'Equipement et des Transports Terrestres ).

Il faut remarquer que le caractère représentatif de ces résultats vient du fait que le mois d'Avril est le mois le plus important sur les routes à cause de la campagne agricole de commercialisation. C'est le mois où on a le trafic le plus important.

Bien que fondamentale, l'importance du trafic qu'aura à supporter la route durant la période pour laquelle on la dimensionne est toujours difficile à appréhender. Il arrive que les conditions économiques locale se modifient rapidement entraînant des trafics dont l'accroissement avait été sous-estimé. Dans le cas général, on admettra que les classes de trafic retenues sont définies de

# Tableau 3.1

Région de Louga

Tronçon de Kébémér à Louga (N-2)

Poste No. 0521

Sens: 2 directions

## TRAFFIC QUOTIDIEN MOYEN DURANT LA SEMAINE DE COMPTAGE

Type de véhicule	Jour	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Moyenne	
									Nombre	%
véhicule particulier		467	428	473	438	587	541	670	512	36,7
taxi interurbain		248	227	230	245	244	239	230	237	17,0
camionnette pass. - minibus		222	185	202	217	173	198	192	198	14,2
car et autocar		213	157	176	152	153	180	190	174	12,5
camionnette marchandises		28	34	32	36	29	31	19	29	2,1
camion deux essieux > 2 t.		112	144	114	88	116	71	57	100	7,2
camion + de 2 essieux		7	2	14	10	5	4	2	6	0,4
ensemble articulés		156	163	180	154	165	74	81	139	10,0
<b>TOTAL</b>		<b>1449</b>	<b>1337</b>	<b>1421</b>	<b>1337</b>	<b>1450</b>	<b>1338</b>	<b>1441</b>	<b>1398</b>	<b>100,0</b>
2 roues motorisées		16	11	1	18	6	10	5	10	
Autres		1	2	4	1	3	0	0	2	

## Tableau 3.2

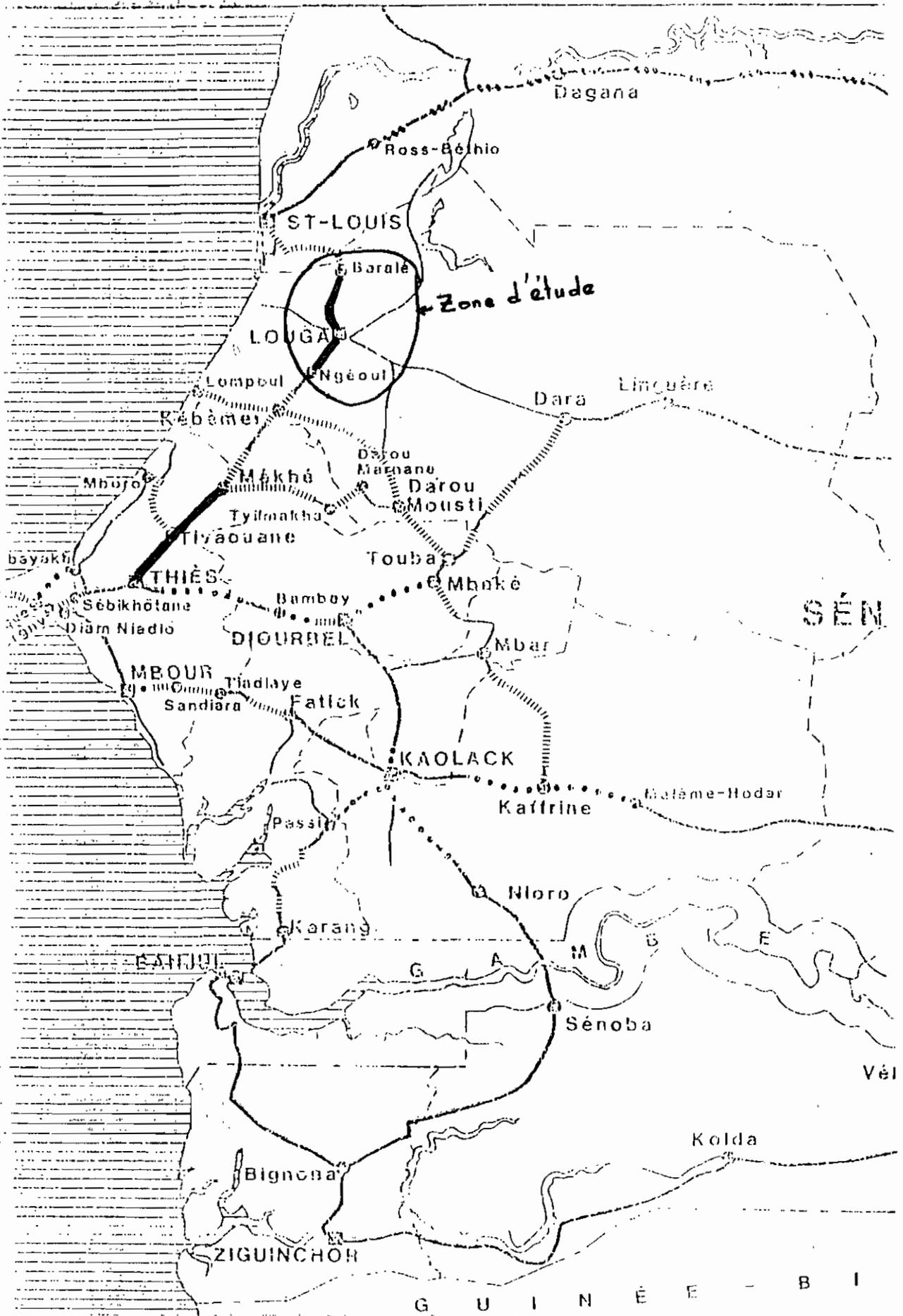
Région de Saint-Louis      Tronçon de Saint-Louis à Louga (N-2)

Poste No. 0602

### TRAFFIC QUOTIDIEN MOYEN DURANT LA SEMAINE DE COMPTAGE

Type de véhicule	Jour	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche	Moyenne	
									Nombre	%
véhicule particulier		433	410	412	438	502	607	667	481	36,6
taxi interurbain		200	210	207	210	223	233	229	216	16,4
camionnette pass. + minibus		220	188	181	212	233	259	207	214	16,3
car et autocar		174	122	172	159	148	174	130	154	11,7
camionnette marchandises		85	52	62	62	57	46	36	53	4,0
camion deux essieux > 2 t.		88	94	88	89	69	66	49	71	5,4
camion + de 2 essieux		27	22	34	41	33	28	19	29	2,2
ensemble articulé		99	98	116	105	104	82	70	96	7,3
<b>TOTAL</b>		<b>1283</b>	<b>1196</b>	<b>1250</b>	<b>1292</b>	<b>1368</b>	<b>1495</b>	<b>1307</b>	<b>1314</b>	<b>100,0</b>
2 roues motorisées		40	30	32	38	44	27	23	33	
Autres		2	3	5	2	0	0	0	2	

# PLAN DE LOCALISATION



plusieurs façons en fonction du degré de précision des données disponibles :

- trafic journalier toutes catégories de véhicules confondues;
- trafic cumulé de poids lourds (véhicules définis comme ayant un poids total, en charge supérieur à 2 t) ;
- trafic cumulé selon les équivalences d'essieux tirées des essais A ASHO par Liddle.

On va choisir la première classification dans notre cas. En effet, nous avons les résultats journaliers du comptage de véhicules dans la zone considérée.

Le trafic en nombre de véhicules par jour est défini par son intensité journalière moyenne sur une durée de vie de l'ordre de 15 ans, toutes classes de véhicules incluses. Le pourcentage moyen de poids lourds supposé de l'ordre de 30 % du trafic total. Cinq classes de trafic sont distinguées :

- $T_1$  < 300
- $T_2$  de 300 à 1000
- $T_3$  de 1000 à 3000
- $T_4$  de 3000 à 6000
- $T_5$  de 6000 à 12000

A partir des tableaux précédents de la page (...), nous avons pour la moyenne journalière un trafic de 1396 véhicules sur le tronçon Guéoul-Louga et de 1314 véhicules sur le tronçon Louga-Baralé. donc on peut dire qu'entre Géoul et Baralé on a un trafic du type  $T_3$ .

### III - 2 Les différentes variantes

#### III - 2.1 Latérite non traitée

On appelle latérites tous les sols rédisuels rougeâtres et tous les sols non résiduels ayant subi les processus d'altération tropicale. Elles se situent dans une chaîne de matériaux allant de la roche décomposée aux argiles et aux cuirasses (croûtes indurées) riche en sesquioxydes.

Les matériaux dit latéritiques sont présents sur pratiquement tout le territoire du Sénégal et cela est déjà justifié par le climat

tropical à deux saisons (une saison de pluie de juillet à octobre et une saison sèche assez longue de novembre à juin) qui y prévaut. Mais ce qu'il faut remarquer c'est que les trois grandes zones d'affleurement de cuirasses latéritiques se trouvent au centre-ouest, au sud et au sud-est du pays.

L'utilisation de loin la plus répandue de ces matériaux est dans l'édification des pistes en terre et des couches de base de routes. Pour que cette utilisation soit possible, il faut que la portance du matériau de la carrière considérée soit bonne. La portance d'une fondation ou d'une couche de base est son aptitude à transmettre les forces verticales dues au passage ou au stationnement des véhicules. Elle s'apprécie au moyen de divers essais dont les plus utilisés sont l'essai C.B.R. et les essais de chargement. Dans le cas actuel, on va utiliser le C.B.R. défini par un indice. Le C.B.R. est un essai mécanique de pénétration à vitesse constante. La résistance du sol au poinçonnement est mesurée et comparée à celle d'un macadam standard essayé dans les mêmes conditions. L'indice C.B.R. est égal au rapport de ces résistances. Diverses spécifications fixent les valeurs minimales de C.B.R. en fonction de l'emploi que l'on souhaite faire du sol. On admet généralement 60 à 80 pour les couches de base.

Dans le cas du tronçon Guéoul-Baradé, la carrière la plus proche de latérite utilisable est celle de Lam-Lam dans le cadre du P.A.S.T, lors des études préliminaires, les mesures de C.B.R. ont montré que le matériau présentait un indice de portance de l'ordre de 100 à l'état naturel.

Cette latérite est donc largement utilisable en couche de base sous sa forme naturelle.

### III - 2.2 Latérite traitée au ciment

Les graveleux latéritiques naturels peuvent être rendus aptes à être utilisés en couche de base par un traitement au ciment. Le matériau amélioré sera considéré comme satisfaisant si le C.B.R. à 95 % OPM, après 3 jours de cure à l'air et 4 jour d'immersion, est

supérieur à 160. Avec la latérite de Lam-lam qui, à l'état naturel, à un C.B.R. de 100, un ajout de 2,5 % de ciment entraîne un indice qui dépasse 200. Mais dans le but de restreindre au maximum les risques de retrait, le taux de 2,5 % a été retenu.

III.2.3 Le sable\_bitume:

Pouvant servir de couche de base comme les autres variantes, le sable\_bitume devra remplir les conditions suivantes:

- \* stabilité Marshall supérieure à 2500 N
- \* fluage inférieur à 5 mm.

Les combinaisons retenues dans le chapitre précédent au paragraphe II.3.2 représenteront le sable\_bitume dans cette présente comparaison. Il s'agit du tableau suivant:

Tableau 3.3: Comparaison des combinaisons retenues

Matériaux	% Bitume	Stabilité (N)	Fluage (mm)
sable de mer-bitume	8	2600	2.7
sable de dune (90%) et basalte 0/3 (10%)-bitume	4.5	2947.43	1.11
sable de dune (80%) et basalte 0/5 (20%)-bitume	4	3789.9	1.42
sable de dune (70%) et basalte 0/8 (30%)-bitume	3.5	4239.6	2.26

**III.3 ETUDE ECONOMIQUE**

Tout d'abord, il y a lieu de poser un certain nombre d'hypothèses pour mener à bien cette évaluation financière que nous tentons de faire.

Les hypothèses sont les suivantes :

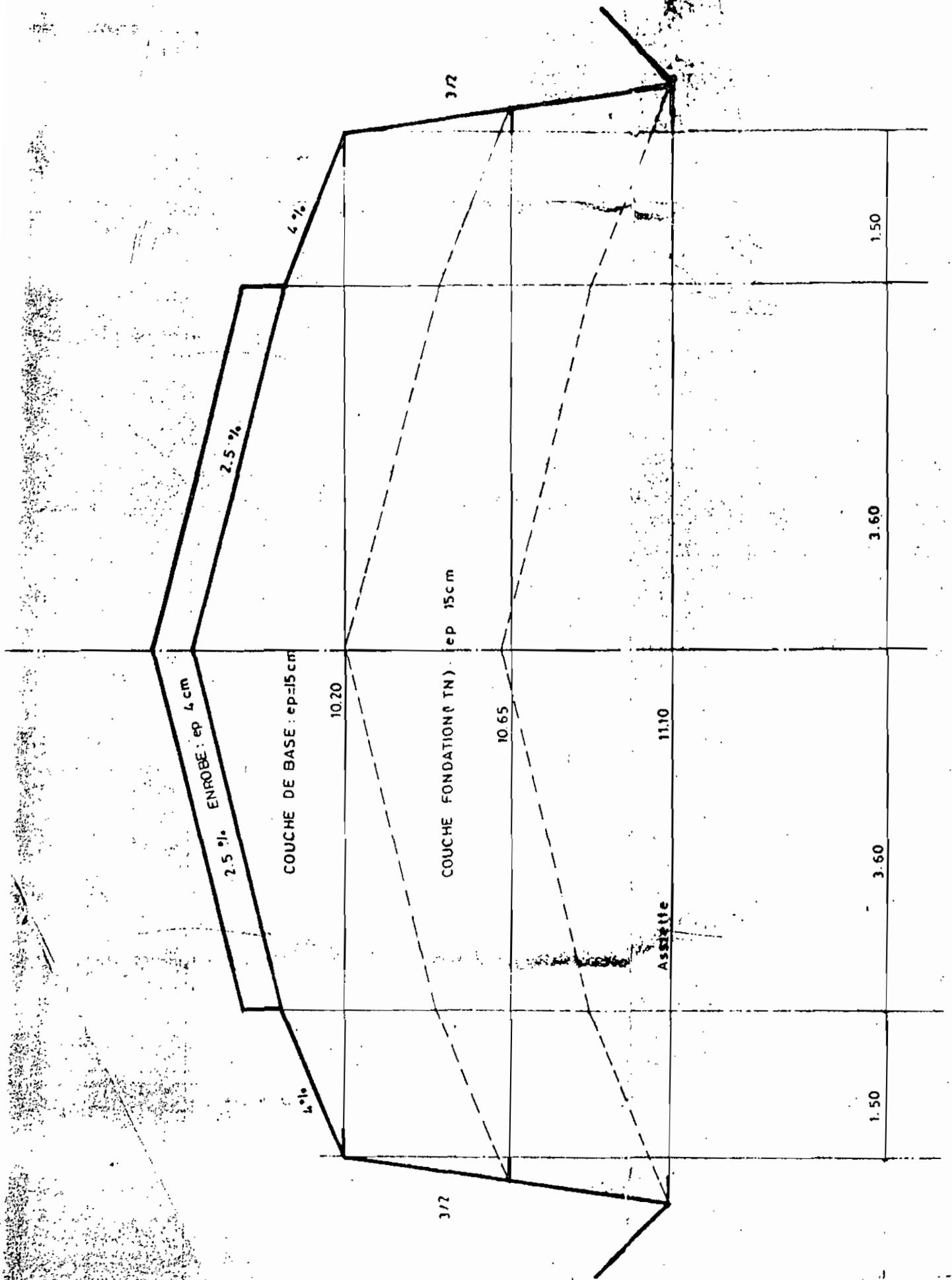
- 1) le sable de dune ne sera ni acheté ni déplacé car disponible au lieu de la mise en oeuvre;
- 2) les différents prix employés sont utilisés par les entreprises JEAN LEVEBvre DAKAR et Monsieur MAPATHE N'DIOUCK propriétaire de carrière et transporteur;
- 3) la couche de base de la route aura les caractéristiques suivantes :
  - \* largeur : 10,20m
  - \* épaisseur : 15cm
- 4) on va évaluer le coût pour un kilomètre de route;
- 5) on va évaluer pour chaque variante (latérite non traitée, latérite traitée au ciment, sable-bitume) les coûts de l'ensemble des matériaux mis en oeuvre.

**III.3.1 LATÉRITE NON TRAITÉE**

Dans ce cas, le gerbage par un bulldozer et transport seront pris en compte. Les prix de location pour la journée de 8H de travail de camions avec carburant à la charge du transporteur sont les suivants :

**TABEAU 3.4: Prix de location de camion suivant sa capacité**

Capacité Camion	Prix de location (F cfa)
8 m <sup>3</sup>	35.000
16 m <sup>3</sup>	70.000
20 m <sup>3</sup>	80.000



Il y a un autre type de tarification qui est caractérisé par le prix du mètre-cube transporté par kilomètre. Ce prix est de 76<sup>F</sup>CFA/m<sup>3</sup>/km. C'est cette tarification qui sera utilisée pour tenir compte de la distance de transport. Pour le gerbage, nous avons le prix du mètre-cube de latérite gerbée à 300<sup>F</sup>CFA. La distance entre Guéoul et la carrière de latérite de Lam-Lam est de 100km. Le volume de latérite utilisée pour faire un kilomètre de couche de base est le suivant :

$$\text{Volume compacte : } V_c = 10,5 * 0,15 * 1000 = 1575$$

$$\text{Volume foisonné : } V_f = V_c * \text{coefficient de rendement}(C_r)$$

$$C_r = \frac{\text{quantité foisonnée}}{\text{quantité compactée}} = 1,4$$

$V_f = V_c * C_r = 10,5 * 0,15 * 1000 * 1,4 = 2205 \text{ m}^3$  le prix sera :

$$P_1 = V_f * 300 + V_f * 100 * 76 = V_f (300 + 7600) = 17.419.500^{\text{F}}\text{CFA}$$

On a donc, pour un kilomètre de couche de base en latérite non traitée, la somme  $P_1$  à dépenser pour avoir la quantité nécessaire de latérite à mettre en oeuvre.

### III.3.2 LATÉRITE TRAITÉE AU CIMENT

On va utiliser un pourcentage de 2,5% de ciment comme dans le cas du P.A.S.T. le renforcement de la route Thies-Mékhé pour l'amélioration de la latérite. Avec le volume foisonné de matériaux nécessaire pour avoir un kilomètre de couche de base avec une épaisseur de 15 cm et une largeur de 10,2 m déjà connu, on peut déterminer les volumes de latérite et de ciment:

$$V_{\text{ciment}} = 0,025 * M_m * 1 / M_{\text{ciment}}$$

$$M_m = V_f (0,975 * 2430 + 0,025 * 1140) = 2205 * (207675 + 28,5) = 4642076,3 \text{ kg}$$

$$V_{\text{ciment}} = 0,025 * 4642076,3 * 1 / 1140 = 101,8 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{ciment}} = 101,8 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{lat}} = 0,975 * M_m * 1 / M_{\text{vlat}} = 0,975 * 4642076,3 * 1 / 2130 = 2124,9 \text{ m}^3$$

la masse du ciment sera donc :

$$\text{Masse de ciment} = M_c = 101,8 * 1140 = 116052 \text{ kg}$$

Avec 34<sup>F</sup>CFA le kilogramme, le prix total du ciment pour 1 km de couche de base :

$$P_c = 116052 * 34 = 3.945.768^{\text{F}}\text{CFA}$$

De la même manière, on va calculer le prix de la latérite avec 76<sup>F</sup>CFA/m<sup>3</sup>/km et 300<sup>F</sup>CFA par m<sup>3</sup> gerbé, étant entendu que la latérite sera transportée sur une distance de 100 km.

$$P_{\text{lat}} = 2124,9 * (76 * 100 + 300) = 16.786.710^{\text{F}}\text{CFA};$$

le prix global sera donc :  $P_c + P_{\text{lat}} = P_t$

$$P_t = 20.732.478^{\text{F}}\text{CFA}$$

III.3.3 SABLE-BITUME

Pour cette dernière variante, on va étudier économiquement chacun des types de mélanges retenus dans le chapitre précédent.

Les prix pratiqués seront :

- pour le bitume 40/50 : 57500<sup>F</sup>CFA par tonne (Jean Levevre : 1,1\*prix interne d'entreprise);

- pour le basalte 0/3 : 5500<sup>F</sup>CFA par tonne (Mr Mapathé N'diouck : transporteur et propriétaire de carrière);

- pour le transport de basalte 0/3 = 43<sup>F</sup>CFA par tonne par kilomètre (Mr Mapathé N'diouck transporteur et propriétaire de carrière);

- pour le sable de mer : 2250<sup>F</sup>CFA par mètre-cube.

III.3.3.1 SABLE DE MER-BITUME

Ayant  $V_f = 2205 \text{ m}^3$ , on a, avec un pourcentage de bitume de 8%, les masses suivantes de sable de mer et de bitume

$$V_f = \frac{M_{sm}}{M_{vsm}} + \frac{M_b}{M_{vb}}$$

$$M_b = M_s * 8/92$$

2250

$$M_{sm} = \frac{2250}{1/1500 + 8/92 * 1050} = 2.942.030,4 \text{ kg}$$

$$M_b = 8/92 * M_s = 255828,73 \text{ kg}$$

le prix sera

$$P_t = (255828,73 * 10^{-3} * 57500) + (2.942030,4 * 2250 / 1500)$$

$$P_t = 19.123.198^{\text{F}}\text{CFA.}$$

Avec : \*  $M_{sm}$  : masse sable de mer

\*  $M_{vsm}$  : masse volumique sable de mer

\*  $M_b$  : masse de bitume

\*  $M_{vb}$  : masse volumique du bitume

### III.3.3.2 SABLE DE DUNE (90%) ET BASALTE 0/3 (10%)-BITUME

La combinaison retenue est de celle avec 4,5% de bitume, 2947.43 N de stabilité et 1.11 mm de fluage.

$$M_{sd} = 0,9 M_n = 2647827,4 \text{ kg}$$

$$M_{bas} = 0,1 M_n = 294203,04 \text{ kg}$$

$$M_b = M_n * 4,5 / 95,5 = 138629,7 \text{ kg}$$

le prix est de

$$P_t = [(5500+43*100)(294203,04.10^{-3})+(57500*138629,7.10^{-3})] \\ + 2647827,4 = 13502225 \text{ }^{\text{F}}\text{CFA.}$$

$P_t = 13502225 \text{ }^{\text{F}}\text{CFA}$
--

- Avec :
- \*  $M_{sd}$  : masse sable de dune
  - \*  $M_m$  : masse du mélange
  - \*  $M_{bas}$  : masse de basalte
  - \*  $M_b$  : masse de bitume
  - \*  $P_t$  : prix total

### III.3.3.3 SABLE DE DUNE (80%) ET BASALTE 0/3 (20%)-BITUME

La combinaison retenue est celle avec 4% de bitume, 3789.9 N de stabilité et 1.42 mm de fluage.

$$M_{sd} = 0,8*M_m = 2353624,4 \text{ kg}$$

$$M_{bas} = 0,2*M_m = 588406,08 \text{ kg}$$

$$M_b = M_m*4/96 = 122584,6 \text{ kg}$$

Ce qui donne le prix suivant :

$$P_t = (5500+43*100)(588406,08.10^{-3})+(57500*122584,6.10^{-3}) \\ + 2353624,4$$

$$P_t = 15.168.618 \text{ }^{\text{F}}\text{CFA.}$$

Avec : \*  $M_{sd}$  : masse sable de dune

\*  $M_m$  : masse du mélange

\*  $M_{bas}$  : masse de basalte

\*  $M_b$  : masse de bitume

\*  $P_t$  : prix total

III.3.3.4 SABLE DE DUNE (70%) ET BASALTE 0/3 (30%)-BITUME

La combinaison retenue est celle avec 3,5% de bitume, 4233.6 N de stabilité et 2.26 mm de fluage.

$$M_{sd} = 0,7 * M_m = 2059421.4 \text{ kg}$$

$$M_{bas} = 0,3 * M_m = 882609,12 \text{ kg}$$

$$M_b = M_m * 3,5 / 96,5 = 106705,77 \text{ kg}$$

Ce qui donne le prix suivant :

$$P_t = (5500 + 43 * 100) (882609,12 \cdot 10^{-3}) + (57500 * 106705,77 \cdot 10^{-3}) + 2059421,4$$

$P_t = 16.844.572 \text{ FCFA}$
---------------------------------

- Avec : \*  $M_{sd}$  : masse sable de dune  
 \*  $M_m$  : masse du mélange  
 \*  $M_{bas}$  : masse de basalte  
 \*  $M_b$  : masse de bitume  
 \*  $P_t$  : prix total

**TABLEAU RÉCAPITULATIF**

Dans ce tableau, il sera assigné les différentes solutions retenues à partir de l'étude expérimentale avec leurs performances ainsi que les coûts qu'elles occasionnent pour un kilomètre de couche de base.

**TABLEAU 3.5 : Récapitulation des solutions**

Solution	Stabilité (H)	Fluage (mm)	Coût (Fofa)
Sable de mer (8% de bitume)	2600	2.7	19123198
Sable de dune (90%) et Basalte (10%) (4.5% de bitume)	2947.43	1.11	13002225
Sable de dune (80%) et Basalte (20%) (4% de bitume)	3789.9	1.42	15168618
Sable de dune (70%) et Basalte (30%) (3.5% de bitume)	4233.6	2.26	16344572

Solution	C.B.R. (%)	Coût (Fofa)
Latérite non traitée	100	17.419.500
Latérite traitée au ciment	200	24.446.803

A première vue, nous remarquons que toutes les combinaisons de sable-bitumes sont moins chères que la latérite traitée au ciment. Aussi les mélanges sable de dune-basalte 0/3 -bitume ont les coûts les élevés. Étant donné que toutes les combinaisons assignées dans le tableau précédent répondent aux exigences de performances techniques, on peut affirmer, sans risque de nous tromper et en se basant sur ces études ( bibliographique, expérimentale et économique ), que le sable-bitume répond bien nos attentes.

Dans le tableau qui suit, on va discrétiser le linéaire en tronçons de 5 km pour voir l'effet de la variation de la distance de transport sur le coût total de la solution.

## DISCRETISATION DU LINEAIRE EN FONCTION DU PRIX

Solutions	Coût global en F cfa								
	à 5 km	à 10 km	à 15 km	à 20 km	à 25 km	à 30 km	à 35 km	à 40 km	à 46 km
Latérite non traitée	18257400	19095300	19933200	20771100	21609000	22446900	23284800	24122700	25128180
Latérite traitée au ciment	21539940	22347402	23154864	23962326	24769788	25577250	26384712	27192174	28161128
Sable de dune(90%) et basalte 0/3(10%)-bitume	13565479	13623732	13691986	13755240	13818493	13881747	13945001	14008254	14084159

Remarque: on constate évidemment qu'en faisant varier la distance, le coût varie. Aussi les écarts entre les coûts des différentes solutions sont pratiquement les mêmes que dans le cas où on a pris une distance moyenne de transport de 123 km. Etant donné que les autres variantes de sable-bitume suivent la même évolution que celle du tableau, cette discrétisation ne fait que confirmer le tableau 3.5.

## CONCLUSION et RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de cette présente étude était de voir dans quelles mesures il était possible d'utiliser le sable-bitume comme couche de base pour la construction routière. C'était une manière d'utiliser le sable dont regorge le pays à un autre secteur de la construction ; tout ceci étant guidé par un souci d'économie et de limitation de l'utilisation de la latérite.

C'est dans cette lancée qu'on a essayé de voir si les performances techniques du sable-bitume permettent son utilisation et ensuite d'évaluer les incidences financières d'une telle solution. Les résultats de cette étude montrent qu'il est effectivement possible de substituer le sable-bitume à la latérite traitée au ciment ou non et à moindre frais. En effet, aussi bien pour le sable de mer que pour le sable de dune mélangé à du basalte 0/3 suivant un certain pourcentage, on a trouvé qu'il est possible techniquement de faire des couches de base (en sable de mer-bitume ou en sable de dune et basalte 0/3-bitume) répondant aux critères de portance et de déformabilité requis.

Pour le premier cas, avec 8% de bitume, on a une stabilité et un fluage satisfaisant. Dans le second cas qui était divisé en sous cas suivant le pourcentage de basalte 0/3 ajouté au sable de dune, les résultats obtenus satisfont les critères techniques pour supporter un trafic de type  $T_3$ . Des investigations auprès

d'entreprises et de transporteurs de la place ont permis de fixer les prix de revient des matériaux considérés dans la présente étude. Ces prix ont été utilisés dans l'estimation du coût du kilomètre de couche de base pour chaque solution.

Ayant tous ces prix, il nous a été évidemment facile de choisir la solution la moins chère comme étant la plus rentable dans la mesure où toutes les solutions étudiées économiquement satisfaisaient déjà les conditions techniques requises.

Au terme de cette étude économique, la solution qui s'est révélée comme étant la moins chère est celle consistant à mélanger 90% de sable de dune avec 10% de basalte 0/3 et 4,5% de bitume 40/50 pour un coût global de 13.502.225 <sup>F</sup> cfa au km. Une telle conclusion nous reconforte dans la mesure où elle démontre que le sable-bitume constitue un substitut viable à la latérite.

Maintenant il s'agit de voir les limites d'une telle étude pour voir dans quelles mesures elle sera améliorée. Et pour ce faire nous formulons les recommandations suivantes:

1°) étudier plus en détail les propriétés du sable à utiliser notamment ses limites d'Atterberg, surtout pour les sables à fort pourcentage d'argile, sa propreté (équivalent de sable, essai au bleu de méthylène), sa teneur en matières organiques, son acidité-basicité et la friabilité des grains car celles-ci pourraient influencer le comportement à court, moyen et long terme de la couche de base.

2°) diversifier davantage les types de mélanges à examiner pour être plus précis sur les résultats escomptés. Les seuils minimaux de pourcentage de bitume et de basalte 0/3 peuvent être abaissés pour mieux explorer les performances des mélanges à faible taux de liant et de concassés.

3°) évaluer avec précision l'incidence financière de la mise en oeuvre de chaque solution retenue. Ce qui pourrait impliquer certaines modifications plus ou moins importantes sur le coût global de la solution étudiée.

4°) étendre l'investigation pour les prix à d'autres entreprises car nous nous sommes limités à une seule entreprise et à un seul transporteur exploitant de carrière pour des problèmes de temps.

5°) penser à un autre type d'essai de stabilité comme l'essai Hubbard-Field afin d'être plus précis sur les expériences.

6°) se rapprocher le plus possible des conditions de chantier pour avoir des résultats davantage fiables.

7°) faire des investigations sur les emprunts de sable dans les localités les déficitaires en latérite.

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] **ARRAMBIDE J., DURIEZ M.** 1954. Liants Hydrocarbonés: Mortiers et Bétons Bitumineux. DUNOD.92,Rue Bonaparte (VI) Paris.
- [2] **BCEOM.** 1993. Contrôle des Travaux "Renforcement de 287 Km de Routes Bitumées. Lot N°1: Thiès-Tivaouane-Mékhé." Rapport Final. Dakar.
- [3] **BCEOM-CEBTP.**1972. Manuel sur les Routes dans les Zones Tropicales et Désertiques.Tome 3 "Entretien et Exploitation de la route." SECRETARIAT D'ETAT AUX AFFAIRES CHARGE DE LA COOPERATION.
- [4] **CEBTP.**1984. Guide Pratique de Dimensionnement des Chaussées pour les Pays Tropicaux.Minitère des Relations Extérieures Coopération et Développement.République FRANÇAISE.
- [5] **CHAUVIN J.J.** Les Sables,Guide Pratique d'Utilisation Routière. ISTED.38,rue Liancourt 75014 Paris France.

- [6] **CROTTAZ R., MOUSSALY N.** 1985. Tracé des Voies de Circulation Tome 1. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [7] **JEUFFROY G.** 1967. Conception et Construction des Chaussées, Tome 2 "Les matériaux, les matériels, les techniques d'exécution des travaux." Editions EYROLLES. 61, Boulevard Saint-Germain Paris\_V°.
- [8] **KEITA A.** 1992. Projet de Fin d'Etudes " Rationalisation des Procédures de Fabrication d'enrobés stockables, interaction et compatibilité des différents constituants." Ecole Polytechnique de Thiès.
- [9] **Manuel de Laboratoire de Voirie.** Ecole Polytechnique de Thiès.

# *ANNEXES*

Sable de mer

Tableau des résultats: ANALYSE GRANULOMETRIQUE

N° Tamis	% Retenu	Diamètre(mm)	% Passant
20	0	0.85	100
40	9.24	0.42	90.76
50	24.3	0.3	75.7
60	35.1	0.25	64.9
100	88.2	0.15	11.8
140	99.6	0.105	0.4
200	99.98	0.074	0.02

Sable de dune:

Tableau des résultats: ANALYSE GRANULOMETRIQUE

N° Tamis	% Retenu	Diamètre(mm)	% Passant
20	0	0.85	100
40	8	0.42	92
50	30	0.3	70
60	45	0.25	55
100	70	0.15	30
140	81	0.105	19
200	92	0.074	8

**Concassé 0/3 :**

**Tableau des résultats: ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

N° Tamis	% Retenu	Diamètre(mm)	% Passant
4	0	4.75	100
5	0.62	4	99.38
10	29.02	2	70.98
16	37.89	1.18	62.11
20	49.08	0.85	50.92
30	60.96	0.6	39.04
40	66.87	0.425	33.13
50	72.09	0.3	27.91
60	74.5	0.25	25.5
80	81.55	0.18	18.45
100	82.61	0.15	17.39
140	85.41	0.106	14.59
200	85.6	0.075	14.4

Sable de dune(90%) et basalte 0/3(10%):

Tableau des résultats: ANALYSE GRANULOMETRIQUE

N° Tamis	% Retenu	Diamètre(mm)	% Passant
4	0	4.75	100
5	0.6	4	99.4
10	29	2	71
16	37.9	1.18	62.1
20	49.09	0.85	50.91
40	56.16	0.425	43.84
50	66.51	0.3	33.49
80	82.57	0.25	17.43
100	95	0.15	5
140	99.07	0.106	0.93
200	99.92	0.075	0.08

**Sable de dune(80%) et basalte 0/3(20%):**

**Tableau des résultats: ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

N° Tamis	% Retenu	Diamètre(mm)	% Passant
4	0	4.75	100
5	0.6	4	99.4
10	29	2	71
16	37.9	1.18	62.1
20	49.09	0.85	50.91
40	59.16	0.425	40.84
50	74.85	0.3	25.15
80	87.65	0.25	12.35
100	96.6	0.15	3.4
140	99.38	0.106	0.62
200	99.94	0.075	0.06

**Sable de dune(70%) et basalte 0/3(30%):**

**Tableau des résultats: ANALYSE GRANULOMETRIQUE**

N° Tamis	% Retenu	Diamètre(mm)	% Passant
4	0	4.75	100
5	0.6	4	99.4
10	29	2	71
16	37.9	1.18	62.1
20	49.09	0.85	50.91
40	62.2	0.425	37.8
50	78.3	0.3	21.7
80	89.99	0.25	10.01
100	97.4	0.15	2.6
140	99.54	0.106	0.46
200	99.96	0.075	0.04

## PROCEDURE DE L'ESSAI MARSHALL

La méthode de MARSHALL est récente et est utilisée dans cinq états américains. Le Corps of Engineers fut amené, lors de la seconde guerre mondiale, à mettre au point une méthode d'étude des enrobés denses et des bétons bitumineux pour les pistes d'aérodromes et pour les routes soumises à un trafic lourd. Il a cherché en particulier à réaliser au laboratoire un compactage qui s'approche autant que possible de celui réalisé sur chantier et immédiatement après la mise en service du revêtement. Enfin, il s'est attaché à un appareillage simple qui soit facilement utilisable dans les laboratoires mobiles. Les recherches ont amené le Corps of Engineers à retenir la méthode proposée par Bruce MARSHALL du Mississippi State Highway Department, et ses études sur pistes d'essais lui ont permis de fixer certaines spécifications auxquelles doivent satisfaire les mélanges.

Elle permet d'étudier rationnellement la composition d'un mélange bitumineux, non seulement du point de vue de la teneur en liant, mais aussi du point de vue de la composition granulométrique. L'intérêt de cette méthode est d'être simple et de n'exiger qu'un appareillage très réduit, soit une presse C.B.R normale et un appareil spécial composé essentiellement de deux mâchoires cylindriques qui enserrent une éprouvette soumise à la compression suivant un plan diamétral (essai de type brésilien). Cet essai permet non seulement une étude rationnelle et

relativement rapide au laboratoire, mais encore de contrôler, par sa simplicité de préparation des éprouvettes et sa rapidité d'exécution, la performance des bétons bitumineux préparés sur le chantier.

La mesure de stabilité Marshall consiste à écraser à 60°C, entre deux machines, une éprouvette cylindrique de 10 cm de diamètre et 6,3 de hauteur. Les mâchoires s'appuient sur deux génératrices opposées et la vitesse d'avancement est constante et est égale à 50 mm par minute. On note l'effort maximum de la presse et la déformation diamétrale de l'éprouvette au moment de la rupture, c'est-à-dire déformation correspondant à cet effort maximal. L'effort maximum est la stabilité et la déformation à ce stade est l'écrasement (ou le fluage). La préparation des éprouvettes revêt une grande importance. Tout d'abord, il faut mettre en condition les matériaux. La première étape est de chauffer le bitume aux environs de 170°C, le sable à 170°C également. Ensuite on pèse trois fois 1200 g de sable pour pouvoir confectionner trois éprouvettes par mélange.

Ce sable est mis dans le bol du malaxeur qui est chauffé préalablement aux environs de 150°C.

Après avoir mis les différentes proportions de matériaux (bitume et sable pour chaque type de mélange), on procède au mélange bien homogène. Au préalable, on doit procéder au calcul des poids de bitume à mélanger avec le sable suivant les pourcentages retenus.

A titre d'exemple, on peut prendre le cas suivant :

$M_s$  = Masse de sable

$M_b$  = Masse de bitume

P = Pourcentage de bitume

On a 
$$M_b = M_s \times \frac{P}{100 - P}$$

Si :  $M_s = 1200$  g (pour une éprouvette)

$P = 12$  %

$$M_b = 1200 \times \frac{12}{100 - 12} = 164 \text{ g (pour une éprouvette)}$$

Le mélange est mis dans des moules en acier et compactés par damage, avec un outil spécial. Le moule et la dame sont évidemment chauffés au préalable (entre 95 et 150°C).

Un morceau de papier filtre découpé au calibre du moule est placé au fond de celui-ci afin que le mélange soit introduit de manière à faciliter l'enlèvement de la plaque de base après compactage et rendre régulière la surface de base des éprouvettes. Une fois le mélange mis dans les moules, on procède immédiatement au compactage (Norme ASTM D1559-76; en considérant un trafic moyen  $T_3$ , on appliquera 50 coups sur chaque face) en prenant aussi le soin de placer un second papier-filtre au haut de l'éprouvette. Le moule essemblé (équipé de sa hausse) est alors placé sur une base de compactage suffisamment lourde ; la dame de compactage est placée sur l'éprouvette, mais avant on applique manuellement d'abord une dizaine de coups de dame sur la face supérieure. Ensuite les 40 coups restant pour cette face avec l'appareil de compactage. Après quoi la plaque de base est enlevée, ainsi que la hausse ; le moule est retourné et assemblé à nouveau de sorte que la plaque de base soit adjacente au sommet initial de l'éprouvette. 50 coups de dame sont alors appliquées sur cette face de l'éprouvette. On enlève la plaque de base et la hausse, et le moule est exposé au moins pendant 24 h à la température du laboratoire avant de démouler à l'aide d'une presse. Après démoulage, l'éprouvette est curée pendant 24 h à l'air sur une surface lisse horizontale avant l'essai. Il faut dire aussi que les

épreuves peuvent être écrasées à tout moment , après leur préparation. Mais pour s'approcher des conditions de chantier (Rouler dessus après 24 h), on a choisit de les écraser après 24 h.

Avant l'écrasement des éprouvettes, leurs poids sont déterminés en les plaçant dans l'air et dans l'eau, de manière à obtenir le volume et leur densité (Norme ASTM D1188-71). Aussi pour chaque éprouvette, on mesure trois fois la hauteur. Ensuite l'échantillon est immergé dans un bain d'eau à 60°C et ceci durant 30 mn au moins. L'éprouvette est alors prête pour l'essai de stabilité et de fluage. Toutefois, l'essai ne peut débuter avant que l'appareil n'ait été préparé comme suit :

1) Les surfaces intérieures des mâchoires supérieure et inférieure , ainsi que leurs lignes de guidage , doivent être parfaitement nettoyées, les tiges servant de guides étant bien graissées et la mâchoire supérieure d'écrasement reposant librement sur la mâchoire inférieure.

2) Le jeu entre les deux mâchoires sera juste suffisant pour permettre l'introduction de l'éprouvette. Une fois les préparatifs terminés, l'éprouvette est retirée du bain d'eau chaude et placée dans la position d'essai dans la mâchoire inférieure d'écrasement. Tout l'assemblage est placé ensuite en position d'essai sur la presse. On place le jauge de fluage sur un des guidages et règle à zéro en tenant fermement le manchon sur le segment supérieur de la mâchoire. On tient le manchon du jaugeur de fluage sur le segment supérieur de la mâchoire lors de l'application de la charge.

Nous appliquons la charge sur l'éprouvette au moyen de vérin à une vitesse de 51 mm /min jusqu'à ce que l'on atteigne la charge maximale qui diminuera par la suite. La lecture du cadran micrométrique est notée à partir du moment où la charge maximale commence à diminuer. On note la valeur du fluage en unités de 0,25 mm. Pour éviter un refroidissement excessif de l'éprouvette, qui aurait pour effet un accroissement de la stabilité, l'essai doit être fait rapidement ; normalement l'écrasement de l'éprouvette doit débuter au plus tard 30 secondes après le retrait de l'échantillon du bain de 60°C. Il faut remarquer enfin que lorsque la hauteur de l'éprouvette n'est pas égale à 6,3 cm, la valeur de

la stabilité mesurée doit être corrigée par un facteur approprié qui est tiré du tableau des facteurs de correction (Stabilité Marshall ).



TABLEAU DE MESURES (sable de mer)

Numéro Echant.	% Bitume	Hauteur Moyenne	POIDS		Stabilité	Fluage	Temps(s)
			A l'air	A l'eau			
1	5	54	801	353,7	42,4	12,8	40
2	5	57,6	823	359	44	11,2	35
3	5	55,2	845	371,5	43,5	12,56	38
4	7	69,6	1087,5	494,4	62	8,8	37
5	7	62,8	952,4	430,1	54	12,4	35
6	7	60,4	871,4	383,6	53	9,84	30
7	9,5	52,2	812,2	385,6	53	13,48	35
8	9,5	54,6	841,6	395,5	53,5	15,8	25
9	9,5	59,1	905,8	419,7	55	18	30
10	12	57,5	931	449,8	45	5,92	27
11	12	55,5	882	422,8	43	11,2	29
12	12	55,3	861	414,1	44	12	25

TABLEAU DE RESULTATS (sable de mer)

Numéro Echant.	% Bitume	Densité Relative	Masse Volumique	Volume Eprouv	Facteur Correct	Force max (N)	STABILITE		FLUAGE (mm)	
							corr (N)	Lecture	Lecture	Moyenne
1	0,5	2,27	2270	437,8	1,32	1886,05	2489,6	2414,3	3,2	3,05
2	5	2,27	2270	466,98	1,176	1957,2	2301,7	2414,3	2,8	3,05
3	5	2,27	2270	447,5	1,267	1935	2451,6	2414,3	3,14	3,05
4	5	2,23	2230	564,3	0,84	2846,9	2391,4	2468,06	2,2	2,6
5	7	2,23	2230	519,14	1,02	2402,4	2450,08	2468,06	3,1	2,6
6	7	2,23	2230	489,7	1,087	2357,6	2562,7	2468,06	2,46	2,6
7	7	22,13	22130	423,2	1,4	2357,6	3300,6	3026,6	3,37	3,94
8	9,5	2,13	2130	442,6	1,294	2290,8	2964,3	3026,6	3,95	3,94
9	9,5	2,13	2130	479,1	1,13	2491	2814,8	3026,6	4,5	3,94
10	9,5	2,08	2080	466,2	1,18	2001,7	2362	2406,3	1,48	2,4
11	12	2,08	2080	449,9	1,25	1912,7	2390,9	2406,3	2,8	2,4
12	12	2,08	2080	448,3	1,26	1957,2	2466,1	2406,3	3	2,4

TABLEAU DE MESURES (90% sable de dune,10% concassé 0/3)

Numéro Echant.	% Bitume	Hauteur Moyenne	POIDS		Stabilité	Fluage	Temps(s)
			A l'air	A l'eau			
1	4,5	53,8	883,3	425,2	45,4	3,75	37,8
2	4,5	58	948,6	452,7	55,2	4,89	60
3	4,5	56	895	430,8	58	4,65	30
4	6,5	60,2	1054,6	489,9	65,5	7,28	30
5	6,5	62,4	1043,3	499	70,8	6,25	28
6	6,5	56,6	1034,4	463,5	63,5	6,04	32
7	9	54,1	929,9	487,5	63,7	6,9	50
8	9	52,4	896,1	470,2	63,8	6,71	50
9	9	51,5	883,5	463,8	63,9	6,96	30
10	11,5	49,3	842,2	442,6	62	6,58	27
11	11,5	71,4	1203,4	627,6	61	6,21	23
12	11,5	68,8	1146,8	592	62,9	6,55	28

TABLEAU DE RESULTATS (90% sable de dune,10% concassé 0/3)

Numéro Echant.	% Bitume	Densité Relative	Masse Volumique	Volume Eprouv	Facteur Correct	Force max (N)	STABILITE		FLUAGE (mm)	
							corr (N)	Lecture	Lecture	Moyenne
1	4,5	2,083	2083	436,17	1,33	2019,5	2685,94	2947,43	0,94	1,11
2	4,5	2,083	2083	470,2	1,16	2508,8	2910,21		1,22	1,11
3	4,5	2,083	2083	454	1,23	2639,13	3246		1,16	1,11
4	6,5	2,158	2158	488,06	1,09	3009,66	3280,53	3410,64	1,82	1,63
5	6,5	2,158	2158	505,9	1,03	3282,8	3381,28		1,56	1,63
6	6,5	2,158	2158	458,9	1,21	2950,51	3570,12		1,51	1,63
7	9	1,906	1906	438,6	1,32	2956,3	3902,32	4084,09	1,725	1,72
8	9	1,906	1906	424,8	1,39	2959,4	4113,57		1,68	1,72
9	9	1,906	1906	417,5	1,43	2962,5	4236,38		1,74	1,72
10	11,5	1,919	1919	399,7	1,56	2846,9	4441,16	3085	1,645	1,61
11	11,5	1,919	1919	578,9	0,83	2802,4	2325,99		1,55	1,61
12	11,5	1,919	1919	557,8	0,85	2926,9	2487,86		1,64	1,61

TABLEAU DE MESURES (80% sable de dune,20% concassé 0/3)

Numéro Echant.	%	Hauteur Moyenne	POIDS		Stabilité	Fluage	Temps(s)
			A l'air	A l'eau			
1	4	56,2	938,8	493,2	69,8	6,38	25
2	4	56,1	946	494,1	61,2	5,4	52
3	4	53,6	898,4	463,4	62	5,23	36
4	6	45,2	745,8	378,3	62,7	5,43	22
5	6	47,4	758,8	378,4	61,1	4,78	22
6	6	52	863,5	437,7	60,8	5,17	34
7	8,5	55,4	958,4	519,4	60,8	7,3	36
8	8,5	52,7	925,4	493,2	61	7,03	23
9	8,5	46,8	818,2	439,7	63,4	7,68	63
10	11	49,3	842,7	445,9	60,6	7,8	28
11	11	40,5	709,1	381,4	61,8	8,58	32
12	11	63,69	1109,6	593,2	61	9,05	28

TABLEAU DE RESULTATS (80% sable de dune,20% concassé 0/3)

Numéro Echant.	%	Densité Relative	Masse Volumique	Volume Eprouv	Facteur Correct	Force max (N)	STABILITE		FLUAGE (mm)	
							corr (N)	Lecture	Lecture	Moyenne
1	4	1,919	1919	455,6	1,23	3238,3	3983,1	3789,9	1,6	1,42
2	4	1,919	1919	454,8	1,23	2811,3	3457,9		1,35	1,42
3	4	1,919	1919	434,5	1,38	2846,9	3928,7		1,31	1,42
4	6	1,983	1983	366,4	1,88	2909,1	5469,1	4707,8	1,36	1,3
5	6	1,983	1983	384,3	1,68	2806,8	4715,4		1,2	1,3
6	6	1,983	1983	421,6	1,41	2793,5	3938,8		1,3	1,3
7	8,5	1,861	1861	449,1	1,26	2793,5	3519,8	4803,4	1,8	1,83
8	8,5	1,861	1861	427,2	1,38	2802,4	3867,3		1,76	1,83
9	8,5	1,861	1861	379,4	1,65	2947,4	4863,2		1,92	1,83
10	11	1,873	1873	399,7	1,56	2784,6	4344	4615,2	1,95	2,12
11	11	1,873	1873	328,4	2,4	2838	6811,2		2,14	2,12
12	11	1,873	1873	518	0,96	2802,4	2690,3		2,26	2,12

TABLEAU DE MESURES (70% sable de dune, 30% concassé 0/3)

Numéro Echant.	% Bitume	Hauteur Moyenne	POIDS		Stabilité	Fluage	Temps(s)
			A l'air	A l'eau			
1	3,5	47,6	800,2	416,7	65	7,5	18
2	3,5	55,7	946,3	420,2	64	8,55	22
3	3,5	53,1	883,2	454	63	11,11	25
4	5,5	56,6	962,6	506,7	64,5	8,6	19
5	5,5	51,5	890,9	468,7	66,2	10,67	18
6	5,5	57,5	1006,2	532,2	63	8,91	16
7	8	58	1012,1	539,3	66,5	9,25	25
8	8	57,5	1009,7	538,7	80	11,45	33
9	8	61,8	1077,2	576,9	66,3	9,8	30
10	10,5	58,6	1051,2	568,4	66	12,8	60
11	10,5	68,6	1210,2	648,5	63	10,1	20
12	10,5	53,8	945,2	507	62,5	10,45	33

TABLEAU DE RESULTATS (70% sable de dune,30% concassé 0/3)

Numéro Echant	% Bitume	Densité Relative	Masse Volumique	Volume Eprouv	Facteur Correct	Force max (N)	STABILITE		FLUAGE (mm)	
							corr (N)	Moyenne	Lecture	Moyenne
1	3,5	1,932	1932	385,9	1,67	2995	5001,65	4233,6	1,875	2,26
2	▪	"	"	451,6	1,25	2965,2	3706,5		2,14	
3	▪	"	"	430,5	1,36	2935,8	3992,7		2,78	
4	5,5	1,897	1897	458,9	1,21	2980,3	3606,2	3807,1	2,15	2,35
5	▪	"	"	417,5	1,43	3042,6	4350,9		2,67	
6	▪	"	"	466,2	1,18	2935,8	3464,2		2,23	
7	8	1,873	1873	470,2	1,16	3069,3	3560,4	3696,9	2,31	2,54
8	▪	"	"	466,2	1,18	3692	4356,6		2,86	
9	▪	"	"	501	1,04	3051,5	3173,6		2,45	
10	10,5	1,86	1860	475,1	1,14	3024,8	3448,3	3272,8	3,2	2,8
11	▪	"	"	556,2	0,86	2935,8	2524,8		2,55	
12	▪	"	"	436,2	1,33	2891,3	3845,4		2,61	

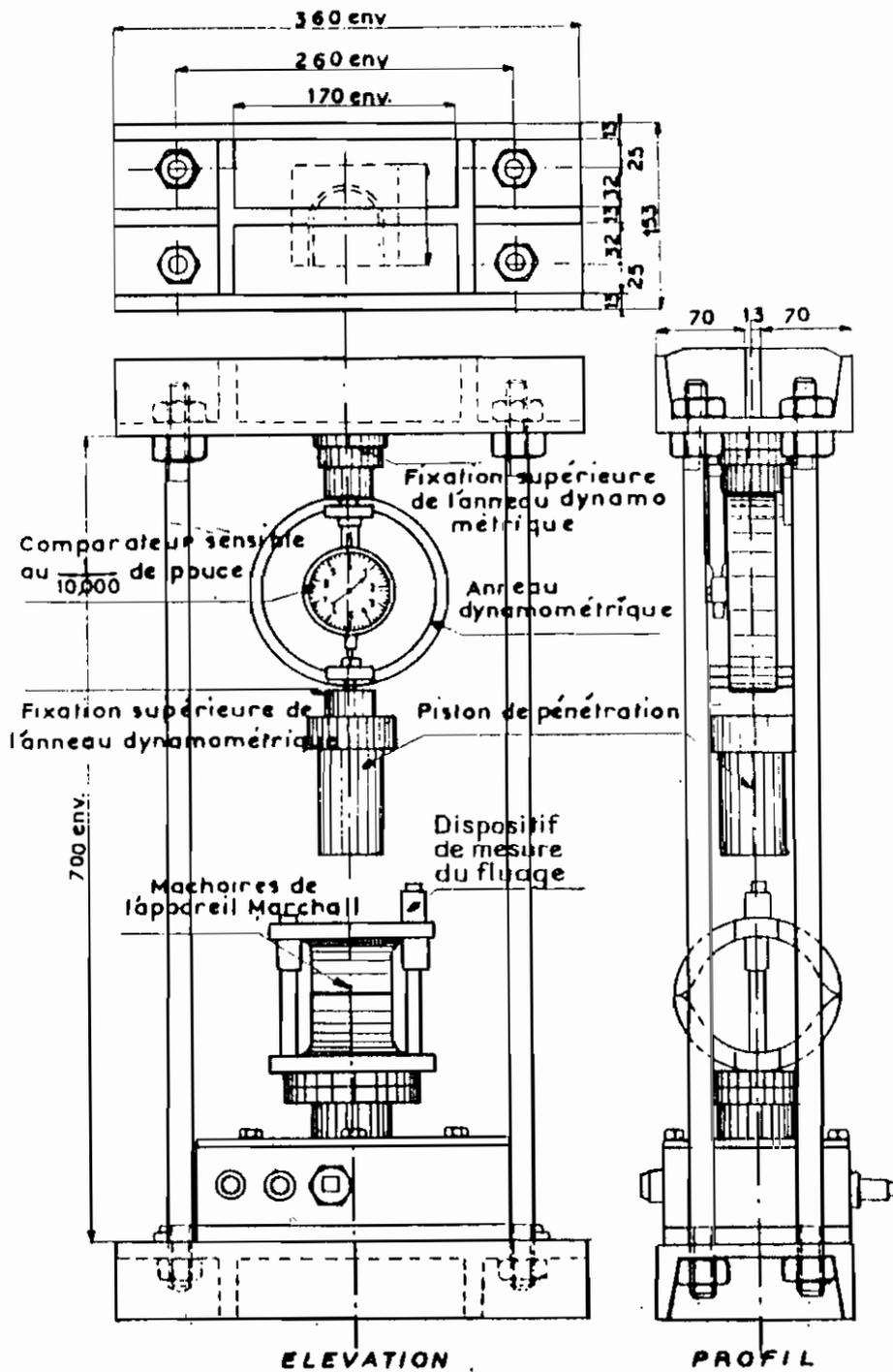


FIG. 217. — Assemblage complet avec anneau dynamométrique monté sur cadre CBR pour l'appareil Marshall.

L'ESSAI MARSHALL - STABILITE ET FLUAGE.

( norme ASTM D 1559 )

Calibration de l'anneau de charge n° 1709

Lecture du comparateur	Livres-force								
0	0	59	600	139	1500	267	3000	414	4500
1	20	60	620	143	1550	274	3050	418	4550
5	40	62	640	147	1600	279	3100	425	4600
7	60	63	660	150	1650	284	3150	429	4650
8	80	66	680	155	1700	287	3200	434	4700
12	100	67	700	158	1750	292	3250	438	4750
13	120	69	720	163	1800	297	3300	443	4800
15	140	71	740	168	1850	304	3350	449	4850
16	160	74	760	172	1900	307	3400	454	4900
19	180	75	780	176	1950	312	3450	458	4950
21	200	76	800	181	2000	317	3500	463	5000
23	220	79	820	185	2050	323	3550	466	5050
24	240	81	840	189	2100	328	3600	473	5100
27	260	82	860	194	2150	332	3650	477	5150
28	280	85	880	197	2200	337	3700	484	5200
30	300	86	900	203	2250	342	3750	490	5250
33	320	87	920	207	2300	346	3800	495	5300
35	340	89	940	210	2350	352	3850	500	5350
36	360	92	960	215	2400	357	3900	505	5400
38	380	94	980	219	2450	361	3950	509	5450
41	400	95	1000	224	2500	367	4000	514	5500
42	420	100	1050	228	2550	371	4050	519	5550
44	440	104	1100	232	2600	376	4100	525	5600
46	460	108	1150	237	2650	382	4150	531	5650
47	480	112	1200	241	2700	386	4200	536	5700
49	500	116	1250	245	2750	390	4250	542	5750
52	520	119	1300	250	2800	396	4300	547	5800
54	540	126	1350	255	2850	400	4350	553	5850
55	560	128	1400	258	2900	404	4400	557	5900
56	580	134	1450	264	2950	409	4450	563	5950
								570	6000

**NB** 1 livre-force = 4,448 222 N  
 = 0,453 585 kgf

Capacité maximum de l'anneau = 6000 livres-force  
 = 26690 newtons  
 = 2720 kgf

Appareil Marshall fourni par HUMBOLDT Mfg Co  
 7300 W. Agatite Ave., Norridge, Ill. 60656

TABLEAU 3. FACTEURS DE CORRECTION (STABILITÉ MARSHALL)

Volume brut de l'éprouvette en cm <sup>3</sup>		Épaisseur approximative de l'éprouvette		Facteur de correction
		po	mm	
de 200	à 213	1	25,4	5,56
214	225	1 $\frac{1}{8}$	27,0	5,00
226	237	1 $\frac{1}{4}$	28,6	4,55
238	250	1 $\frac{3}{8}$	30,2	4,17
251	264	1 $\frac{1}{2}$	31,8	3,85
265	276	1 $\frac{5}{8}$	33,3	3,57
277	289	1 $\frac{3}{4}$	34,9	3,33
290	301	1 $\frac{7}{8}$	36,5	3,03
302	316	1 $\frac{1}{2}$	38,1	2,78
317	328	1 $\frac{9}{16}$	39,7	2,50
329	340	1 $\frac{5}{8}$	41,3	2,27
341	353	1 $\frac{3}{4}$	42,9	2,08
354	367	1 $\frac{7}{8}$	44,4	1,92
368	379	1 $\frac{1}{2}$	46,0	1,79
380	392	1 $\frac{5}{8}$	47,6	1,67
393	405	1 $\frac{3}{4}$	49,2	1,56
406	420	2	50,8	1,47
421	431	2 $\frac{1}{8}$	52,4	1,39
432	443	2 $\frac{1}{4}$	54,0	1,32
444	456	2 $\frac{3}{8}$	55,6	1,25
457	470	2 $\frac{1}{2}$	57,2	1,19
471	482	2 $\frac{5}{8}$	58,7	1,14
483	495	2 $\frac{3}{4}$	60,3	1,09
496	508	2 $\frac{7}{8}$	61,9	1,04
509	522	2 $\frac{1}{2}$	63,5	1,00
523	535	2 $\frac{9}{16}$	64,0	0,96
536	546	2 $\frac{3}{4}$	65,1	0,93
547	559	2 $\frac{1}{2}$	66,7	0,89
560	573	2 $\frac{5}{8}$	68,3	0,86
574	585	2 $\frac{3}{4}$	71,4	0,83
586	598	2 $\frac{7}{8}$	73,0	0,81
599	610	2 $\frac{1}{2}$	74,6	0,78
611	625	3	76,2	0,76

Remarques: — la stabilité corrigée que l'on obtient en multipliant la stabilité mesurée par le facteur de correction correspond à la stabilité qu'aurait une éprouvette de 63,5 mm d'un mélange identique;

— la relation entre le volume et l'épaisseur de l'éprouvette est basée sur un diamètre de 10,16 cm. Par exemple, pour une épaisseur de 6,35 cm (2 $\frac{1}{2}$  po), le volume sera égal à:  
 $\pi/4 \times (10,16)^2 \times 6,35 = 514,8 \text{ cm}^3$  (le tableau nous donne 509 à 522 cm<sup>3</sup>).

2066,4 2634,6

COMPILATION DES RESULTATS DU DOSAGE DU BETON BITUMINEUX

Calculs de Vv% et VDAX

EQUIPE N° : \_\_\_\_\_ PREPARE PAR : \_\_\_\_\_ le : \_\_\_\_\_ VERIFIE PAR : \_\_\_\_\_ le : \_\_\_\_\_

TYPE DE BITUME ( ou cut-back )		ESSAIS D'IDENTIFICATION																	
TYPE DE MELANGE (ASTM ou autre)		PENETRABILITE			POINT DE RAMOLLISSEMENT			DENSITE RELATIVE			POINT ECLAIR, POINT DE FEU			DUCTILITE			VISCOSITE		
		DENSITE RELATIVE BRUTE DES AGREGATS ( moyennes pondérées )						AGREGATS GROSSIERS ( > 4,75 mm ) Pourcentage retenu sur tamis n°4 = _____ %						AGREGATS FINS ( < 4,75 mm ) Pourcentage passant le tamis n°4 = _____ %					
		da = _____			Absorption = _____ %			da = _____			Absorption = _____ %			da = _____			Absorption = _____ %		
EQUIPE N° / Teneur en bitume bZ ( en ordre croissant )		n° 1 5 %			n° 2 7 %			n° 3 9,5 %			n° 4 12 %			n° 5			n° 6		
IDENTIFICATION DES EPROUVETTES ( indiquer le n° de référence )		( 1 )	( 2 )	( 3 )	( 4 )	( 5 )	( 6 )	( 7 )	( 8 )	( 9 )	( 10 )	( 11 )	( 12 )	( 13 )	( 14 )	( 15 )	( 16 )	( 17 )	( 18 )
POURCENTAGE DES AGREGATS AZ																			
DENSITE RELATIVE BRUTE DU MELANGE (a 25 ± 1°C)	épreuve parfaite sèche (ASTM D 2726) db	2,24	2,29	2,27	2,20	2,21	2,22	2,11	2,13	2,16	2,07	2,09	2,08						
	ou épreuve enrobée de paraffine (ASTM D 1188) da																		
MASSE VOLUMIQUE DU MELANGE da x 1000 → kg/m³		2220			2230			2180			2080								
DENSITE RELATIVE MAXIMALE THEORIQUE (methode ( )) (ASTM D 2041) dmax																			
ESSAIS MARCHE FLUAGE	STAB volume de l'épr. ca³	437,8	466,98	447,5	564,3	579,14	499,7	423,21	442,6	479,1	466,2	449,9	448,3						
	FACTEUR de correction	1,32	1,176	1,267	0,94	1,02	1,07	1,14	1,294	1,13	1,18	1,25	1,26						
	force maximale en N	1886,05	1957,2	1925	2001,7	2283,4	2313,1	2357,6	2290,8	2491	2001,7	1912,7	1957,2						
	Stabilité corrigée N	2420,6	2301,7	2259,6		2514,3	2514,3	3300,6	2964,3	2814,8	236,2	2390,9	2466,1						
STABILITE corrigée moyenne en newtons =		2414,3			2514,3			3026,6			2406,3								
FLUAGE moyen en unités de 0,25 mm																			
Vv% = { 1 - da / dmax } x 100 =																			
VDAX = 100 - { AZ x da / da } =																			

RE : A partir de ces résultats compilés et calculés, tracer, pour chacun des types de mélange, les courbes requises et déterminer la teneur optimale en bitume .