



**ZiE**  
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement  
International Institute for Water and Environmental Engineering

# **Etude de formulation et de mise en œuvre des enrobés :** Cas des travaux de renforcement de la route Ouaga-Sakoinsé

Mémoire pour l'obtention du diplôme de  
**MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**  
**Option : Génie-Civil**

Présenté et soutenu publiquement par :

**TAPSOBA Judicaël Honora**

**Travaux dirigés par :**

**Dr Ismaïla GUEYE**  
Responsable UTER ISM  
Enseignant permanent au ZiE

**M. Georges KORSAGA**  
Ingénieur BTP  
COGEB BTP

**Jury d'évaluation :**

**Président :**

**Membres :**

*Promotion 2012*

DÉDICACE :

*Ce mémoire est dédié à ma très  
chère maman qui s'est battue  
pour me voir arriver à ce jour.  
Merci pour tous les efforts que  
tu as accomplie.*

## REMERCIEMENTS :

Pour avoir participé à la bonne tenue de ce stage, j'adresse mes sincères remerciements à l'entreprise COGEB et particulièrement à :

- Mr KORSAGA Georges, Directeur COGEB de m'avoir accueilli et permis d'effectuer mon stage dans de bonnes conditions lors de ce projet de mémoire.
- Mr TRAORE Oumar, Ingénieur des travaux, pour m'avoir offert un suivi et une assistance tout le long de mon stage.
- Mr OUEDRAOGO André, Géotechnicien et chef laboratoire de COGEB pour le suivi qu'il m'a voué tout au long de mon stage
- Tout le personnel de COGEB, tant en entreprise que sur le chantier pour m'avoir bien intégré et offert un cadre de travail agréable.

Mes remerciements vont également à l'institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement (2ie) et plus particulièrement à :

- Mr GUEYE Ismaïla, mon Directeur de mémoire et responsable de l'UTER ISM à 2ie pour m'avoir donné l'occasion d'étudier les structures et les matériaux de chaussée des projets routiers et aussi pour son aide et son soutien tout le long de l'étude.

Je ne saurais terminer sans adresser mes plus sincères remerciements à ma famille pour son aide tant sur le plan financier que moral qu'elle a su m'apporter pendant toute la durée de mon stage.

## RÉSUMÉ :

Dans le cadre du programme de réhabilitation des routes nationales, il a été confié au groupement d'entreprise FADOUL-COGEBA SA, l'exécution des travaux. Les travaux menés dans le cadre de ce mémoire ont permis premièrement de faire une étude de dimensionnement de la structure de la chaussée et ce, afin de pouvoir analyser et discuter des résultats obtenus. Ainsi, il a été fait une étude pour déterminer la période optimale pour faire un entretien progressif de la chaussée et aussi une étude pour caractériser l'impact de l'installation de poste de pesage. Ces deux études sont arrivées à la conclusion que la durée de service de la chaussée peut être augmentée de 22 ans si nous procédons à un entretien après 5 ans de service et l'installation de poste de pesage à l'entrée et à la sortie du tronçon.

Par la suite il a été fait une étude de formulation sur les différents enrobés à utiliser. Cette étude a permis de déterminer en fonction des besoins de performance des couches, les différents niveaux de formulation à appliquer. Aussi elle a permis de faire une analyse des résultats obtenus et est arrivée à la conclusion que selon le besoin attendu la méthode PCG s'avère être plus qualifiée que la méthode Marshall dont les résultats sont nullement indicatifs de la prévision du comportement du matériau.

En dernière partie, il a été fait une étude sur la mise en œuvre des matériaux et le suivi de leur exécution. Cette étude a permis de pouvoir déterminer en fonction du type de central en place, le calibrage des différentes caractéristiques nécessaire à la production des matériaux. Aussi elle a permis d'arriver à la conclusion qu'au niveau de la mise en place, l'utilisation du PS500 est une source de fragilité car elle sur-compacte la couche de surface entraînant ainsi l'apparition prématurée des fissurations.

### Mots clés :

1. Dimensionnement
2. Chaussée
3. Enrobés
4. Formulation
5. Mise en œuvre

## ABSTRACT :

Within the framework of rehabilitation program of the national road, the execution's work has been entrusted at the grouping company FADOUL-COGEBA SA. Work carried out within the framework of this memoir permitted firstly to make a study about the dimension of the structure of the roadway, being so in order to be able to do an analysis and talk about result got. Thus after analysis a discussion at the result pertinence of compared with the solution suggested by the market has been did. On top of that it has been done at this level a study for to determine the optimum period for to make a upkeep progressive of the roadway.

Afterwards it has been made a wording study at the different coat to use. This study permitted to be able to determine according to the needs of performance of the coat, the different level of wording to applied, besides it permitted to make a analysis of the result got and conclude that according to the need waited out some method of wording are unsuited and besides that the determination of some component didn't do at the optimum way.

At the last part it has been made a study at the implementing of the material and the sustained of their execution. This study permitted of to be able to determine according to kind of station in place, the style of caliber of the different characteristic necessary at the production of the material. Besides it permitted to conclude that the level of start-up, the method who exist well and who respond at the specific elements are in reality for some coat a spring of fragility.

### Keywords :

---

1. sizing
2. roadway
3. coat
4. Formulation
5. Implémentation

## LISTE DES ABBREVIATIONS :

- APD** : Avant Projet Détaillé
- BB** : Béton Bitumineux
- C** : Compacité
- CAM** : Coefficient d'Agressivité Moyen
- CEBTP** : Centre expérimental des Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
- CST** : Cahier des Spécifications Techniques
- EME** : Enrobé à Module Elevé
- GB** : Grave Bitume
- GL** : Grave Latérite
- GNT** : Grave Non Traitée
- LCPC** : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
- LNBT** : Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics
- MTLH** : Matériau Traité au Liant Hydraulique
- MVA** : Masse Volumique Apparente
- MVRe** : Masse Volumique Réelle des enrobés
- NF** : Norme Française
- OPM** : Optimum Proctor Modifié
- PF** : Plate-Forme
- PL** : Poids Lourds
- TC** : Trafic Cumulé
- TL** : Teneur en Liant
- TMJA** : Trafic Moyen Journalier Annuel
- VAM** : Vide inter granulaire
- Vi** : Vides
- VRB** : Vides Remplis par le Bitume

## LISTE DES TABLEAUX :

*Tableau n°1 : récapitulatif des lots*

*Tableau n°2 : récapitulatif du trafic*

*Tableau n°3 : classification du trafic*

*Tableau n°4 : résultats de la campagne de carottage*

*Tableau n°5 : niveau de formulation*

*Tableau n°6 : spécifications sur les granulats*

*Tableau n°7 : spécification sur les liants*

*Tableau n°8 : spécifications sur la GB*

*Tableau n°9 : spécifications sur le BB*

*Tableau n°10 : essai d'identification du bitume pur pour la GB*

*Tableau n°11 : récapitulatif de la teneur en liant des différents mélanges*

*Tableau n°12 : récapitulatif des résultats de stabilité et de fluage*

*Tableau n°13 : récapitulatif des caractéristiques des briquettes*

*Tableau n°14 : identification du bitume pur pour le BB*

*Tableau n°15 : récapitulatif des caractéristiques de la carrière*

*Tableau n°16 : classification des diamètres de tambour*

*Tableau n°17 : proportion des composants du bitume fluidifié*

*Tableau n°18 : résultat du calibrage à froid*

*Tableau n°19 : résultat de la planche d'essai*

*Tableau n°20 : comparaison des différentes structures*

*Tableau n°21 : résultat de l'entretien progressif*

## LISTE DES FIGURES :

*Figure n°1: carte de localisation de la zone de projet*

*Figure n°2 : chaussée souple [LCPC, 1994]*

*Figure n°3 : chaussée épaisse [LCPC, 1994]*

*Figure n°4: chaussée semi-rigide et rigide [LCPC, 1994]*

*Figure n°5: chaussée mixte [LCPC, 1994]*

*Figure n°6 : chaussée mixte [LCPC, 1994]*

*Figure n°7 : phénomène de ressuage*

*Figure n°8 : phénomène d'orniérage*

*Figure n°9 : fissuration longitudinale*

*Figure n°10 : schématisation de la structure de l'ancienne chaussée*

*Figure n° 11: courbe de calage inverse*

*Figure n° 12: organigramme de la démarche de formulation*

*Figure n°13 : courbe granulométrique de la GB*

*Figure n°14 : liste des graphiques de variation des caractéristiques en fonction de TL*

*Figure n°15 : graphique de synthèse*

*Figure n°16 : courbe granulométrique du BB*

*Figure n°17 : courbe de comparaison à la masse volumique maximale*

*Figure n°18 : courbe des variations de vides de l'essai PCG*

*Figure n°19 : courbe de l'essai d'orniérage*

*Figure n°20 : courbes de variation de la durée de vie selon l'entretien*

## SOMMAIRE

<b>DEDICACE.....</b>	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENT .....</b>	<b>ii</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>vii</b>
<b>I. INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
I.1. Problématique et objectif de l'étude.....	2
I.2. Résultats attendus .....	2
I.3. Contexte du projet .....	3
I.4. Présentation du projet .....	3
I.5. Méthodologie de l'étude .....	4
<b>II. GENERALITES SUR LES CHAUSSEES.....</b>	<b>6</b>
II.1. Définition et constitution d'une structure de chaussée .....	6
II.2. Matériaux de chaussée :.....	6
<b>III. Justification de la structure retenue.....</b>	<b>8</b>
III.1. Modèle de calcul mécanique du renforcement.....	8
III.2. Terme de référence.....	9
III.3. Etude du trafic existant.....	9
III.4. Calcul et choix de la structure de renforcement.....	11
<b>IV. Etude de formulation.....</b>	<b>14</b>
IV.1. Etude théorique.....	14
IV.2. Méthodes de formulation.....	16
IV.3. Essais de performance dans les études de formulation.....	18
IV.4. Niveaux de formulation .....	20

<b>V.</b>	<b>Application au cas de l'étude de formulation des enrobés de la RN1 .....</b>	<b>21</b>
V.1.	Spécifications sur les composants .....	21
V.2.	Formulation de la GB .....	23
V.3.	Formulation du BB.....	28
<b>VI.</b>	<b>Production en centrale .....</b>	<b>32</b>
VI.1.	Installations disponibles .....	32
VI.2.	Production des différents composants.....	34
<b>VII.</b>	<b>Mise en place sur chantier .....</b>	<b>35</b>
VII.1.	Planche d'essai.....	35
VII.2.	Mise en place des différents matériaux.....	36
<b>VIII.</b>	<b>Essais de contrôle .....</b>	<b>39</b>
VIII.1.	Les essais de contrôle sur la fabrication .....	39
VIII.2.	Les essais de contrôle de la mise en œuvre .....	40
<b>IX.</b>	<b>Analyses et Recommandations .....</b>	<b>41</b>
IX.1.	Analyses et discussions .....	41
IX.2.	Recommandations.....	42
<b>X.</b>	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>45</b>

## I. INTRODUCTION GENERALE

D'une manière générale, le réseau routier d'un pays constitue l'un des patrimoines qui revêt une importance capitale dans son développement. En effet, la route assure le lien entre les zones d'économie complémentaire, de production, d'importation, d'exportation et de consommation au sein des états mais aussi entre les états. Aussi, elle assure des liaisons humaines et sociales d'une importance inestimable car elle permet l'établissement d'échanges culturels, sociaux, politiques et administratifs qui s'avère aussi être un des éléments promoteur à tout développement.

Malgré toute l'importance qu'il revêt, on remarque que le réseau routier de nos pays en développement est toujours au stade embryonnaire. Ainsi, particulièrement au Burkina Faso, en 2006, il a été recensé : 15272 km de routes classées dont 2584 km sont bitumées. Cette situation est principalement due à l'extrême pauvreté de nos états qui n'arrive à assurer de façon unilatérale, ni la construction d'un réseau routier qui soit à la hauteur de nos besoins ni sa réhabilitation.

C'est fort de ce constat qu'a été initié le programme régional de facilitation des transports et du transit routiers en Afrique de l'ouest de l'UEMOA dont le but sera d'accompagner les états de l'union dans leur quête au développement à travers la construction et la réhabilitation de leurs réseaux routiers. Pour se faire, plusieurs projets de construction et de réhabilitation ont été lancés partout dans la sous région dont celui du renforcement de la route Ouagadougou Sakoinsé.

Le présent mémoire subdivisé en trois grandes parties se propose de présenter l'essentiel des travaux effectués relatifs aux renforcements routiers. De ce fait une première partie sera destinée à la définition et au dimensionnement de renforcement, suivi d'une seconde partie destinée à l'étude de formulation et de la mise en œuvre. En dernière partie sera fait un résumé des résultats obtenus et une série de recommandations destinée à optimiser les performances de notre réseau routier.

### I.1. Problématique et objectif de l'étude

Le besoin d'améliorer la durabilité des chaussées tant lors de la conception de chaussées neuves que de la maintenance de chaussées anciennes est un souci majeur des gestionnaires routier. En effet, vu les sollicitations des surcharges élevées des poids lourds que subissent nos routes, son comportement est significativement dérégulé et on assiste de cet fait à des dégradations prématurées de nos chaussée qui jusqu'à lors se comportaient normalement. Cette situation est d'autant plus accentuée par la nouvelle configuration des charges des poids lourds qui utilisent de plus en plus des pneumatiques super larges avec des pressions de gonflage généralement très élevées en remplacement des roues jumelées.

Sur la base de ces constatations, il est impératif d'adapter nos méthodologies de dimensionnement, de formulation et aussi de mise en œuvre de nos enrobés afin de pouvoir répondre de façon efficiente aux nouvelles configurations.

Pour se faire, notre objectif tout au long de cette étude sera de :

- rechercher à améliorer la durée de vie de nos chaussées à travers une optimisation des performances des matériaux utilisés
- adapter au mieux les nouvelles configurations de charges aux modèles de dimensionnement existant
- mieux adapter nos systèmes de formulations et de mise en œuvre aux nouvelles conditions tout en tenant compte de nos limites tant sur le plan technique que économique.

### I.2. Résultats attendus

A l'issue de ce stage, les résultats attendus seront :

- Des propositions afin d'améliorer la durée de vie de nos routes
- Des recommandations sur des moyens de formulation et d'évaluation des performances des matériaux nécessitant des moyens techniques et économiques faibles
- Des propositions nouvelles sur les systèmes de mise en œuvre

### I.3. Contexte du projet

Le tronçon de route Ouagadougou – Sakoinsé fait partie de la route RN 1 qui représente l'un des axes routiers principaux du Burkina Faso. Aussi dans le cadre des échanges économiques, la RN 1 constitue l'artère principale aussi bien sur le plan national que sur le plan de transit car elle joue un rôle très important dans les échanges entre les pays enclavés (Burkina Faso, Mali, Niger) et le littoral.

Cette configuration ajoutée à la durée de service de la route a eu pour conséquence de considérablement aggravé le niveau de dégradation de la route qui à certains endroits s'avérait être impraticable impactant de ce fait sur les durées de trajet qui deviennent très longues, le confort et la sécurité de conduite.

C'est ainsi que vu l'importance que cette route revêt pour nos pays dépourvus de débouchés maritimes et vu les dégradations subies par la chaussée, que la banque mondiale, à travers le programme régional de facilitation des transports et du transit routiers en Afrique de l'ouest (PRFTTAO) a financé un projet de travaux de renforcement de la route nationale n°1 entre Ouagadougou et Sakoinsé. Pour se faire, les travaux ont été confiés au groupement d'entreprise FADOUL-COGEBA SA qui est chargé de la réalisation de la chaussée, de l'assainissement hydraulique et de l'exécution des travaux d'aménagement.

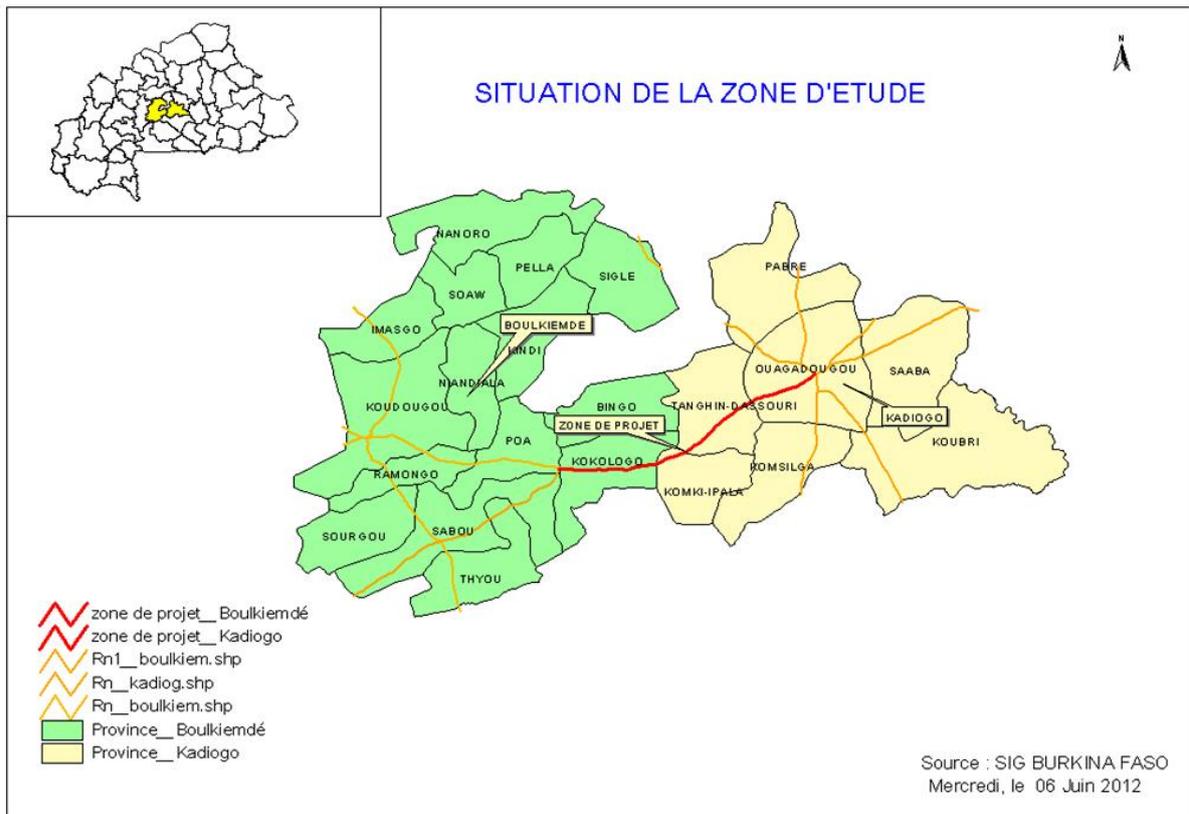
### I.4. Présentation du projet

La zone de réalisation des travaux se situe dans la région du plateau central depuis la sortie Ouest de la ville de Ouagadougou jusqu'au carrefour Ouaga-Koudougou-Bobo. L'ensemble du projet a été subdivisé en 03 lots comme définit dans le tableau suivant :

***Tableau n°1 : récapitulatif des lots***

Lot n°	Tronçon	Longueur (Km)
1	Ouagadougou-Kokologo	32.700
3	Kokologo-Sakoinsé	17.586

L'itinéraire de la zone des travaux est présenté sur la carte ci-dessous :



**Figure n°1:** carte de localisation de la zone de projet

### I.5. Méthodologie de l'étude

Dans le but d'atteindre les objectifs définis ci-dessus, la démarche adoptée se présentera comme suit :

- Recherche documentaire

Cette partie a été consacrée à la recherche de documents et de textes étudiant les principales thématiques étudiées dans ce mémoire. Elle s'est soldée par l'acquisition de documents étudiant les différents types de renforcement de chaussée, les différentes méthodes et méthodologie de formulation et les réglementations sur la production et mise en œuvre des matériaux de chaussée.

- Collecte de données

A ce niveau, des recherches ont été menées afin de collecter les différentes données directement liées au projet. Cette recherche a permis l'obtention des données telles que :

- Les résultats du comptage de trafic réalisé
- Les résultats des campagnes de sondages et de déflexions réalisées
- L'étude géotechnique d'APD réalisé
- L'étude sur le renforcement prévu par le marché

- Suivi de la mise en œuvre et du contrôle

Après la première étape de notre étude qui a consisté à la recherche et collecte de données, une partie du séjour a été consacré au suivi sur le chantier et à la carrière des différents travaux de production et de mise en place mais aussi au suivi de la réalisation des essais de contrôle au niveau du laboratoire de l'entreprise et avec les équipes du LNBTP.

- Réalisation de l'étude

Au terme de ces différentes études menées ci-dessus, la dernière partie du séjour a été consacré à l'étude de :

- Dimensionnement de la structure de renforcement
- La formulation des matériaux utilisés
- La production, mise en œuvre et contrôle

## **II. GENERALITES SUR LES CHAUSSEES**

### **II.1. Définition et constitution d'une structure de chaussée**

De façon générale, la chaussée se définit comme étant une surface spécialement aménagée sur le sol ou sur un ouvrage, pour le stationnement ou la circulation des personnes et des véhicules. Mais de façon approfondie la chaussée peut se définir comme étant une superposition de différentes couches que sont :

#### **II.1.1. La couche de surface**

Elle est constituée de la surface de roulement, qui est la face supérieure de la couche de surface et de la couche de roulement, qui est la couche supérieure de la structure de la chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Cette dernière assure une fonction d'étanchéité, de protection et influence les caractéristique de surface que sont : l'uni et l'adhérence.

#### **II.1.2. Le corps de chaussée :**

Il est constitué d'une couche de base et éventuellement d'une couche de fondation dont le rôle consiste à réduire les contraintes transmises au sol support en assurant une diffusion et une résistance aux contraintes engendrées par le trafic.

#### **II.1.3. Le sol support :**

Tout cet ensemble formant la chaussée repose sur le sol support qui est l'ensemble constitué par le terrain naturel et les remblais ou dans le cas échéant, si la portance du terrain est faible, il est ajouté une couche de forme dont l'épaisseur peut être très importante. Souvent pour éviter d'avoir une grande épaisseur de la couche de forme, le sol en place est traité avec du ciment ou de la chaux.

## **II.2. Matériaux de chaussée :**

Les matériaux de chaussée peuvent être regroupés en trois (03) grandes familles que sont :

### **II.2.1. Les matériaux naturels :**

Il existe plusieurs types de matériaux granulaires composés de sols fins et des matériaux granulaires que sont :

- Les graveleux latéritique (GL)
- Les sables argileux
- Les graves non traitées (GNT)

### II.2.2. Les matériaux traités au liant hydraulique :

On distingue plusieurs types de matériau traité au liant hydraulique. Ainsi, en fonction du liant utilisé, il y aura des matériaux traités au ciment, à la chaux, au laitier ou aux cendres volantes. Aussi en fonction de la granulométrie du matériau et le dosage en liant hydraulique, on distingue :

- Les graves traités au liant hydraulique
- Les sables traités au liant hydraulique
- Les bétons compactés
- Les graves hydrauliques haute performances

Ces matériaux sont le plus souvent employés pour les chaussées à fort trafic car ils ont pour avantages d' :

- Etre très performant avec un module d'élasticité élevé
- Etre très résistant en compression et en traction
- Avoir une bonne tenue en fatigue avec une durabilité forte

Mais dans le même temps, ceux-ci présente un inconvénient majeur du point de vue pathologie de chaussée car il se produit des fissurations lors du retrait du béton.

### II.2.3. Les matériaux traités au liant hydrocarboné

De nos jours, concernant les matériaux traités au liant hydrocarboné, il n'existe plus qu'un seul type que sont les enrobés bitumineux. En effet vu que le goudron a des propriétés cancérigènes, son utilisation en tant que liant est délaissée au profit du bitume. Aussi on distingue en fonction de la granulométrie, du degré de compactage, du grade et du dosage en bitume différents types d'enrobés bitumineux qui sont :

- La grave bitume (GB)
- Le béton bitumineux (BB)
- L'enrobé à module élevé (EME)

Aussi à travers le mode de production, on distingue deux types d'enrobés qui sont :

- Les enrobés à chaud
- Les enrobés à froid ou grave émulsion.

Les matériaux traités au liant hydrocarbonés sont les plus utilisés pour les chaussées et pour tout trafic car ils ont pour avantages d'assurer un bon compromis entre des performances moyennes comparé à celle des matériaux traités au liant hydraulique et une capacité de déformation sans fissures du support qui permet ainsi de supporter des déflexions très élevées.

### III. JUSTIFICATION DE LA STRUCTURE RETENUE

#### III.1. Modèle de calcul mécanique du renforcement

Pour le renforcement des chaussées, il existe plusieurs méthodes dont il ne sera présenté ci-dessous que la principale méthode appliquée aux chaussées souples.

Cette méthode suppose dans un premier temps que le module du corps de chaussée (base+fondation) est égal à 04 fois le module du sol support et que le module de l'enrobé (couche de surface) est pris égal à 1000 MPa, valeur relativement faible pour deux raisons :

- Pour les calculs de renforcement l'enrobé est souvent dégradé
- Pour une bonne mesure des déflexions (cas de la poutre de Benkelman), un module faible donne des résultats plus représentatifs.

e	enrobé	1000 MPa
H	corps de chaussée	4ES
	sol	ES = 10-100 MPa

**Figure n°10 :** schématisation de la structure de l'ancienne chaussée [LCPC, 1994]

La structure ainsi modélisée, il est effectué le calcul du renforcement pour le trafic prévu. A ce niveau le calcul se fait sur la base d'un dimensionnement de chaussée neuve. Pour se faire, le logiciel ALIZE du LCPC dont le mode de calcul est basé sur le modèle semi-analytique de Burmister s'avère être la référence. En effet, ce modèle donne une modélisation plus adaptée avec plusieurs avantages que sont :

- Un chargement circulaire qui rend le problème axisymétrique donc plus rapide à résoudre
- Une modélisation en plusieurs couches traduisant plus fidèlement l'état de la chaussée
- Des matériaux considérés comme étant des solides élastiques évitant ainsi le problème des plaques
- Des interfaces qui peuvent être collées ou non.

### III.2. Terme de référence

Après consultation des termes de référence du projet, les hypothèses suivantes ont pu être établies :

- Durée de vie après renforcement

Vu qu'il est difficile voire impossible de prévoir à long terme l'évolution du trafic dans les pays en voie de développement, une durée de service de 15 ans est plus réaliste.

- Taux d'accroissement du trafic

Aucune méthode ne permettant de calculer indépendamment le taux d'accroissement du trafic des poids lourds le TDR s'est conformé aux prescriptions du guide CEBTP pour pays tropicaux qui recommande un taux d'accroissement compris entre 4 et 15%. Par défaut, pour cette étude, il sera retenu un taux  $i = 4\%$ .

- Coefficient d'agressivité (CAM)

Pour la détermination du CAM, le TDR a tenu compte de la mise en service des postes de pesage de Dakola, Bittou, de l'installation imminente des postes de Yéguéresso et Hamélé et aussi de l'écrêtage total de la surcharge sur la route Ouagadougou-Pô-frontière du Ghana pour fixer le CAM à une valeur plus réaliste de 1,9.

- Température de référence

La température fixée par le TDR est de 40° C à la surface de la chaussée au niveau de la première couche. Cette température décroît à mesure que l'on descend les couches pour atteindre 34° C au niveau de la seconde couche.

- Charge de l'essieu type

Le TDR adopte comme essieu de référence pour le dimensionnement de la structure de la chaussée, celui du LCPC qui est l'essieu standard de 13 T. Cet essieu est aussi celui qui a été adopté au sein de l'UEMOA pour la préservation de notre patrimoine routier.

### III.3. Etude du trafic existant

Il s'agit à ce niveau de déterminer premièrement le trafic moyen journalier annuel (TMJA) de poids lourds dans le sens le plus surchargé afin de calculer le trafic cumulé (TC) puis de déterminer en tenant compte du CAM, le nombre d'essieu équivalent à ce trafic.

Toutes ces données permettront de pouvoir déterminer la classe de trafic selon la classification du CEBTP.

### III.3.1. Trafic cumulé

Les différentes campagnes d'études de trafic effectuées afin de déterminer le nombre de poids lourds journaliers moyen annuel, ont donné le résultat suivant :

**712 PL pour les deux (02) sens d'après l'APD de 2007**

Avec ce résultat, le TMJA est pris comme égal à 60% des 712 PL pour les chaussées de largeur supérieur à 6 m. Soit **TMJA = 428 PL**. A travers ces données, le TC sera estimé à partir de la formule suivante :

$$TC = 365 * TMJA * n * \left( \frac{2 + (n - 1) * i}{2} \right)$$

Avec : TMJA : 428 PL  
           n : 15 ans  
           i : 4%

}                    ⇒                    TC = 2 999 400 PL

### III.3.2. Nombre d'essieu équivalent

Le nombre d'essieu équivalent (NE) est le trafic à prendre en compte dans les calculs du dimensionnement. Il correspond au nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

Son calcul fait intervenir le CAM des PL et est donnée par la formule suivante :

$$NE = TC * CAM ; \quad \text{avec : } CAM = 1.9$$

D'où : NE = 5 696 900.

Toutes ces données sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

***Tableau n°2 : récapitulatif du trafic***

	TMJA (PL)	t	Durée de vie (ans)	TC (PL)	CAM	NE
Hypothèse	<b>428</b>	<b>4%</b>	<b>15</b>	<b>2 999 400</b>	<b>1.9</b>	<b>5 698 900</b>

### III.3.3. Classe de trafic

Le trafic selon le guide pratique de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux se divise en 05 classes qui sont fonction du nombre d'essieu équivalent de 13 T et se définit comme suit :

**Tableau n°3 : classification du trafic**

Catégorie de trafic proposé	Nombre cumulé d'essieux équivalent de 13 T
T <sub>1</sub>	$1 \times 10^5 \leq T < 5 \times 10^5$
T <sub>2</sub>	$5 \times 10^5 \leq T < 1,5 \times 10^6$
T <sub>3</sub>	$1,5 \times 10^6 \leq T < 4 \times 10^6$
T <sub>4</sub>	$4 \times 10^6 \leq T < 1 \times 10^7$
T <sub>5</sub>	$1 \times 10^7 \leq T < 2 \times 10^7$

Avec un NE = 5 698 900, le trafic se retrouve dans la fourchette correspondant à **T4**.

### III.4. Calcul et choix de la structure de renforcement

#### III.4.1. Modélisation de la chaussée existante

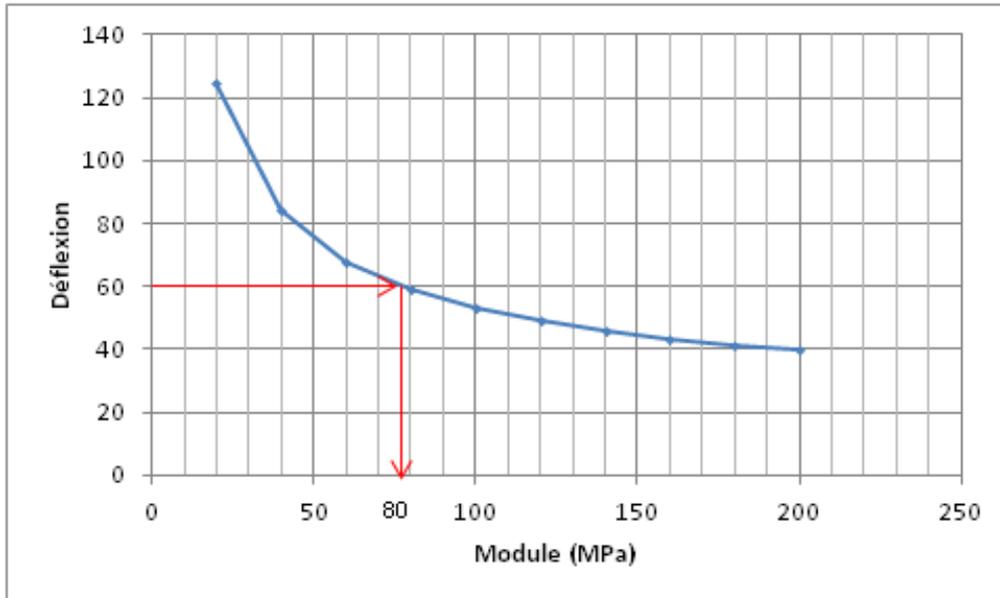
Selon le CST une déflexion caractéristique de 80/100 mm sera à considérer tout au long du projet. Une campagne de déflexion à été réalisé sur tout le tronçon et a fait ressortir que 24% du tronçon considéré a une déflexion moyenne de 60/100 mm et se trouve donc dans la plage de déflexion < 80/100 mm.

Aussi une campagne de carottage menée sur tout le tronçon à fait ressortir une structure qui se présente comme ci-dessous :

**Tableau n°4 : résultats de la campagne de carottage**

	Couche de roulement	Couche de base	Couche de fondation	Couche de forme
Nature	<b>BB</b>	<b>GL</b>	<b>GL</b>	<b>GL</b>
Epaisseur	<b>5 cm</b>	<b>20 cm</b>	<b>20 cm</b>	<b>25 cm</b>
Module	<b>1000 MPa</b>	<b>400 MPa</b>	<b>320 MPa</b>	<b>160 MPa</b>

La détermination du module du sol support existant s'est fait par calage inverse. Pour se faire, la structure existante a été modélisée sur alizé puis en faisant varier le module du sol support, on obtient le module correspondant à la déflexion moyenne.



**Figure n° 11:** courbe de calage inverse

A travers ce graphique, une déflexion de 60/100 mm correspond à un module de sol d'environ **80 MPa**, qui, selon le guide pratique de dimensionnement pour les chaussées tropicales, est de type **S4**.

#### III.4.2. Structure de renforcement

A ce niveau, il a été proposé, pour les zones de déflexion bonne c'est-à-dire < 80/100 mm, un fraisage de la couche de BB + 5 cm de la couche de base puis une pose de :

**20 cm de GNT + 12 cm de GB + 5 cm de BB**

Pour les zones de déflexion >80/100 mm, il est proposé un enlèvement de la couche de BB, de la couche de base, de la couche de fondation, de la couche de forme et si nécessaire un traitement du sol support afin d'obtenir un module de 80 MPa. Puis il est procédé une par la suite une reconstitution de la forme, la fondation et la base. Enfin il sera fait une pose de :

**20 cm de GNT + 12 cm de GB + 5 cm de BB**

#### III.4.3. Vérification de la structure

- Calcul des déformations admissibles
  - Déformation admissible verticale

On a :  $\varepsilon_{zadm} = A \times (NE)^{-0,222}$  avec  $A = 12000$  car  $NE > 25000$

$$\varepsilon_{zadm} = 379.69 \mu\text{déf}$$

- Déformation admissible transversale

On a :  $\varepsilon_{tadm} = \varepsilon_6(10^\circ ; 25 \text{ Hz}) \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ)}{E(40^\circ)}} \times Kc \times Kr \times Ks$  avec :

Pour le BB

matériau	$\epsilon_6(10^\circ ; 25 \text{ Hz})$	E(10°) MPa	E(40°) MPa	-1/b	Kc	1/Ks	R (%)	Kr
BB	100	7200	1000	5	1.1	0.91	10	0.833

Et pour la GB

matériau	$\epsilon_6 (10^\circ ; 25 \text{ Hz})$	E (10°) MPa	E (34°) MPa	-1/b	Kc	1/Ks	R (%)	Kr
GB	90	12300	2020	5	1.3	0.91	10	0.794

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Pour le BB : } \epsilon_{\text{tadm}} = 157.8 \mu\text{déf} \\ \text{Pour la GB : } \epsilon_{\text{tadm}} = 147.1 \mu\text{déf} \end{array} \right.$$

- Calcul des déformations

Après modélisation de notre structure de chaussée dans le logiciel Alizé LCPC, on obtient les résultats suivant :

matériaux	EpsT ( $\mu\text{déf}$ )	matériau	EpsZ ( $\mu\text{déf}$ )
BB	38.6	GNT	378
GB	144.6		

Ces résultats comparés aux déformations admissibles donnent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{t1} = 38.6 \mu\text{déf} < \epsilon_{\text{tadm}} = 157.8 \mu\text{déf} \\ \epsilon_{t2} = 144.6 \mu\text{déf} < \epsilon_{\text{tadm}} = 147.1 \mu\text{déf} \implies \text{dimensionnement OK.} \\ \epsilon_z = 378.0 \mu\text{déf} < \epsilon_{\text{zadm}} = 379.69 \mu\text{déf} \end{array} \right.$$

## IV. ETUDE DE FORMULATION

### IV.1. Etude théorique

#### IV.1.1. Généralités

Dans un cadre général, une formulation se définit comme étant une méthode regroupant un ensemble 03 éléments ou «piliers» plus ou moins liés.

$$(\text{Méth}) = \{P, E, V\}$$

Avec :

P : ensemble des propriétés physiques, chimiques et mécaniques

E : ensemble des essais utilisés pour mesurer ces propriétés

V : ensemble des valeurs seuils à respecter pour chaque propriétés.

Dans ce contexte, une méthode de formulation n'est recevable que lorsque :

$$P(E) \subset V$$

C'est-à-dire que les propriétés mesurées à travers les essais réalisés doivent être incluses aux valeurs seuils.

#### IV.1.2. Méthodologie de formulation

L'objectif principal d'une formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et aussi de vides afin d'atteindre les performances visées. En plus de cet objectif, elle vise aussi à assurer la fabrication de matériaux aptes à :

- Une mise en œuvre correcte in situ
- Satisfaire les exigences de durabilité structurelle
- Satisfaire les exigences de qualité de la chaussée.

Bien qu'à ce jour aucune méthode universelle de formulation n'a pu être édictée, plusieurs méthodes de formulation sont recommandées. Ces méthodes suivent une démarche bien précise qui comporte 05 phases que sont :

- Définition du besoin de performance

Elle consiste à définir pour chaque couche les propriétés recherchées pour caractériser les performances de la chaussée. Ces caractéristiques sont :

- le module complexe
- la résistance à la fatigue mécanique
- la résistance aux déformations permanentes
- la susceptibilité à l'eau.

- Sélection des composants

Cette étape consiste à choisir les granulats, les liants et les ajouts utilisés lors de la fabrication de l'enrobé en fonction des différentes caractéristiques que sont :

- le trafic
- le climat
- la structure de la chaussée
- les performances recherchées de la couche de surface

- Formulation volumique

A ce niveau, tout commence par la définition des critères de remplissage volumique suivi de la détermination de la composition du mélange qui se fait comme suit :

- Evaluation de la teneur en vide du squelette minéral
- Détermination du volume disponible pour le mélange liant-fillers
- Détermination de la composition du mastic
- Vérification des critères de remplissage.

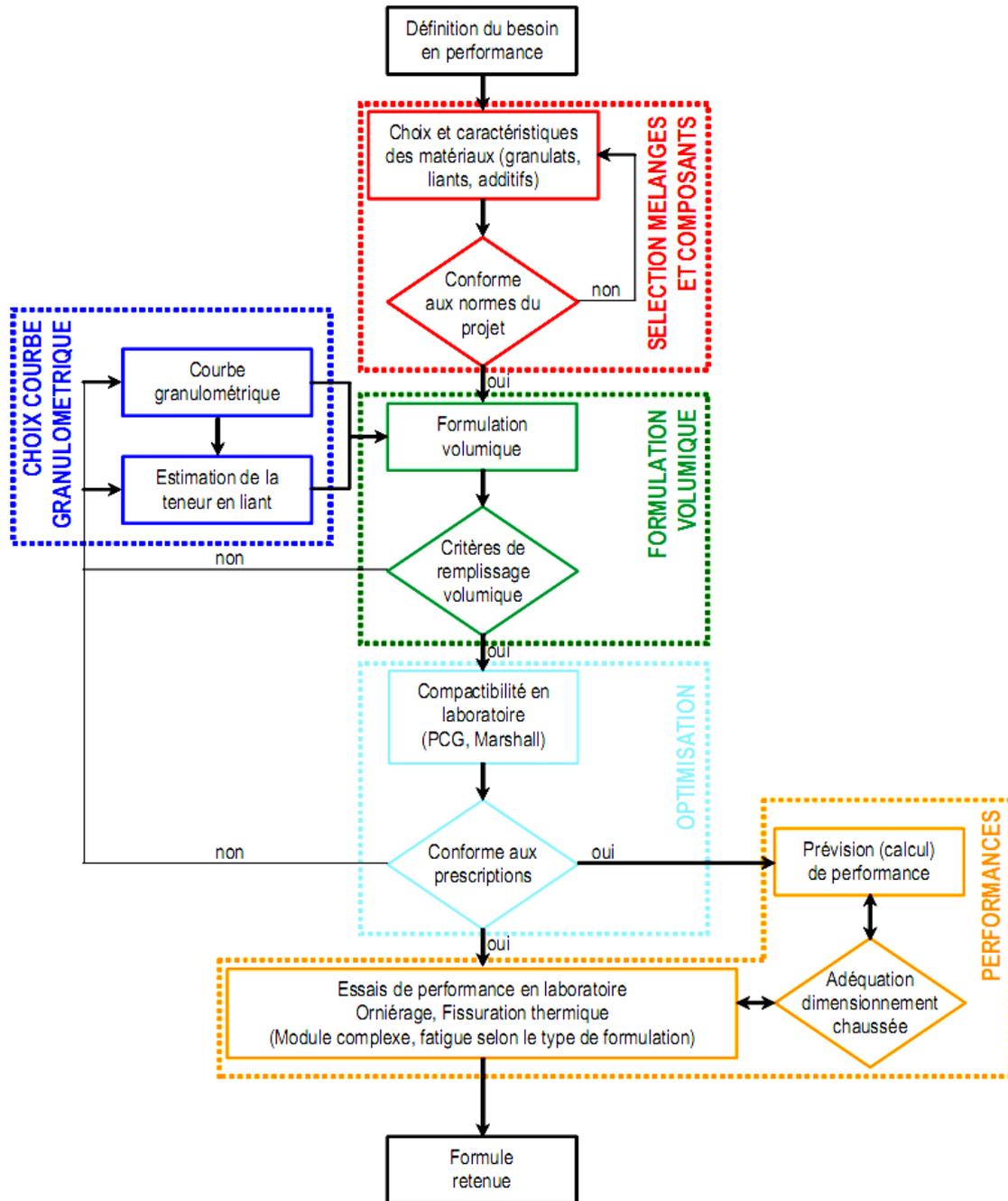
- Optimalisation

Cette partie consiste à fabriquer en plus de l'enrobé à la teneur en liant initiale, 04 enrobés différents de teneur en liant variant de  $\pm 0.5\%$ . Chaque type d'enrobé est compacté suivant la procédure Marshall ou à la PCG puis on choisit la teneur en liant donnant la compacité optimale.

- Vérification

Cette dernière étape consiste à vérifier les performances de l'enrobé formulé. A ce niveau, la vérification se fait à travers des essais de module, de fatigue, d'orniérage et de susceptibilité à l'eau. Les différents résultats obtenus serviront à valider la formule retenue au niveau de l'optimalisation.

Toute cette démarche peut-être matérialisé comme suit dans un organigramme :



**Figure n° 12:** organigramme de la démarche de formulation

#### IV.2. Méthodes de formulation

Du point de vue du cadre général, il existe plusieurs types de méthode de formulation qui sont fonction de l’histoire, du contexte technique et de la méthodologie de dimensionnement.

Dans ce contexte, il n’en sera cité que les 02 plus utilisées fonction de la technique et de la méthode de dimensionnement disposées. Ces deux méthodes sont :

#### IV.2.1. Le Marshall mix design ou méthode Marshall

Cette méthode a été développée dans les années 30 par Bruce Marshall. Elle vise à choisir la teneur en liant pour une certaine densité du mélange qui satisfait à une stabilité minimale et un fluage évoluant dans un intervalle d'acceptation.

La procédure de formulation se déroule comme suit :

- Choix des agrégats

Ce choix se fait en accord avec le CST du projet. Les matériaux doivent satisfaire les propriétés physico-chimiques fixées dans celui-ci. Aussi la combinaison des différentes tailles d'agrégats doit permettre d'obtenir une courbe granulométrique aussi proche que possible de la courbe de référence.

- Choix du liant

A ce niveau, il n'existe pas une procédure de sélection et d'évaluation normalisée. Son choix est alors laissé à l'ingénieur qui devra réaliser les essais qu'il juge nécessaire pour le guider.

- La préparation des échantillons

Les échantillons sont fabriqués dans des moules normalisées. Typiquement on prépare 03 ou 05 mélanges avec des teneurs en liant différentes, et pour chaque mélange, 03 échantillons. Les échantillons sont ensuite compactés à l'aide de la dame Marshall selon des règles bien précises.

- Détermination de la stabilité et du fluage

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

- Calcul de la densité et des vides

Cette étape sert à déterminer les caractéristiques du mélange que sont les densités et les vides.

- Choix de la teneur en liant optimale

Il est fait à ce niveau, une représentation de l'évolution du pourcentage de vides, de la densité, du fluage, de la stabilité, des vides du squelette minéral et des vides remplis par le bitume en fonction de la teneur en liant. La teneur idéale en liant est obtenue en faisant la moyenne des teneurs en bitume qui ont donné la stabilité maximale, la masse volumique maximale et la teneur en vides désirée. Tout cela se fait graphiquement à l'aide des courbes issues des essais réalisés sur les échantillons.

#### IV.2.2. La méthode française

Cette méthode s'effectue en deux étapes que sont :

- Détermination de la quantité minimale de liant

La quantité de liant se détermine en fonction de la granulométrie du mélange. En effet en se basant sur l'approche codifiée en France qui veut que pour toute composition granulométrique, on puisse définir une quantité minimale de liant nécessaire pour assurer sa durabilité, une formule a pu être établie en fonction du module de richesse des grains. On obtient :

$$TL = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad ; \text{ avec } \alpha = \frac{2.65}{MVRg} \quad ; \text{ coefficient correcteur}$$

$\Sigma$  La surface spécifique calculée avec la formule :

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135 f$$

Avec les proportions massiques :

- G, des éléments supérieurs à 6.3 mm
- S, des éléments compris entre 6.3 mm et 0.315 mm
- s, des éléments compris entre 0.315 mm et 0.08 mm
- f, des éléments inférieurs à 0.08 mm.

- Essai à la presse à cisaillement giratoire

Cet essai vise à estimer le comportement lors du compactage du mélange précédemment déterminé. Pour se faire, une quantité prédéterminée du mélange hydrocarbonée, portée à la température usuelle de fabrication en centrale est placée dans un moule cylindrique de 150 mm de diamètre. Le compactage s'obtient par l'action simultanée d'une :

- Force de compression statique assez faible de 0.6 MPa
- d'une déformation de l'éprouvette à laquelle on n'impose que son axe longitudinal décrive une surface conique de révolution.

L'interprétation de l'essai est faite en considérant les valeurs de pourcentages de vides obtenues après 10 girations et après un nombre Ng girations dépendant de l'enrobé. Après les Ng girations, il est spécifié une fourchette de valeur fonction des besoins en performance de l'enrobé considéré.

#### IV.3. Essais de performance dans les études de formulation

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

#### IV.3.1. Essai Duriez ou essai de compression simple

L'essai Duriez ne permet pas d'avoir une propriété intrinsèque du matériau mais juste un moyen d'appréciation de façon indirecte de la tenue à l'eau. Pour cet essai, l'énergie de compactage utilisée pour la confection des éprouvettes est obtenue par une compression double effet de l'enrobé à l'intérieur d'un moule cylindrique. Les éprouvettes ainsi confectionnées sont conservées :

- Les unes à 18° C pendant 07 jours à l'air libre
- Les autres à 18° C pendant 07 jours dans l'eau

Au bout de ce délai, les éprouvettes sont écrasées à une vitesse constante en compression simple et l'on obtient :

- La résistance des éprouvettes conservées à l'air : R
- La résistance des éprouvettes conservées dans l'eau : r

Le rapport  $r/R$  appelé rapport d'immersion/compression traduit en quelque sorte la tenue à l'eau de l'enrobé.

#### IV.3.2. Essai d'orniérage

L'essai à l'orniéreur sert à l'étude des enrobés pour chaussées à trafic intense et très élevé. Il permet d'apprécier la résistance à l'orniérage des couches de roulement et des couches de base destinées notamment aux types de trafic précités, et cela dans des conditions de nature comparable à celle rencontrées sur les chaussées.

L'essai est caractérisé par la détermination de la profondeur d'ornière provoquée par le passage répété d'un pneumatique sur une plaque d'enrobé à 60° C pour les couche de surface et à 50° C pour les couches de base.

#### IV.3.3. Essai de module complexe

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

#### IV.3.4. Essai de fatigue

Cet essai consiste à solliciter en flexion au travers de son bord libre une éprouvette trapézoïdale d'enrobé encastré à sa base. Cette sollicitation se fait en déplacement imposé.

C'est-à-dire qu'on impose un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante à l'extrémité de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque l'effort nécessaire pour obtenir la déformation est égal à la moitié de l'effort initial.

#### IV.4. Niveaux de formulation

Vu le coût élevé des essais de formulation et vu que la pertinence de certains résultats d'essai dépendent des conditions rencontrés, il existe plusieurs niveau d'application des méthodes de formulation en fonction de la nature des études. Ainsi, en fonction qu'on ait à faire une vérification de formule déjà appliquée, à adapter une formule à un cas de changement d'au moins un des constituants ou dans le cas d'une formule nouvelle, on aura quatre (04) niveaux ou « stratégies » de formulation détaillé comme suit :

***Tableau n°5 : niveau de formulation***

<b>Niveau de formulation</b>	<b>Etapes de la formulation</b>
Niveau 1	Essai Marshall ou PCG + essai duriez
Niveau 2	Essai Marshall ou PCG + essai duriez + ornièreur Lcpc
Niveau 3	Essai Marshall ou PCG + essai duriez + ornièreur Lcpc + essai de module complexe
Niveau 4	Essai Marshall ou PCG + essai duriez + ornièreur Lcpc + essai de module complexe + essai de fatigue

Il est à noter qu'au-delà des niveaux de formulation, il existe en fonction des performances atteintes aux essais, trois (03) classes de produits pour les enrobés.

## V. APPLICATION AU CAS DE L'ETUDE DE FORMULATION DES ENROBES DE LA RN1

### V.1. Spécifications sur les composants

Les spécifications faites sont de diverses natures et concernent :

- Les granulats

A ce niveau, il est à noter que le béton bitumineux et la grave bitume appartiennent à la même catégorie de granulat qu'est la catégorie C III définie par la norme **NF P 18-586**. Cette catégorie requiert les spécifications récapitulées dans le tableau ci-dessous :

***Tableau n°6 :** spécifications sur les granulats*

Critères d'acceptabilité	Norme	spécifications	
<b>Caractéristiques intrinsèques :</b> Los Angeles (LA) Micro-Deval humide (MDE) (LA+MDE)	Selon NF P 18-573 et NF P 18-572	< 30	< 20
<b>Caractéristiques de fabrication</b> (granularité) :  <b>Tamis (mm)</b> 16 14 10 6.3 2 0.5 0.08	Selon NF P 18-560	BB	GB
		100	100
		100	100-92
		95-100	100-71
		65-72	79-51
		38-46	45-23
		20-27	25-10
		6-9	8-3
Indice de plasticité IP Equivalent de sable à 10% de fines ES Coefficient d'aplatissement Pourcentage de refus à D et d		NM > 50 < 20 < 15	

- Les liants

Le liant retenu pour la formulation sera choisi parmi les deux grades de bitumes (50/70 et le 70/100) dont les spécifications sont ci-dessous:

***Tableau n°7 : spécification sur les liants***

Caractéristiques	Classes	
	50/70	70/100
Point de ramollissement bille et anneau (TBA) °C	45/51	42/48
Pénétrabilité à 25° C, 100g, 5 s 1/10 mm	50/70	70/100
Densité relative à 25° C	1/1.10	1/1.07
ΔT bille et anneau après RTFOT °C	≤ 8	≤ 9
TBA minimale après RTFOT °C	≥ 47	≥ 44
Pénétrabilité restante après RTFOT %	≥ 60	≥ 55
Point d'éclair °C	≥ 230	≥ 230
Ductilité à 25° C cm	≥ 80	≥ 100
Solubilité %	≥ 99.5	≥ 99.5
Teneur en paraffine	≤ 4.5	≤ 4.5

▪ Les enrobés

Vu que les deux matériaux n'ont pas les mêmes utilités dans la structure de la chaussée, les spécifications qui leur concernent sont différentes.

Pour la GB on a :

***Tableau n°8 : spécifications sur la GB***

Spécifications pour GB 0/14	
Essais	Valeurs
Module de richesse K	≥ 2.5
Essai Marshall Compacité in situ en % du Marshall	> 97
Essai duriez à 18° C Rapport = r immersion / R à sec	≥ 0.65
Couche d'accrochage en bitume résiduel en g/m <sup>2</sup> Mise en œuvre conforme à la norme NF P 98-150	350-400
Température minimale d'épandage	130°
Compacité de mise en œuvre : C / MVRe	C ≥ 89%
Epaisseur moyenne d'utilisation en cm	8-14

Pour le BB on a :

**Tableau n°9** : spécifications sur le BB

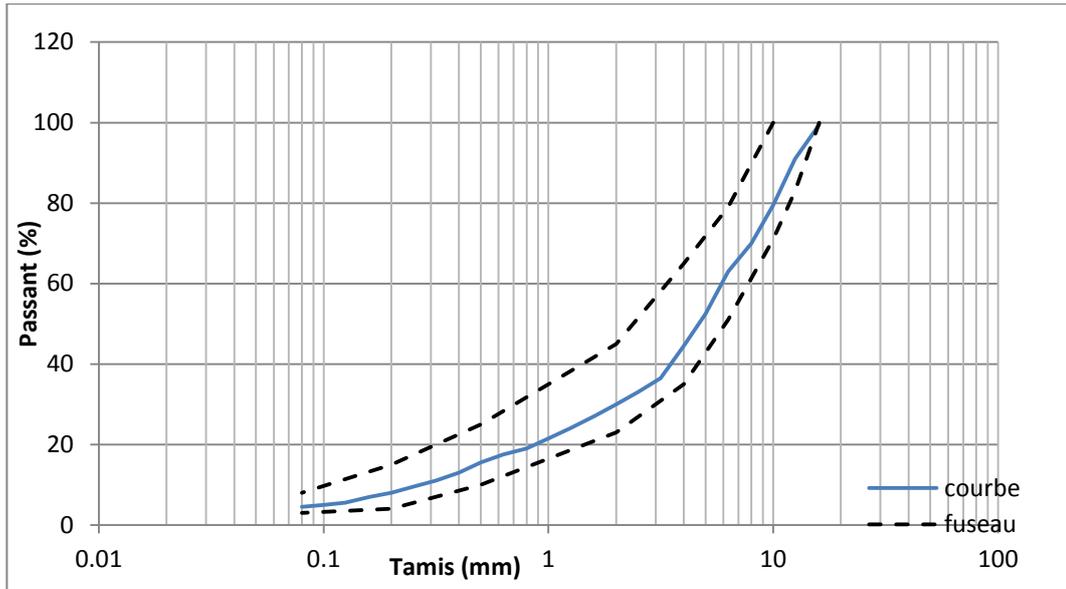
Spécifications pour BB 0/10	
Essais	Valeurs
Module de richesse K	$\geq 3.4$
Essai Marshall Compacité in situ en % du Marshall	$> 97$
Essai duriez à 18° C Rapport = r immersion / R à sec	$\geq 0.75$
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire Pourcentage de vide – compacité à 10 girations Pourcentage de vide – compacité à 60 girations	$> 11$ $> 5-10<$
Essai d'orniérage - Profondeur d'ornière en % de l'épaisseur (dalle de 10 cm à 60° C) après 30 000 cycles pour % de vide compris entre 5 et 8% - profondeur d'ornière pour le BB	$\leq 10$ $\leq 7.5$
Couche d'accrochage en bitume résiduel en g/m <sup>2</sup> Mise en œuvre conforme à la norme NF P 98-150 Température minimale d'épandage Compacité de mise en œuvre : C / MVRe Macro-texture – hauteur au sable vraie en mm Epaisseur moyenne d'utilisation en cm	250-300  125° $92 < C < 96$ $\geq 0.4$ 5-7
(*) essai réservé au cas où l'on ne dispose pas de presse à cisaillement giratoire	

## V.2. Formulation de la GB

La GB retenue par le CST est de classe 3. Pour sa formulation, il sera appliqué la méthode Marshall pour une formulation de niveau 1 :

### V.2.1. Choix des granulats

La GB sera élaborée à partir d'une grave concassée approvisionnée en quatre fractions qui sont : 0/4, 4/6, 6/10 et le 10/14. Ces échantillons ont fait l'objet d'identification selon les spécifications du CST. Un mélange à blanc réalisé à l'issue de ces essais a donné les résultats suivants :



**Figure n°13 :** courbe granulométrique de la GB

On remarque que la courbe granulométrique du mélange s’intègre parfaitement dans le fuseau granulométrique du 0/14.

### V.2.2. Choix du liant

Pour le choix de la teneur en liant, vu le niveau de trafic de la voie et vu les conditions climatiques de la zone, le choix a été fait sur un bitume dont les essais d’identification suivant ont permis de conclure qu’il est de **grade 50/70**.

**Tableau n°10 :** essai d’identification du bitume pur

Densité relative (NF T 66-007)	Pénétrabilité à 25° C (NF T 66-004)	Point de ramollissement (NF T 66-008)
1.045	55.16	48.00

### V.2.3. Détermination du taux minimal en liant

Le choix de la teneur en liant initiale s’est fait pour un module de richesse minimale de 2.5 comme spécifié dans le CST.

Ce qui donne :  $TL_{min} = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma}$  ; avec :  $\alpha = \frac{2.65}{MVR_g} = \frac{2.65}{2623} = 0.996$  et  $\sqrt[5]{\Sigma} = 1.525$

$$TL_{min} = 3.84\%$$

### V.2.4. Préparation des briquettes

Il est réalisé pour l’essai, 03 groupes d’éprouvettes dont la teneur en liant varie de 0.45% par rapport à la teneur en liant initiale. Ces différentes teneurs sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau n°11** : récapitulatif de la teneur en liant des différents mélanges

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
<b>K</b>	2.50	2.89	3.19
<b>TL</b>	3.84	4.39	4.84

Pour chaque groupe d'éprouvette il est fabriqué 03 briquettes pour l'essai. Les briquettes sont réalisées par compactage des échantillons à l'aide de chocs provoqués par la chute d'une dame de poids et de hauteur normalisés sur les deux faces (50 coups de dame sur chaque face). Cette opération se déroule dans des moules normalisés de 10.5 cm de diamètre. Elles sont ensuite identifiées puis démoulées après 12 heures à la température ambiante.

### V.2.5. Essai de stabilité et de fluage

A ce niveau, les briquettes sont trempées pendant 30 à 40 minutes dans un bain à 60° C puis sont placées diamétralement entre les mâchoires de la presse pour y subir un écrasement à vitesse constante. La presse est arrêtée lorsque les charges maximales sont atteintes. Les valeurs de charge et de déformation obtenues sont récapitulées dans le tableau suivant :

**Tableau n°12** : récapitulatif des résultats de stabilité et de fluage

	Mélange 1	Mélange 2	Mélange 3
<b>Stabilité KN</b>	1823.4	2029.66	2131.00
<b>Fluage mm</b>	2.037	2.233	2.433

### V.2.6. Calcul des caractéristiques requises pour les briquettes

Les principales caractéristiques requises sont :

- La masse volumique réelle  $MVRe = \frac{(100+TL)}{(\frac{100}{MVRg} + \frac{TL}{MVRb})}$
- La masse volumique apparente MVA calculée après une pesée en immersion
- Les pourcentages :

$$Vi = (1 - \frac{MVA}{MVRe}) \times 100$$

$$VAM = (MVRg - MVRe) \times \frac{100}{MVRb}$$

$$VRB = \frac{(VAM - Vi)}{VAM} \times 100$$

- Le module de richesse K, tiré de la formule  $TL = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma}$
- La compacité  $C = \frac{MVA}{MVRe}$

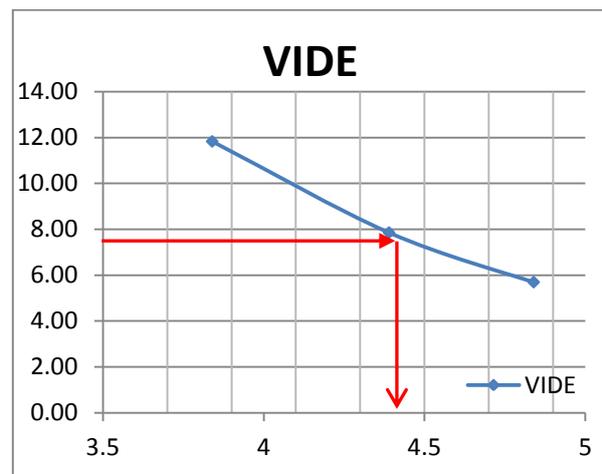
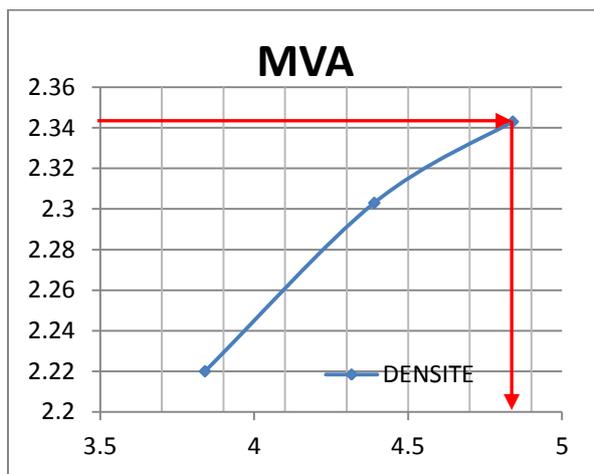
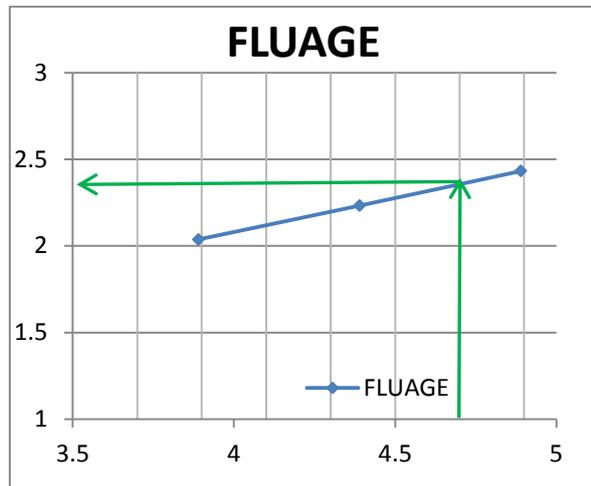
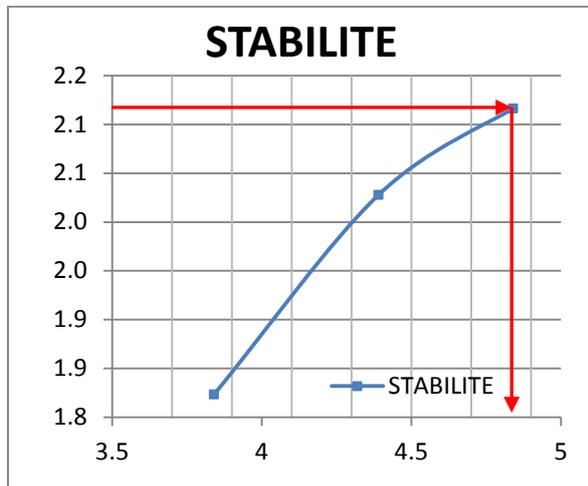
Toutes ces valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

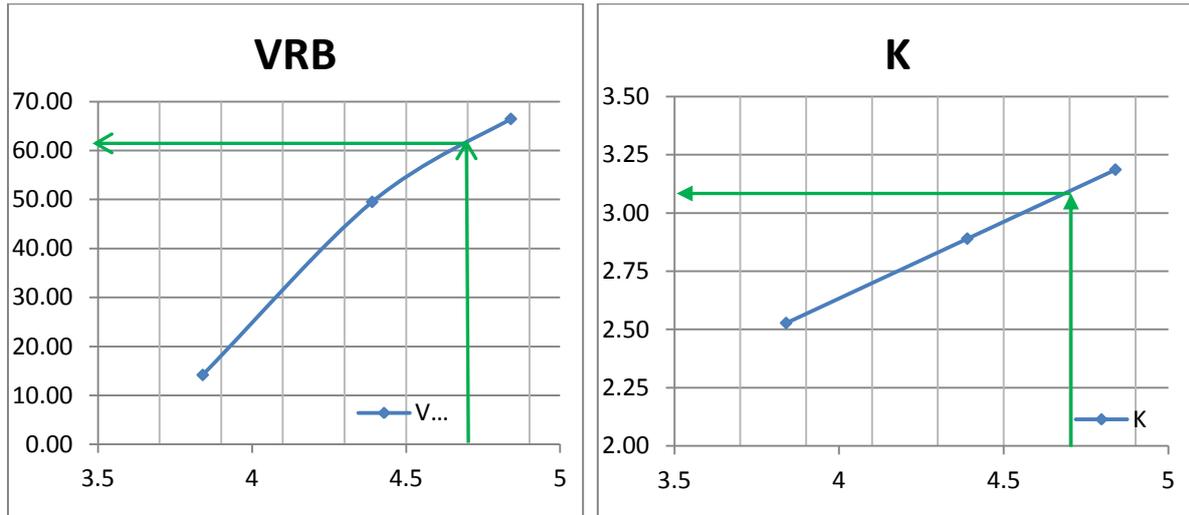
**Tableau n°13 : récapitulatif des caractéristiques des briquettes**

	MVRe	MVA	Vi	VAM	VRB	K	C
<b>Mélange 1</b>	2.520	2.22	11.83	13.62	14.18	2.53	88.17
<b>Mélange 2</b>	2.503	2.303	7.86	15.24	49.52	2.89	92.14
<b>Mélange 3</b>	2.486	2.343	5.70	16.83	66.46	3.19	94.3

**V.2.7. Teneur en liant optimale**

Cette teneur s’obtient par la mise en graphique des différentes caractéristiques (stabilité Marshall, déformation, pourcentage de vide, masse volumique) en fonction de la teneur en liant. Ces graphiques se présentent comme suit :





**Figure n°14 :** liste des graphiques de variation des caractéristiques en fonction de TL

Au travers de ces différentes valeurs, la teneur en liant optimale s’obtient en faisant la moyenne des teneurs en liant qui ont données la stabilité maximale, la masse volumique maximale et la teneur en vide désirée. Ce qui donne :

	stabilité	Masse volumique max	% de vides
<b>Valeur optimale</b>	2131.00	2.343	7.5
<b>TL</b>	4.84	4.84	4.42
<b>TL optimale</b>	<b>4.7</b>		

Cette teneur optimale a été cependant utilisée pour vérifier sur les autres graphiques (VAM, K, déformation) si elle permet de satisfaire aux exigences. Ce qui donne :

	Fluage	VRB	K
<b>TL retenue</b>	4.7		
<b>Valeur lue</b>	2.78	61	3.08
<b>Exigences</b>	2.00 – 4.00	≤ 85	2.5 – 3.5

A travers ce tableau, on constate que la valeur retenue répond aux exigences formulées, donc, il sera retenu une **TL = 4.7**

### V.2.8. Essai duriez

L’essai est réalisé avec les éprouvettes issues de l’essai Marshall. Les résultats obtenus suite à l’écrasement des éprouvettes après 7 jours de maturation ont donné pour :

- Les éprouvettes conservées à l’air libre, R = 5.18 MPa

- Les éprouvettes immergées dans l'eau,  $r = 3.92 \text{ MPa}$

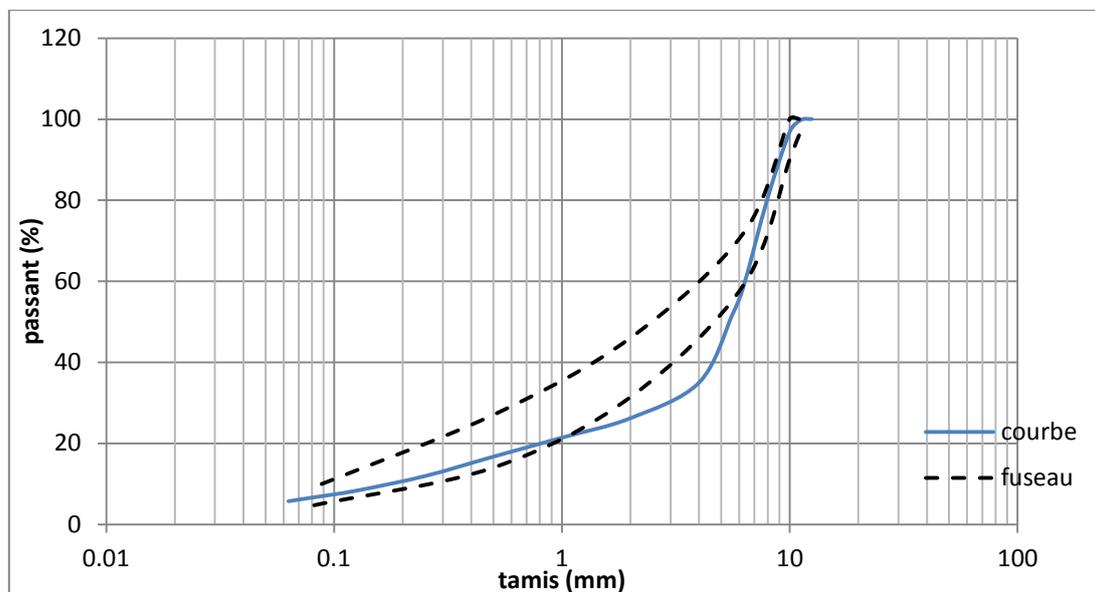
Ce qui donne un rapport  $r/R = 0.76$  conforme au CST qui exige un rapport  $\geq 0.65$

### V.3. Formulation du BB

Le BB retenue dans le CST est un BB semi-grenue de classe 2. De ce fait, vu ses besoins en performance il est recommandé une formulation de niveau 2 (PCG + essai d'orniérage). Pour se faire, vu les moyens limités de nos laboratoires (formulation de niveau 1) l'étude à été réalisé par le laboratoire EIFFAGE puis à été validée par le LNBTP. Cette formulation à été faite avec la méthode française qui consiste à un :

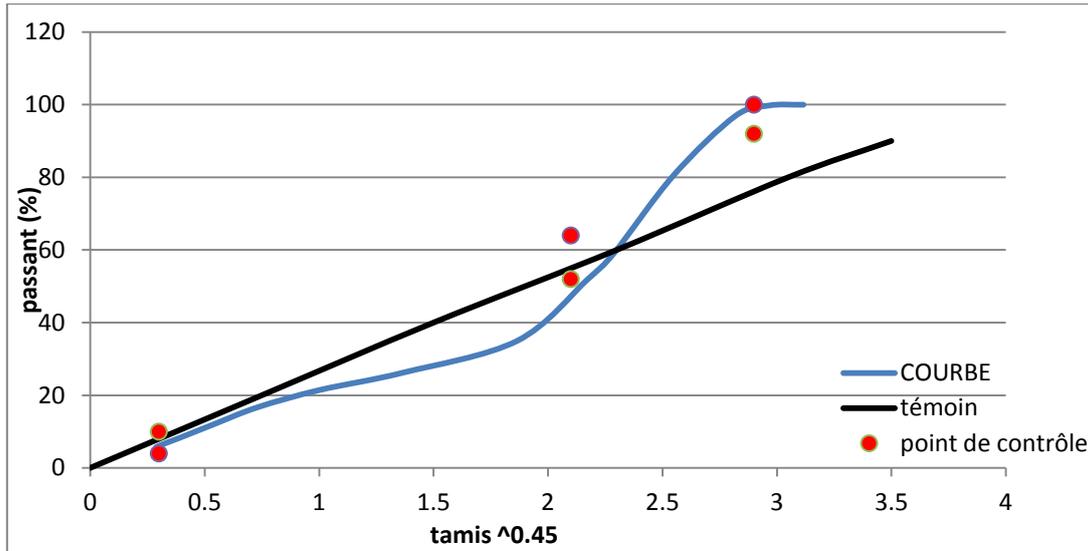
#### V.3.1. Choix de la granulométrie

Le BB sera élaboré à partir d'un grave concassé approvisionné en trois fraction que sont : 0/4, 4/6, 6/10 et le 10/14 dont le combiné granulométrique réalisé à donné les résultats suivants :



**Figure n°16 :** courbe granulométrique du BB

A ce niveau on constate que la courbe granulométrique sort de son fuseau de contrôle, cet écart est d'autant plus marqué lorsqu'on essaie de la comparée à la courbe de masse volumique maximale. En effet on remarque qu'au niveau du second point de contrôle la courbe sort complètement de sa zone de prescription :



**Figure n°17 :** courbe de comparaison à la masse volumique maximale

### V.3.2. Choix du liant et teneur en liant initiale

Le choix a été fait sur un bitume dont les essais d'identification suivant ont permis de conclure qu'il est de **grade 50/70**.

**Tableau n°14 :** identification du bitume pur

Densité relative (NF T 66-007)	Pénétrabilité à 25° C (NF T 66-004)	Point de ramollissement (NF T 66-008)
1.045	51.00	49.00

Le choix de la teneur en liant initiale s'est fait pour un module de richesse minimale de 3.4 comme spécifié dans le CST.

Ce qui donne :  $TL_{min} = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma}$  ; avec :  $\alpha = \frac{2.65}{MVRg} = \frac{2.65}{2623} = 1.01$  et  $\sqrt[5]{\Sigma} = 1.514$

$$TL_{min} = 5.2\%$$

### V.3.3. Détermination de la densité maximale

L'essai de densité maximale permet d'obtenir la densité maximale expérimentale de l'enrobé réalisée de façon à ajuster plus précisément la quantité de bitume à insérer dans le mélange destiné à l'essai PCG. Elle est déterminée par pesée hydrostatique ou l'on détermine les masses suivantes :

- Masse de l'enrobé à l'air libre A = 1230 g
- Masse de l'enrobé dans l'eau E = 684 g

Avec ces données, on obtient la densité maximale à travers la formule :  $dm = \frac{A}{A-E}$

Ce qui donne pour l'essai un  $dm = 2253 \text{ Kg/m}^3$

### V.3.4. Essai PCG

En premier lieu il convient de déterminer la masse de l'enrobé à utiliser qui est :

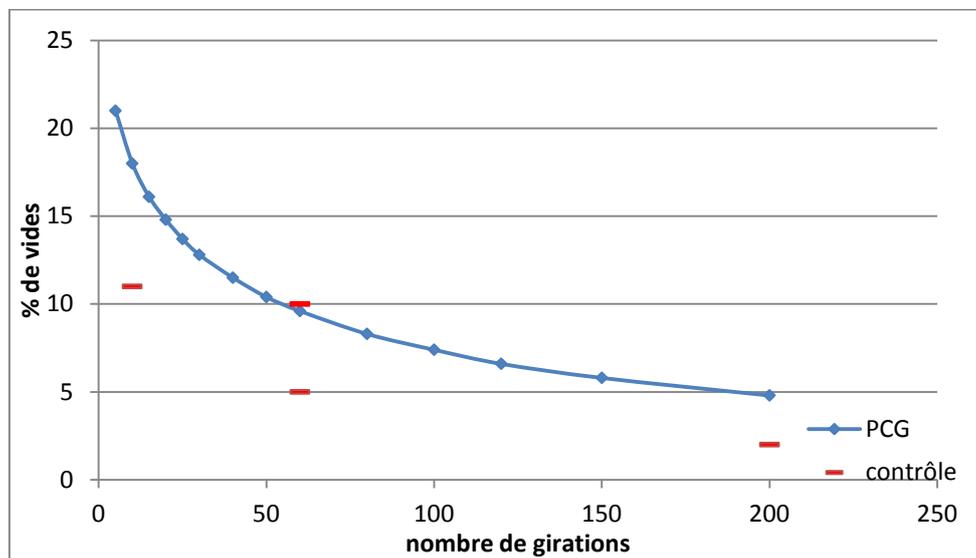
$$m = dm \times \rho_{\text{eau}} \times h(\text{min}) \times \frac{\pi \times \phi^2}{4} ; \text{ où } h(\text{min}) : \text{ hauteur de l'éprouvette à 0\% de vides}$$

$$\implies m = 4572.48 \text{ g}$$

L'essai est alors effectué et le pourcentage de vides est calculé en fonction de la hauteur obtenue à chaque niveau de giration donné. Elle est exprimée par la formule :

$$Vi = 100 \times \frac{H(\text{ng}) - H(\text{min})}{H(\text{ng})} ; \text{ avec } H(\text{ng}) : \text{ hauteur à un nombre de giration donné (mm)}$$

Les différentes valeurs ainsi obtenues sont matérialisées dans le graphique suivant :



**Figure n°18 : courbe des variations de vides de l'essai PCG**

Sur le graphique, on constate que la courbe est conforme aux prescriptions du CST qui impose pour :

- L'essai PCG, les valeurs suivantes :

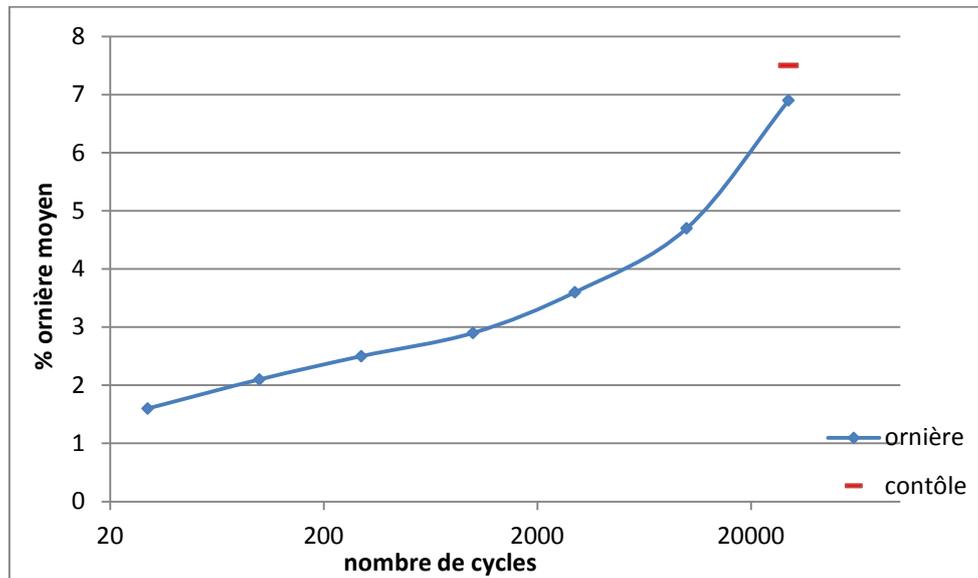
Nombre de girations	10	60	200
% de vides	> 2%	> 5-10% <	> 2%

- La formulation du BB : un pourcentage de vides compris entre 4 et 9% à 60 girations pour les granulats 0/10.

### V.3.5. Essai d'orniérage

L'essai est réalisé sur des plaques de 10.04 cm d'épaisseur avec un enrobé de formulation conforme aux résultats donnés par l'essai PCG à une température de 60° C. Par la suite, on

fait rouler un pneu lisse sur les éprouvettes en de nombreux cycles. Les résultats obtenus sont matérialisés sur le graphique ci-dessous :



**Figure n°19 :** courbe de l'essai d'orniérage

Ces résultats permettent de conclure sur la conformité de l'enrobé utilisé car ils répondent aux spécifications du CST qui impose pour :

- La validation de l'essai d'orniérage, un % d'ornière < 10% à 30000 cycles
- La validation de la formule d'enrobé, un % d'ornière < 7.5% à 30000 cycles

#### V.3.6. Essai duriez

L'essai est réalisé avec les éprouvettes issues de l'essai PCG. Les résultats obtenus suite à l'écrasement des éprouvettes après 7 jours de maturation ont donné pour :

- Les éprouvettes conservées à l'air libre, R = 4.43 MPa
- Les éprouvettes immergées dans l'eau, r = 7.13 MPa

Ce qui donne un rapport  $r/R = 1.6$  conforme au CST qui exige un rapport  $\geq 0.75$

## VI. PRODUCTION EN CENTRALE

### VI.1. Installations disponibles

Pour la production des différents enrobés, il est mis à la disposition :

#### VI.1.1. Une carrière et une centrale de concassage

La carrière est située dans la localité de Ramongo et assure une production en roche massive dure assez élevée pour assurer l'approvisionnement en roches nécessaire à la production de toute la quantité de granulat requise. Aussi elle assure la production de roches de qualité conforme à la qualité requise pour la production des différents matériaux. Ces caractéristiques sont définies dans le tableau suivant :

***Tableau n°15 : récapitulatif des caractéristiques de la carrière***

Essais	Résultats
Los Angeles (LA)	27
Micro-Deval humide (MDE)	9.5
(LA + MDE)	36.5

La centrale de concassage, située juste à côté de la carrière, assure la production des différentes fractions granulaires suivantes : 0/4, 4/6.3, 6.3/10, 10/14, 14/16, 16/20. Pour se faire, les roches massives passent premièrement dans une enceinte de pré-broyage puis suit une chaîne constituée de broyeur des différents calibres et de grille pour la ségrégation des éléments suivant leurs fractions granulaires.

#### VI.1.2. Une centrale d'enrobage

La centrale d'enrobage, assure la production des différents enrobés que sont : le BB et la GB. Elle a une production maximale de 100 tonnes/h et est de type : tambour sécheur-enrobeur (TSE). Elle est composée de :

- un pré doseur de granulats

Le pré doseur comporte plusieurs trémies doseuses divisées en compartiments séparant les différentes classes et catégories de granulats. Les granulats sont stockés dans les trémies puis entraînés par un tapis roulant vers le sécheur. Le débit de chaque granulat sera réglé par une trappe en position fixe et ceci pour avoir la quantité de granulat conforme à la portion prescrite par le CST.

- un sécheur de granulats

Le sécheur joue un double rôle dans le processus qui est : celui de chauffer les granulats de façon à avoir une teneur en eau limite de 0.5% pour une bonne adhésivité liant-granulats mais

aussi il a pour rôle d'assurer à la sortie du granulat une température constante afin d'assurer une bonne mouillabilité des granulats par le bitume. Pour se faire, les tapis roulants du pré doseur doivent assurer une introduction des granulats dans le sécheur de façon uniforme. La température du granulat à la sortie du sécheur sera comprise entre les limites suivantes :

- par temps chauds à : 140° à 150° C
- par temps frais à : 150° à 160° C

Toutes précautions devront être prises pour que la température maximale ne soit pas dépassée car cela entraînera un brûlage du bitume. A cet effet, la centrale doit être munie d'un appareil de mesure placé de telle sorte qu'il indique la température du granulat à l'entrée du malaxeur.

- un dépoussiéreur

Le dépoussiéreur est un appareil incorporé au poste d'enrobage fonctionnant en permanence lors de la préparation du granulat. Lorsqu'il n'est pas prescrit, les poussières sont évacuées au niveau du sécheur ; sinon, elles sont récupérées et réincorporées dans le mélange de façon uniforme.

- un silo de stockage de filler

Le filler est stocké en silo dont la capacité correspond à la consommation de deux journées de fabrication, sa manutention est assurée par des vis et par des pompes. Les fillers sont ainsi ajoutés aux granulats dans les proportions fixées par un dispositif réglable.

- une cuve de stockage et de chauffage du bitume

La cuve de stockage a une capacité totale suffisante pour assurer un fonctionnement continu de la centrale et comporte une jauge préalablement étalonnée. Cette cuve est aussi dotée d'un dispositif lui permettant de chauffer le liant entre 149° et 163° C tout en évitant une surchauffe locale. Pour se faire, un thermomètre est placé sur la conduite d'alimentation du malaxeur de façon à indiquer la température à l'entrée de ce dernier.

- un malaxeur

A ce niveau, la centrale étant de type TSE, le malaxeur est incorporé au sécheur. Il doit être capable de produire des enrobés homogènes. Pour se faire, il existe des critères de choix du diamètre du malaxeur en fonction du débit d'enrobés à produire.

**Tableau n°16 :** classification des diamètres de tambour

<b>Production (T/h)</b>	22	100	150	250	400	600
<b>Diamètre tambour (mm)</b>	0.8	1.3	1.5	1.7	2.1	2.5

En ce qui concerne la centrale en place elle a un malaxeur ayant un diamètre de 1.3 m. De plus le malaxeur est doté d'une plaque indiquant sa capacité volumétrique en fonction de la hauteur de remplissage et le débit d'agrégats pour un régime de production normale.

## VI.2. Production des différents composants

### VI.2.1. Production des bitumes fluidifiés

Les bitumes fluidifiés utilisés dans ce projet sont de deux catégories : le bitume 0/1 pour la couche d'imprégnation et le 400/600 pour la couche d'accrochage. Leur production se fait à l'aide d'une bouille à l'intérieur de laquelle des quantités de bitume pur et de fluidifiant sont insérées à des proportions définies. A ce niveau pour la production, le fluidifiant utilisé sera le pétrole et les différentes proportions à insérer sont définies dans le tableau suivant :

*Tableau n°17 : proportion des composants du bitume fluidifié*

	<b>Proportion de bitume</b>	<b>Proportion de pétrole</b>
<b>Bitume 0/1</b>	60	40
<b>Bitume 400/600</b>	85	15

### VI.2.2. Production des enrobés

La production des enrobés se fait à la centrale suivant les proportions définies par l'étude de formulation. Pour se faire, vu que la centrale en place est de type TSE où un tambour assure à la fois le séchage et l'enrobage des granulats, un dosage à froid suffit. Ce dosage est fait au travers d'un calibrage à froid de l'ouverture des trémies pour une vitesse de révolution constante du tapis roulant. Après cette étape, le volume de bitume est déterminé à l'aide d'une balance dynamique placée au niveau du tapis roulant qui mesure le poids des granulats entrants dans le tambour et après un rapide calcul effectué, l'ordinateur donne le débit de la pompe requis pour la formule. Ainsi pour une production maximale au niveau de la centrale (100 t/h) les données de calibrage se présentent comme suit :

*Tableau n°18 : résultat du calibrage à froid*

	<b>Trémie 1 (cm)</b>	<b>Trémie 2 (cm)</b>	<b>Trémie 3 (cm)</b>	<b>Trémie 4 (cm)</b>	<b>Débit bitume (l/min)</b>
<b>GB</b>	3.54	4.61	4.65	8.78	78.33
<b>BB</b>	4.18	5.00	7.60	-	94.56

## VII. MISE EN PLACE SUR CHANTIER

### VII.1. Planche d'essai

Avant la mise en place des enrobés, il est effectué des réglages de paramètres sur une planche d'essai. La longueur du tronçon d'essai prévu est de 300 ml pour une largeur équivalente à celle de la chaussée. Elle est implantée en alignement droit sur un support de portance équivalente à celle de la route.

Cette planche aura pour objet dans un premier temps, le choix des modalités d'utilisation de l'atelier adopté. C'est-à-dire :

- Le calage des caractéristiques du finisseur
- Le plan de marche des engins (nombre de passe)
- La vitesse de marche des engins
- La pression de gonflage des pneumatiques des compacteurs
- Le réglage de la hauteur de la table du finisseur.

Elle servira aussi dans un second temps à vérifier les qualités exigées portant sur :

- Les épaisseurs avant et après compactage
- La compacité en place

Pour se faire, quatre (04) méthodes de compactage ont été testées pour déterminer le nombre de passes du compacteur à pneumatiques lourds et celui du compacteur à billes.

Au terme de cette planche d'essai, les résultats suivant ont été retenus :

***Tableau n°19 : résultat de la planche d'essai***

Engins	Caractéristiques	GNT	GB	BB
Finisseur	Epaisseur avant compactage (cm)	24	14	6
	Epaisseur après compactage (cm)	20	12	5
Compacteur à billes	Nombre de passes	7	7	4
	Vitesse (ml/s)	2.25	2.25	2.25
Compacteur à pneus lourds	Nombre de passes	14	12	12
	Vitesse (ml/s)	4	4	4
	Pression des pneus	0.7	0.7	0.7

## VII.2. Mise en place des différents matériaux

### VII.2.1. La grave non traitée

La couche de base en GNT est exécutée sur toute la largeur de la plate-forme avec une épaisseur de 25 cm. Lors de sa mise en œuvre un grand soin est pris pour éviter la ségrégation en réalisant l'opération avec un finisseur. Au moment du compactage, la teneur en eau est maintenue par arrosage à  $\pm 1\%$  de l'OPM.

Cette étape vérifiée, on passe au compactage au moyen des compacteurs à pneus lourds ayant une charge de plus de trois (03) tonnes par roue et des compacteurs vibrants ayant une répartition de charge de 30 kg/cm. La méthode de compactage est celle définie par la planche d'essai avec un système composé d'un compacteur à pneu lourd suivi d'un compacteur vibrant. Le nombre de passes se définit comme suit :

- 14 passes par voie pour le compacteur à pneu
- 07 passes par voie pour le compacteur vibrant.

Il est à rappeler que tout au long de la mise en œuvre, il effectué tous les 250 m des contrôles sur l'épaisseur. Ces essais sont validés avec une tolérance de 0.5 cm sur la moyenne de quatre (04) mesures réalisées après le passage du compacteur vibrant.

### VII.2.2. La couche d'imprégnation

Après exécution de la couche de base, il est effectué une imprégnation au bitume fluidifié sur toute la largeur de la chaussée. Ce bitume, comme spécifié au niveau de la production est un bitume fluidifié 0/1 dosé à 1.2 kg/m<sup>2</sup>.

L'imprégnation est réalisée sur la GNT que trois jours au moins après réception de la couche de base et à condition qu'elle n'est subie aucune dégradation.

Avant cette opération un balayage est préalablement réalisé sur la couche de base au moyen d'une balayeuse mécanique pour tout matériau et poussière résiduelle.

La chaussée exempte de tout matériau roulant et poussière résiduelle, on passe à l'épandage du bitume fluidifié à l'aide d'une bouille au travers de la rampe et à une température comprise entre 60 et 80° C. lors de cette opération il est simultanément effectuer un contrôle du dosage en liant dont l'écart autorisé par rapport à la dose fixée ne pourra excéder un dixième de kilogramme par mètre carré (0.1 kg/m<sup>2</sup>).

Après cette étape, s'il a lieu d'ouvrir la zone imprégnée à la circulation, un sablage est effectué sur la surface imprégnée avec un dosage de sept (07) à huit (08) litres de sable de granulométrie : 2/4 ou 4/6 par mètre carré. Cette opération est aussi exécutée en cas d'excès de liant sur la zone d'imprégnation.

### VII.2.3. La couche d'accrochage

Cette opération est réalisée préalablement à la mise en place de la grave bitume et du béton bitumineux. Elle s'effectue sur la chaussée déjà imprégnée après un balayage effectué, comme pour le cas de l'imprégnation, au moyen d'une balayeuse mécanique de façon à éliminer tous matériaux et poussières résiduelles.

Pour se faire, un bitume fluidifié de type 400/600 est utilisé. Pour le dosage, il est variant selon la nature du support. Ce qui donne, pour :

- La mise en œuvre de la grave bitume sur la couche de base, un dosage de 400-500 g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel
- La mise en œuvre du béton bitumineux sur la couche de grave bitume, un dosage de 300-400 g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel.

La variation du dosage ne doit pas avoir un écart supérieur à 100 g/cm<sup>2</sup>.

A ce niveau l'épandage se fait au travers d'une lance pour assurer une pulvérisation uniforme et respecter le dosage prescrit car avec la rampe il est impossible d'épandre des quantités inférieures à 600 g/m<sup>2</sup>.

L'épandage de la couche d'accrochage se fait à l'avancement du finisseur avec une longueur d'avance inférieure à 50 ml. Un sablage à la pelle est effectué sur l'aire d'évolution des camions au niveau de l'épandage de la couche d'accrochage pour la mise en place de la grave bitume afin d'éviter que les pneumatiques des camions ne se colle et n'arrache l'imprégnation.

### VII.2.4. Les enrobés à chaud

La mise en place de la GB et du BB est précédée d'un balayage au moyen d'une balayeuse mécanique jusqu'à l'obtention d'un support propre.

Après cette étape s'effectue la mise en place de l'enrobé au moyen d'un finisseur afin d'avoir : une répartition sans ségrégation des granulats, un alignement, des profils avec les différentes pentes, une épaisseur fixée et une température correcte.

Cette température est fonction de la nature du bitume. Ce qui donne, pour le bitume 50/70 une température à :

- Temps très chaud comprise entre 130 et 140° C
- Temps frais et pluvieux comprise entre 135 et 145° C

Cette opération terminée, on passe au compactage au moyen de compacteurs que sont : les compacteurs à pneus et les rouleaux tandem vibrant. La méthode de compactage utilisée est

celle dite « compacteur à pneumatiques en tête » définie par la planche d'essai avec un système composé d'un :

- Compacteur à pneus type P1 lestés à 3 tonnes/roue avec des pneumatiques gonflés à des pressions de l'ordre de 0.7 à 0.8 MPa pour le BB ou de type P2 lestés à 5 tonnes/roue avec des pneumatiques gonflés à des pressions de l'ordre de 0.6 à 0.7 MPa pour la GB
- Compacteur rouleau tandem à jantes métalliques de type V0 ou V1.

Et un nombre de passe pour chaque engin définit comme suit :

- 12 passes sur la GB et la BB par voie pour le compacteur à pneu
- 07 passes vibrants sur la GB par voie pour le compacteur vibrant
- 02 passes non-vibrants sur le BB le même jour par voie pour le compacteur à pneu et 02 passes vibrants sur le BB le lendemain.

L'épandage des enrobés au finisseur étant réalisé par demi-chaussée de part et d'autre de l'axe, il est réalisé des joints longitudinaux de préférence la même journée afin de bénéficier de l'inertie de chute de température.

Pour la GB le joint est décalé de 15 cm de l'axe avec une première bande 15 cm plus large que la deuxième bande, alors que pour le BB, le joint est recentré à l'axe.

Dans ces deux cas, le joint est légèrement compacté au pneu puis le joint est ensuite « pincé » par un rouleau tandem lisse en appui sur la première bande.

Aussi des joints transversaux sont réalisés à chaque reprise de la mise en place. Pour se faire, on découpe l'extrémité de la bande ancienne à la scie, puis on badigeonne la surface fraîche juste avant la mise en œuvre de la nouvelle bande. Cette nouvelle bande est mise en place en tenant compte pour le joint transversale, d'une surépaisseur déduite du contre-fouissement derrière la table du finisseur. A ce niveau le réglage se fait au moyen d'un technicien et le compactage se fait avec un rouleau tandem.

## VIII. ESSAIS DE CONTROLE

Les essais de contrôle réalisés ont été scindés en deux grands groupes que sont :

### VIII.1. Les essais de contrôle sur la fabrication

A ce niveau, les essais sont réalisés sur les différents composants et se présente comme suit :

#### VIII.1.1. Essais sur les granulats

Vu que les granulats utilisés dans la production des enrobés seront de catégorie C III comme définit dans le cahier des spécifications, il sera réalisé des essais pour vérifier si les différentes caractéristiques retenues entrent dans les critères d'acceptabilités du C III. Pour se faire, les essais suivant ont été réalisés :

- le Los angeles (LA)
- l'analyse granulométrique
- l'équivalent de sable (ES)
- coefficient d'aplatissement (A)
- angularité (Rc)

#### VIII.1.2. Essais sur le bitume

Conformément au cahier des spécifications, le bitume retenu est le bitume pur de grade 50/70.

De ce fait, les essais suivant seront réalisés pour une identification du bitume :

- le point de ramollissement bille et anneau (TBA)
- la pénétrabilité
- la densité relative
- la pénétrabilité résiduelle après chauffage (RTFOT)

En plus de ces essais d'identification du bitume, d'autres essais sont réalisés en vue d'identifier les bitumes fluidifiés. Ces essais sont :

- la pseudo viscosité
- la pénétrabilité sur liant résiduel

#### VIII.1.3. Essais sur l'enrobé

Les enrobés, à la sortie de la centrale devront respectés les recommandations prescrites dans les résultats de formulation. Il sera de ce fait procédé aux essais :

- d'analyses granulométriques
- de teneur en liant
- de mesure de température à la sortie du malaxeur

### VIII.2. Les essais de contrôle de la mise en œuvre

La mise en œuvre des enrobés doit respecter plusieurs critères définis dans les résultats de la formulation et dans les spécifications du CST. Pour se faire, plusieurs essais sont à réaliser afin de vérifier les différents critères définis. De ce fait, il sera procédé aux essais :

- De température
- De compacité en place
- D'épaisseur
- De déflexion
- D'uni
- De nivellement

## IX. ANALYSES ET RECOMMANDATIONS

Les études ci-dessus ont menés à des résultats dont il sera fait dans ce chapitre : un résumé suivi d'analyses et des formulations de recommandations.

### IX.1. Analyses et discussions

#### IX.1.1. Dimensionnement chaussée

L'étude de dimensionnement du renforcement menée en première partie est arrivée à la conclusion que la structure proposée (structure n°1 : 20 cm GNT + 12 cm GB + 5 cm BB) est apte à écouler le trafic prévu pour les 15 ans à venir.

Une étude comparative de cette structure de chaussée avec celle qui était prévu par le marché (structure n°2 : 5 cm BB + 17 cm GB sur chaussée existante) à été réalisée afin de pouvoir tirer des conclusions sur la pertinence du point de vue économique et performantielle. Cette étude à fait ressortir les résultats suivants :

*Tableau n°20 : comparaison des différentes structures*

	<b>Durée de vie limite</b>	<b>Ecart</b>
<b>Structure n°1</b>	16 ans	5 658 436
<b>Structure du n°2</b>	19 ans	FCFA

Vu comme tel, la structure n°2 s'avère être plus intéressante mais de façon structurelle elle ne sera pas adaptée vu la grande faiblesse du BB existant qui se trouve même être à certains endroits, un enduit bicouche suite aux entretiens réalisés. Aussi, au vu de l'état des dégradations le recyclage de la couche de BB existant s'avère indispensable. Dans ce contexte, la structure n°1 s'avère être une solution intéressante.

Aussi il est à noter que le modèle de dimensionnement utilisé n'est pas adapté pour tous les cas de renforcement. En effet, cette méthode surdimensionne la structure car elle ne tient pas compte des dommages subits et des dommages résiduels. Pour ce cas de renforcement il est arrivé que le dommage subit soit déjà supérieur à 1 ce qui signifie que la chaussée avait déjà atteint sa durée de vie, ce qui a permis l'utilisation de ce modèle de calcul.

#### IX.1.2. Etude de formulation

Au niveau de l'étude de formulation les résultats obtenus sont du point de vue des spécifications du CST satisfaisante, mais d'autre part certaines réserves sont à émettre. En considérant ainsi les nouvelles configurations des charges des poids lourds sollicitant nos chaussées, certains essais actuellement utilisés ne sont plus adapter pour évaluer les

performances des enrobés. En effet les valeurs indicative basé sur les performances empiriques de l'essai Marshall ne sont nullement prédictive de l'évolution du comportement des enrobés en place. D'autres essai telle l'essai PCG s'avère actuellement être plus adapter vu l'intensité du trafic actuel.

Aussi, pour la formulation du BB réalisé à travers l'essai PCG, même si les performances requises par le CST ont été atteint, on a pu remarquer que la granulométrie n'est pas très adaptée. Cette inadaptation est d'autant plus flagrante lorsqu'on essaye de comparer cette courbe granulométrique à la courbe de densité maximale. A ce niveau, on note que la courbe sort complètement de l'intervalle des deux points de contrôle intermédiaire. Ceci traduit le fait que même si l'essai de PCG s'est avéré concluant, la formule retenue n'est pas celle optimale car avec cette granulométrie, la densité maximale nécessaire à l'exécution d'un essai PCG optimale n'est pas atteint. Cette situation pourra être corrigée à travers une étude de combiné granulométrique pour pouvoir trouver la composition granulométrique optimale.

### IX.1.3. Mise en œuvre

Concernant la mise en œuvre des matériaux sur le chantier, le compactage est assuré conformément aux essais réalisés sur la planche d'essai. Ces résultats ont permis d'atteindre les performances requises. Mais au niveau de la couche de BB, l'utilisation des compacteurs à pneus lourds (PS 500) font l'objet de restriction dans certains pays car leur utilisation engendre souvent des sur-compactages, ce qui va à l'encontre des besoins en performances de ces couches. De ce fait il serait plus intéressant d'intégrer depuis l'étape de la planche d'essai pour la couche de BB un atelier composé que de compacteur à billes vibrants et non-vibrants.

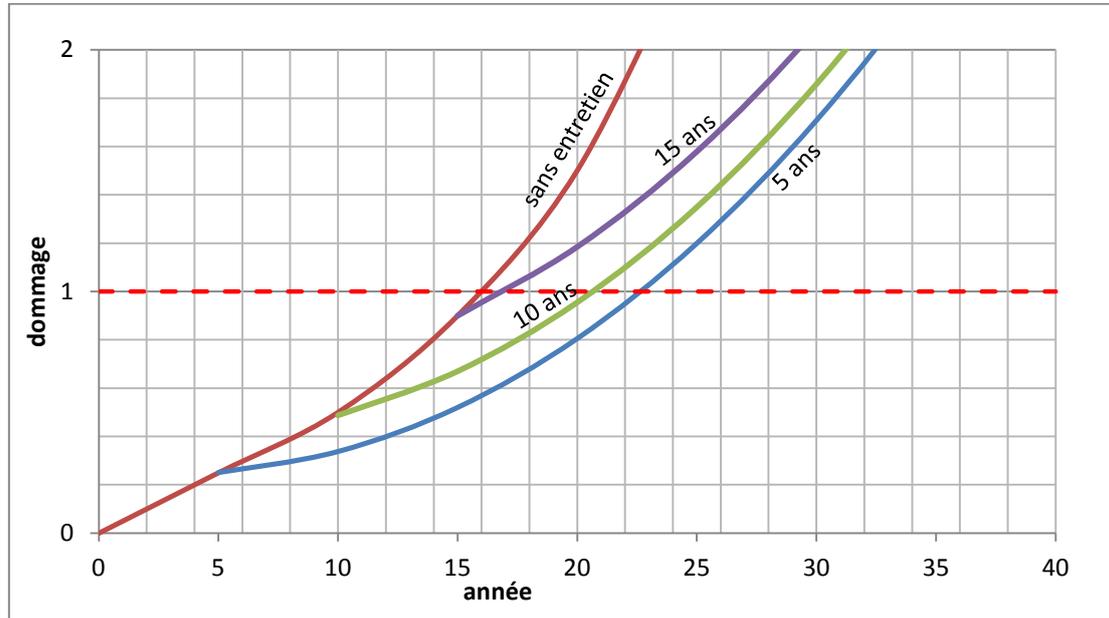
## IX.2. Recommandations

A ce niveau, on se rend compte qu'une exécution optimale et efficace d'une chaussée intéresse bien plusieurs acteurs que sont : le maître d'ouvrage qui souhaite pérenniser son ouvrage, le maître d'œuvre qui souhaite être plus performants et aussi les entreprises et laboratoire qui souhaite réaliser des études compétitif et à moindre coût. Pour se faire, nos recommandations s'adressent au :

### IX.2.1. Maître d'ouvrage

Pour le maître d'ouvrage, nos recommandations s'intéressent plus à la période optimale pour réaliser un entretien afin de pouvoir accroître la durée de vie. De ce fait, des suggestions d'entretien fait sur plusieurs années de façon théorique permettent de pouvoir déterminer en fonction du dommage subit, la durée de vie reportée. Pour se faire, il a été étudié l'évolution

du dommage sur 40 ans avec un pas de 05 ans puis les différents résultats obtenus ont été représentés sur le graphique suivant :



**Figure n°20 :** courbes de variation de la durée de vie selon l'entretien

Au travers de ces résultats obtenus, on obtient pour la suggestion d'entretien :

**Tableau n°21 :** résultat de l'entretien progressif

Entretien	Sans	à 5 ans	à 10 ans	à 15 ans
Durée de vie reportée (ans)	16	23	21	18

Il serait donc intéressant de prévoir un entretien au plus tôt pour plus pérenniser la durée de vie de la chaussée.

Aussi toujours dans ce même objectif, le maître d'ouvrage pourra s'intéresser à la création de poste de pesage supplémentaire afin de pouvoir diminuer le CAM qui malgré ceux existants s'avère toujours être élevé (1.9 en comparaison à une moyenne de 0.8). Cette situation impactera sur la durée de vie de la chaussée car revenir à un CAM de 0.8 reportera la durée de vie limite de la chaussée à 31 ans soit une rallonge de 15 ans sur la durée de vie limite initiale. L'application de ces 02 recommandations aura pour conséquence de rallonger la durée de vie de la chaussée de **22 ans**.

### IX.2.2. Maître d'œuvre

A ce niveau, il sera intéressant d'intégrer l'idée de l'existence d'autres méthodes de calcul plus adaptées aux calculs de renforcement. Ces méthodes tiennent compte des dégradations, des discontinuités de bord et des différentes configurations de charges. Des logiciels comme

ERASMUS permettent en fonction du diagnostic obtenu et du cahier des charges, de proposer des solutions de travaux variées respectant les normes de l'entretien et de la réhabilitation. Aussi de nouveau modèle de calcul basé sur les éléments finis permettent d'intégrer les dégradations telles que les fissurations, les ornières et aussi d'intégrer les limites de bord des chaussées.

Ces méthodes ont pour avantages de donner des résultats plus réalistes comparés aux méthodes actuellement utilisées. Ce qui permettra ainsi aux bureaux d'étude d'être plus performant et plus compétitif.

### IX.2.3. Laboratoire et entreprise

Pour les laboratoires et entreprises il est recommandé l'adoption de la méthode PCG pour l'optimisation de nos formules d'enrobés aux dépens de la méthode Marshall qui s'avère être de moins en moins efficace. En effet vu l'intensité du trafic les chaussée ont tendance à développer un comportement viscoélastique, et dans ce contexte les valeurs des essais Marshall s'avèrent inadaptées.

Aussi, il sera intéressant d'intégrer dans nos études de formulation une dimension de vérification des performances (module complexe, fatigue et susceptibilité à l'orniérage) de nos matériaux. Bien sans ignorer les réalités économiques qui limitent les capacités d'obtention du matériel nécessaire, ces essais seront possibles à réaliser aux moyens d'études théoriques et de logiciel tel que PRADO. En effet de nos jours des études ont permis de développer des bases théoriques de calcul du module complexe et aussi des méthodes analytiques de prédiction de l'orniérage. Bien que théorique ces méthodes donnent des résultats qui dans des cadres bien définis sont sensiblement proche des résultats obtenus de façon expérimentale.

## X. CONCLUSION GENERALE

La route revêt un caractère primordial tant sur le plan national que sur le plan régional en assurant les différents transit. Elle doit faire l'objet d'une attention particulière car sa mise en œuvre demande souvent des investissements très élevés à tel point que nos états prêtent des fonds la plupart du temps aux institutions financières pour pouvoir la réaliser. De ce fait, afin d'avoir un retour sur investissement, des études sérieuses devront être menées depuis l'étape du dimensionnement jusqu'à celle de l'entretien pour ainsi optimiser les capitaux investis. Cela se fait travers le dimensionnement et la mise en œuvre de chaussée qui répondront de façon réaliste aux sollicitations réelles et aussi l'établissement d'un programme d'entretien efficient afin de rallonger au maximum la durée de vie de la chaussée.

Dans ce contexte, le cadre de notre étude s'est intéressé à trois points importants dans la réalisation des projets de renforcement routiers qui sont l'étude de :

- Dimensionnement de la structure de renforcement
- Formulation des différents matériaux
- Mise en œuvre

Au terme de cette étude, nous sommes arrivés à la conclusion que ces projets ne sont pas réalisés de façon à optimiser au maximum les capitaux investis. En effet, les méthodes de dimensionnement utilisées ne sont aptes à assurer un dimensionnement réaliste vis-à-vis des réelles sollicitations du trafic. Aussi les méthodes de formulation des matériaux actuellement utilisées sont devenues obsolètes vu le niveau de trafic à écouler. Enfin les méthodologies de mise en œuvre de certaines couches ne tendent pas à pérenniser la durée de vie de l'ouvrage.

Non sans oublier les conditions économiques limites disposées, plusieurs perspectives s'offrent à nous à travers l'acquisition de logiciels plus pointus pour le dimensionnement, l'intégration des modèles théoriques en complément des études de formulation réalisées et enfin intégrer dès le début de l'étude un programme d'entretien progressif qui pourra avoir pour finalité le rallongement de la durée de vie de nos chaussées.

Il serait aussi intéressant dans les études à venir d'intégrer la mise en place de poste de péages conformément à la réglementation de l'UEMOA sur la norme des gabarits dans les hypothèses de dimensionnements car les coûts élevés de mise en œuvre de nos routes actuellement sont principalement dus aux surcharges des poids lourds qui entraîne de ce fait des CAM très élevés donc des trafics plus intense à écouler.

## BIBLIOGRAPHIE

1. **André LELIEVRE** (mise à jour 2002), Les enrobés bitumineux [livre], les éditions le Griffon d'argile, 410 p.
2. **CEBTP** (1980), Guide pratique de dimensionnement des chaussées des pays tropicaux [livre], Ministère de la coopération, 155 p.
3. **Laurent POROT** (nov. 2010), Structures de chaussée souples [revue], renforcement des chaussées souples, eurovia-vinci, 23 p.
4. **Jean-Pierre GRIMAUX, Paul-Claude GROZ et Monique HUET** (oct.1996), guide pratique de construction routière - première partie [revue], les enrobés bitumineux, revue générale des routes et des aérodromes, 12 p.
5. **Jean-Pierre GRIMAUX, Paul-Claude GROZ et Monique HUET** (oct.1996), guide pratique de construction routière - seconde partie [revue], les enrobés bitumineux, revue générale des routes et des aérodromes, 12 p.
6. **Jean Maurice BALLAY** (avr. 2010), Dimensionnement des chaussées selon la méthode rationnelle française [séminaire], Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Institut des Sciences Et Techniques (ISET), 43 p.
7. **Yves BROSSEAUD** (avr. 2010), Fabrication, mise en œuvre, contrôle [séminaire], Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Institut des Sciences Et Techniques (ISET), 100 p.
8. **JUNOD et A.G. DUMONT** (Déc. 2004), Formulation et optimisation des formules d'enrobés [mandat de recherche]- Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire des Voies de Circulation (LAVOC), 89 p.
9. **Quang Dat TRAN**, modèle simplifié pour les chaussées fissurées multicouches [mémoire], Ecole Nationale des Ponts et Chaussée (ENPC), sept. 2004 – 188 p.
10. **Yann LEFEUVRE**, Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux [mémoire], Ecole Nationale des Ponts et Chaussée (ENPC), 2001 – 200 p.
11. **Dr Ismaïla GUEYE**, Cours de Géotechnique Routière [cours], Fondation 2ie, 2010, 61 p.
12. **Dramane COULIBALY**, Cours de pathologie et entretien des chaussées [cours], Fondation 2ie, 2010, 105 p.
13. **Dr Paulin KOUASSI**, Cours de dimensionnement des Chaussées [cours], Fondation 2ie, 2009, 61 p.

# ANNEXES

## LISTES DES ANNEXES :

<b>ANNEXE 1</b> : Dimensionnement Alizé .....	50
<b>ANNEXE 2</b> : Analyse des déflexions.....	52
<b>ANNEXE 3</b> : Etudes sur l'entretien .....	53
<b>ANNEXE 4</b> : Tableau de comparaison des couts .....	55
<b>ANNEXE 5</b> : Calcul inverse de la durée de service pour CAM=0.8.....	57
<b>ANNEXE 6</b> : Correction analyse granulométrique du BB .....	59
<b>ANNEXE 7</b> : Analyse granulométrique de la GB .....	62
<b>ANNEXE 8</b> : Résultats des études de formulation .....	63
<b>ANNEXE 9</b> : Tableau d'exécution des essais de contrôle .....	64
<b>ANNEXE 10</b> : Calibrage de l'ouverture des trémies.....	68
<b>ANNEXE 11</b> : Schéma de la centrale d'enrobage .....	70
<b>ANNEXE 12</b> : Définition des différents essais .....	71
<b>ANNEXE 13</b> : Méthode théorique de prédiction de l'orniérage .....	78

**ANNEXE 1 : DIMENSIONNEMENT ALIZE**

**Données Chargement :**

- jumelage standard de 65 KN
- pression verticale : 0.6620 MPa
- rayon de contact : 0.1250 m
- entraxe jumelage : 0.3750 m

**Unités :**

m, MN et MPa ; déformations en  $\mu\text{déf}$  ; déflexions en mm/100

**Notations :**

X=axe transversal    Y=axe longitudinal Z=axe vertical

R=axe vertical roue    J=axe vertical entre-jumelage.

**Tractions principales majeures dans le plan horizontal XoY et compressions principales majeures selon la verticale ZZ ; déflexion maximale**

Niveau Calcul	EpsilonT horizontale	SigmaT horizontale	EpsilonZ verticale	SigmaZ verticale
----- surface (z=0.000) -----				
h= 0,050 m	0,000m	35,7 X-J	0,138 X-J	226,8 Z-R    0,660 Z-R
E= 1000,0 MPa				
nu= 0,350	0,050m	38,6 X-R	0,153 Y-J	328,3 Z-R    0,618 Z-R
----- collé (z=0,050m) -----				
h= 0,120 m	0,050m	38,6 X-R	0,289 Y-J	134,0 Z-R    0,618 Z-R
E= 2020,0 MPa				
nu= 0,350	0,170m	-144,6 Y-R	-0,282 Y-R	203,7 Z-R    0,239 Z-R
----- collé (z=0,170m) -----				
h= 0,200 m	0,170m	-144,6 Y-R	0,004 Y-J	378,0 Z-R    0,239 Z-R
E= 600,0 MPa				
nu= 0,350	0,370m	-114,1 Y-J	-0,049 Y-J	184,2 Z-J    0,084 Z-J
----- collé (z=0,370m) -----				
h= 0,150 m	0,370m	-114,1 Y-J	-0,017 Y-J	227,8 Z-J    0,084 Z-J
E= 400,0 MPa				

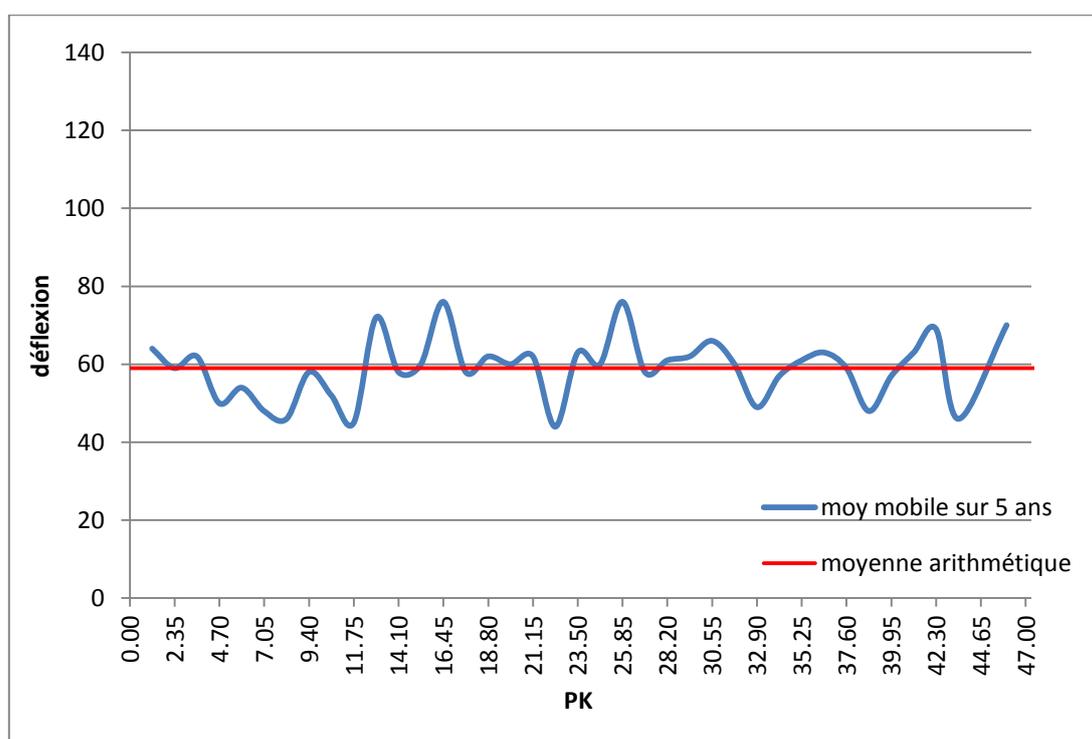
nu= 0,350	0,520m	-93,1 Y-J	-0,028 Y-J	163,6 Z-J	0,048 Z-J
----- collé (z=0,520m) -----					
h= 0,200 m	0,520m	-93,1 Y-J	-0,017 Y-J	182,3 Z-J	0,048 Z-J
E= 320,0 MPa					
nu= 0,350	0,720m	-89,4 Y-J	-0,029 Y-J	137,6 Z-J	0,024 Z-J
----- collé (z=0,720m) -----					
h= 0,250 m	0,720m	-89,4 Y-J	-0,008 Y-J	185,1 Z-J	0,024 Z-J
E= 160,0 MPa					
nu= 0,350	0,970m	-76,5 Y-J	-0,011 Y-J	133,0 Z-J	0,014 Z-J
----- collé (z=0,970m) -----					
h infini	0,970m	-76,5 Y-J	-0,002 Y-J	186,8 Z-J	0,014 Z-J
E= 80,0 MPa					
nu= 0,350					

**Déflexion maximale = 39,1 mm/100 (entre-jumelage)**

**Rayon de courbure = 322,0 m (entre-jumelage)**

## ANNEXE 2 : ANALYSE DES DEFLEXION

PK	déflexion	PK	déflexion	PK	déflexion	PK	déflexion
1.175	64	12.925	72	24.675	60	36.425	63
2.35	59	14.1	58	25.85	76	37.6	59
3.525	62	15.275	60	27.025	58	38.775	48
4.7	50	16.45	76	28.2	61	39.95	57
5.875	54	17.625	58	29.375	62	41.125	63
7.05	48	18.8	62	30.55	66	42.3	69
8.225	46	19.975	60	31.725	60	43.475	46
9.4	58	21.15	62	32.9	49	46	70
10.575	52	22.325	44	34.075	57		
11.75	45	23.5	63	35.25	61		



### ANNEXE 3 : RESULTATS DES ETUDES SUR L'ENTRETIEN

Type d'entretien prévu : + 5cm de BB sur la couche existante (projection à 40 ans)

- entretien après 05 ans :

Trafic écoulé  $NE_1 = 1\ 602\ 821$

Trafic restant  $NE_2 = 19\ 531\ 179$

$NE_{adm1} = 6\ 510\ 580$  (ancienne chaussée)

Dommage subit par la chaussée au moment de l'entretien :  $D_1 = \frac{NE_1}{NE_{adm1}} = 0.246$

Dommage résiduel :  $D_2 = 1 - D_1 = 0.754$

$NE_{adm2} = \frac{NE_2}{D_2} = 25\ 903\ 420 \implies \epsilon t_{adm} = 203.4 \mu\text{déf}$

Avant entretien, on a pour le BB,  $\epsilon t_1 = 38.6 \mu\text{déf}$

Après entretien, on a :  $\epsilon t_2 = 15.1 \mu\text{déf}$

Ce qui donne un dommage  $D_1' = \left(\frac{\epsilon t_1}{\epsilon t_{adm1}}\right)^{1/b} = 0.25$  pour l'année d'entretien

Et un dommage  $D_2' = \left(\frac{\epsilon t_2}{\epsilon t_{adm2}}\right)^{1/b} = 0.087$  après 5 ans

Ce qui fait un dommage totale :  $D' = 0.338$  après 5 ans.

En recommençant l'opération pour après 10, 15, ..., 40 ans, on obtient le tableau suivant :

ANNEE	NE1	NE2	NE adm	$\epsilon t_{adm}$	$D_2'$	$D'$
5	1602821	19531179	25903420	203.4	0.25	0.25
10	3502500	17631500	23383952	174	0.0867816	0.3367816
15	5698900	15435100	20470955	157.8	0.1824724	0.519254
20	8192200	12941800	17164191	146.8	0.2853334	0.8045874
25	10982000	10152000	13464191	138.4	0.3944374	1.1990248
30	14069000	7065000	9370026.5	131.7	0.509092	1.7081168
35	17453000	3681000	4881962.9	126.2	0.6287433	2.3368601
40	21134000	0	0	121.4	0.7531255	3.0899856

- entretien après 10 ans et 15 ans :

En recommençant les mêmes opérations, on obtient :

entretien à 10 ans		entretien à 15 ans	
année	D'	année	D'
<b>10</b>	0.4867816		
<b>15</b>	0.669254	<b>15</b>	0.899254
<b>20</b>	0.9545874	<b>20</b>	1.1845874
<b>25</b>	1.3490248	<b>25</b>	1.5790248
<b>30</b>	1.8581168	<b>30</b>	2.0881168
<b>35</b>	2.4868601	<b>35</b>	2.7168601
<b>40</b>	3.2399856	<b>40</b>	3.4699856

**ANNEXE 4 : TABLEAU DE COMPARAISON DES COUTS**

N° PRIX	DESIGNATION	Unité	Prix Unit	Structure 1		Structure 2		Ecart
				Quantité	Montant	Quantité	Montant	
<b>200</b>	<b>TERRASSEMENTS</b>							
201	Décapage de la terre végétale	m <sup>2</sup>	2632	25436	66947552	25436	66947552	0
202	Purges	m <sup>3</sup>	10528	8400	88435200	8400	88435200	0
203	Déblais et mis en dépôt	m <sup>3</sup>	3948	57571	227290308	117450	463692600	-236402292
204	Déblais mis en remblai	m <sup>3</sup>	4230	5695	24089850	51120	216237600	-192147750
205	Remblais provenant d'emprunt	m <sup>3</sup>	5264	5000	26320000	5000	26320000	0
206	Revêtement des talus en terre végétale et végétalisation	m <sup>2</sup>	1692	46303	78344676	46303	78344676	0
207	Mise en forme, Réglage et compactage de la plate-forme	m <sup>2</sup>	658	174140	114584120	330500	217469000	-102884880
208	Couche de forme	m <sup>3</sup>	6299	39631	249635669	82625	520454875	-270819206
209	Recyclage de la couche de base existante	m <sup>3</sup>	5076	18968	96281568	0	0	96281568
210	Fraisage et remise en dépôt du BB existant	m <sup>3</sup>	21056	3569	75148864	17850	375849600	-300700736
	<b>Sous total Série 200</b>				<b>1047077807</b>		<b>2053751103</b>	<b>- 1006673296</b>
<b>300</b>	<b>CHAUSSEE</b>							
301	Couche de fondation en graveleux latéritiques	m <sup>3</sup>	7050	11480	80934000	66100	466005000	-385071000
302-1	Couche de base en graveleux	m <sup>3</sup>	7482	27677	207079314	48000	359136000	-152056686

	<b>latéritiques</b>							
302-2	Couche de base en grave concassée 0/20	m3	41830	25688	1074529040	84000	3513720000	- 2439190960
303	Imprégnation au bitume fluidifié	m <sup>2</sup>	752	265848	199917696	553000	415856000	-215938304
304	couche d'accrochage au bitume fluidifié	m <sup>2</sup>	423	1003427	424449621	780000	329940000	94509621
305	Grave-bitume 0/14	m3	97760	84843	8294251680	48000	4692480000	3601771680
306	Béton bitumineux 0/10	m3	101520	19517	1981365840	19517	1981365840	0
307	Enduit superficiel bicouche	m <sup>2</sup>	3004	155901	468326604	166315	499610260	-31283656
308	Enduit superficiel monocouche	m <sup>2</sup>	2444	220349	538532956	0	0	538532956
	<b>Sous-total Série 300</b>				13269386751		12258113100	1011273651
	<b>TOTAL GENERAL HTVA</b>				14316464558		14311864203	4600355
	<b>TVA 18%</b>				2576963620		2576135557	828063.9
	<b>DROIT D'ENREGISTREMENT 3%</b>				429493936.7		429355926.1	138010.65
	<b>PATENTE 2%</b>				286329291.2		286237284.1	92007.1
	<b>MONTANT TOTAL TTC HORS PROVISIONS</b>				17609251406		17603592970	5658436.65

## ANNEXE 5 : CALCUL INVERSE DE LA DUREE DE SERVICE POUR CAM=0.8

### Calcul du trafic

$$TC = 365 * TMJA * n * \left( \frac{2 + (n - 1) * i}{2} \right)$$

Avec : TMJA : 428 PL

n : 15 ans

i : 4%

$$\Rightarrow TC = 2\,999\,400 \text{ PL}$$

$$\Rightarrow NE = TC \times CAM ; \text{ avec : } CAM = 0.8$$

$$\Rightarrow NE = 2\,399\,520$$

Toutes ces données sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

	TMJA (PL)	t	Durée de vie (ans)	TC (PL)	CAM	NE
Hypothèse	<b>428</b>	<b>4%</b>	<b>15</b>	<b>2 999 400</b>	<b>0.8</b>	<b>2 399 520</b>

Avec un trafic NE = 2 399 520, on se retrouve dans la fourchette de trafic correspondant à **T3**.

### Calcul des déformations

- Déformation admissible verticale

On a :  $\varepsilon_{zadm} = A \times (NE)^{-0.222}$  avec A = 12000 car NE > 25000

$$\varepsilon_{zadm} = 460.037 \mu\text{déf}$$

- Déformation admissible transversale

On a :  $\varepsilon_{tadm} = \varepsilon_6(10^\circ ; 25 \text{ Hz}) \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ)}{E(40^\circ)}} \times Kc \times Kr \times Ks$  avec :

pour la GB

matériau	$\varepsilon_6(10^\circ ; 25 \text{ Hz})$	E (10°) MPa	E (34°) MPa	-1/b	Kc	1/Ks	R (%)	Kr
GB	90	12300	2020	5	1.3	0.91	10	0.794

Pour la GB :  $\varepsilon_{\text{tadm}} = 174.9 \mu\text{déf}$

- Calcul des déformations sous essieu 13 t

Après modélisation de notre structure de chaussée dans le logiciel Alizé LCPC, les résultats suivant ont été obtenus :

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\Desktop\renforcement.dat, Charge de référence)

renforcement								variante 1 : Durée=00:00sec	
épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT ( $\mu\text{déf}$ )	SigmaT (MPa)	EpsZ ( $\mu\text{déf}$ )	SigmaZ (MPa)	Grandeurs affichées	
0,050	1000,0	0,350	0,000	35,7	0,138	226,8	0,660	<input checked="" type="radio"/> tableau 1	<input type="radio"/> tableau 2
			collé 0,050	38,6	0,153	328,3	0,618	<input type="radio"/> tableau 3	<input type="radio"/> tableau 4
0,120	2020,0	0,350	0,050	38,6	0,289	134,0	0,618	<input type="radio"/> tableau 5	<input type="radio"/> tableau 6
			collé 0,170	-144,6	-0,282	203,7	0,239	<input type="radio"/> tableau 7	<input type="radio"/> tableau 8
0,200	600,0	0,350	0,170	-114,1	-0,049	184,2	0,084		
			collé 0,370	-114,1	-0,017	227,8	0,084		
0,150	400,0	0,350	0,370	-93,1	-0,028	163,6	0,048		
			collé 0,520	-93,1	-0,017	182,3	0,048		
0,200	320,0	0,350	0,520	-89,4	-0,029	137,6	0,024		
			collé 0,720	-89,4	-0,008	185,1	0,024		
0,250	160,0	0,350	0,720	-76,5	-0,011	133,0	0,014		
			collé 0,970	-76,5	-0,002	186,8	0,014		
infini	80,0	0,350	0,970						

Déflexion = 39,1 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 322,0 m

Imprimer Enregistrer

Voir Chargt. Fermer

### Calcul inverse

On obtient ainsi,  $\varepsilon_t = 144.6 \mu\text{déf}$  pour des déformations admissibles  $\varepsilon_{\text{tadm}} = 174.9 \mu\text{déf}$ .

Ceci donne par calcul inverse sur alizé, une durée de vie **N = 31 ans**, soit un accroissement de 15 ans comparé a celle de la chaussée avec un CAM = 1.9

## **ANNEXE 6 : CORRECTION ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU BB**

- Analyse des différents granulats :

Tamis (mm)	Passants (%)			
	0/4	4/6	6/10	Filler
14	100	100	100	100
12.5	100	100	99.9	100
11.2	100	100	99.5	100
10	100	100	93.1	100
8	100	99.9	56.9	100
6.3	99.9	87	16.7	100
5.6	99.7	72.9	8.1	100
4	97.6	18.8	2	100
2	80.8	3.6	0.7	100
1	64.4	1.8	0.4	100
0.5	47.2	1.2	0.3	100
0.25	29.3	0.9	0.2	100
0.125	16.1	0.7	0.2	95
0.08	10.5	0.6	0.2	90
0.063	8.5	0.4	0.1	84

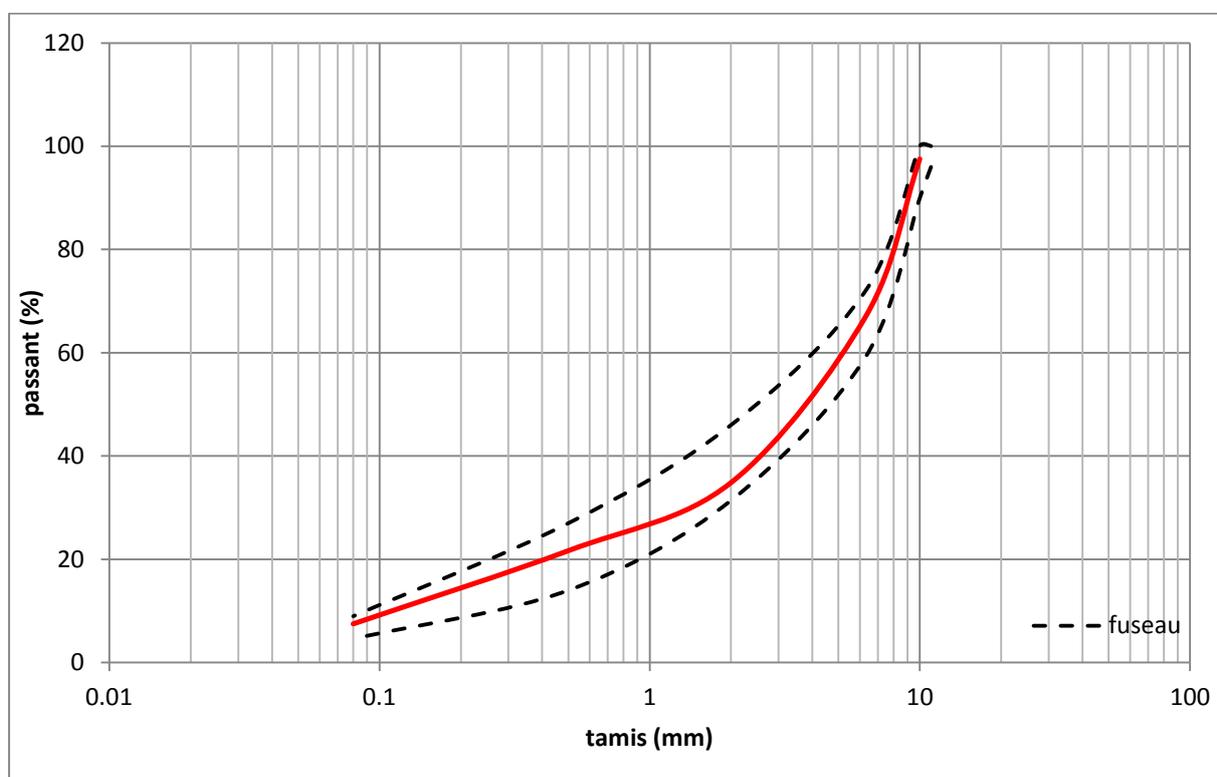
- Correction de la courbe par étude du combiné granulométrique

Tamis (mm)		20	14.00	10.00	6.30	2.00	0.50	0.08	
<b>Spécifications</b>									
<b>Limite supérieur</b>		<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>72.00</b>	<b>46.00</b>	<b>27.00</b>	<b>8.00</b>	
<b>Limite inférieur</b>		<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>95.00</b>	<b>65.00</b>	<b>38.00</b>	<b>20.00</b>	<b>6.00</b>	
<b>Granulométrie visée</b>		<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>97.50</b>	<b>68.50</b>	<b>42.00</b>	<b>23.50</b>	<b>7.00</b>	
<b>Gros granulats</b>		<b>100</b>	<b>89.00</b>	<b>71.00</b>	<b>51.00</b>				
		<b>Correction sur 10 mm</b>							
<b>G1 10/14</b>									
<b>G2 6/10</b>		<b>100</b>	<b>99.90</b>	<b>93.10</b>	<b>16.70</b>	<b>0.70</b>	<b>0.30</b>	<b>0.20</b>	
<b>G3</b>					<b>48.00</b>	<b>36.00</b>	<b>19.00</b>	<b>2.10</b>	
<b>Granulats fins</b>					<b>Correction sur 0.08 mm</b>				
<b>F1 4/6</b>		<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>87.00</b>	<b>3.60</b>	<b>1.20</b>	<b>0.60</b>	
<b>F2 0/4</b>		<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>99.90</b>	<b>80.80</b>	<b>47.20</b>	<b>10.50</b>	
<b>F3</b>									
<b>Granulats très fins</b>									
<b>Filler</b>		<b>100</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	<b>90.00</b>	
	<b>GRANULAT</b>	<b>Calibre</b>	<b>%</b>	<b>Densité</b>					
<b>1</b>		<b>G1</b>							
<b>2</b>		<b>G2</b>	<b>36</b>	<b>2.600</b>	<b>36</b>	<b>35.96</b>	<b>33.52</b>	<b>6.01</b>	<b>0.25</b>
<b>3</b>		<b>G3</b>							
<b>4</b>		<b>G4</b>							
<b>5</b>		<b>F1</b>	<b>23.12</b>	<b>2.600</b>	<b>23.12</b>	<b>23.12</b>	<b>23.12</b>	<b>20.11</b>	<b>0.83</b>
<b>6</b>		<b>F2</b>	<b>37.08</b>	<b>2.620</b>	<b>37.08</b>	<b>37.08</b>	<b>37.08</b>	<b>37.04</b>	<b>29.96</b>
<b>7</b>		<b>F3</b>							
<b>8</b>	<b>TF</b>	<b>3.8</b>	<b>2.700</b>	<b>3.8</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	<b>3.80</b>	
<b>COMBINE GRANULOMETRIQUE</b>		<b>100</b>	<b>99.96</b>	<b>97.52</b>	<b>66.97</b>	<b>34.84</b>	<b>21.69</b>	<b>7.52</b>	

- Formule retenue :

Tamis (mm)	Passant (%)	Fuseau inf	Fuseau sup
20	100	100	100
14	99.96	100	100
10	97.52	95	100
6.3	66.97	65	72
2	34.84	38	46
0.5	21.69	20	27
0.08	7.52	6	8

Cette nouvelle formule donne le graphique suivant :



## ANNEXE 7 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DE LA GB

- Analyse des différents granulats :

Tamis (mm)	Passants (%)			
	0/4	4/6	6/10	10/14
16	100	100	100	100
14	100	100	100	79
12.5	100	100	99.9	48
10	100	100	93.1	42
8	100	99.9	56.9	0.5
6.3	99.9	87	16.7	0.5
4	97.6	18.8	2	0.5
2	80.8	3.6	0.7	0.5
1	64.4	1.8	0.4	0.5
0.5	47.2	1.2	0.3	0.5
0.25	29.3	0.9	0.2	0.5
0.125	16.1	0.7	0.2	0.5
0.08	10.5	0.6	0.2	0.5
0.063	8.5	0.4	0.1	0.5

- Formule retenue :

Tamis (mm)	Passant (%)	Fuseau inf	Fuseau sup	Tamis (mm)	Passant (%)	Fuseau inf	Fuseau sup
16	99.5	100	100	1	21.5		
12.5	91	100	83	0.8	19		
10	79.5	100	71	0.63	17.5		
8	70			0.5	15.5	25	10
6.3	63	79	51	0.4	13		
5	52.5			0.315	11		
4	44.5	65	35	0.25	9.5		
3.15	36.5			0.2	8	15	4
2.5	33			0.16	7		
2	30	45	23	0.125	5.5		
1.6	27			0.1	5		
1.25	24			0.08	4.5	8	3

## ANNEXE 8 : RESULTATS DES ETUDES DE FORMULATION

### POUR LE BB

- Constituant :

Constituants	Dosage (%)
Concassé 6/10	42.2
Concassé 4/6	23.7
Concassé 0/4	24.6
Filler (calcaire bocahut)	3.8
Bitume pur 50/70	5.2

- PCG

Nombre de giration	% Vide	Catégorie
5	21	
10	18	V min11
15	16.1	
20	14.8	
25	13.7	
30	12.8	
40	11.5	
50	10.4	
60	9.6	V min5 Vmax10
80	8.3	
100	7.4	
120	6.6	
150	5.8	
200	4.8	

- Orniérage

Nombre de cycles N	% Orniérage Moyen	Catégorie
30	1.6	
100	2.1	
300	2.5	
1000	2.9	
3000	3.6	
10000	4.7	
30000	6.9	P7.5

### ANNEXE 9 : TABLEAU D'EXECUTION DES ESSAIS DE CONTROLE

▪ Pour le BB :

MATERIAU	NATURE DES ESSAIS		RESULTATS EXIGE	NOMBRE D'ESSAIS
	NOM	PROCESSUS		
<b>Béton bitumineux (étude de formulation)</b>	Compacité LCPC en %		$92 \leq C < 96$	
	Rapport r/R		$> 0.75$	
	Compacité Marshall		$< 97$	
<b>Béton bitumineux (fabrication)</b>	Température de stockage du liant	Thermomètre	145 à 155° C	au gré de l'ingénieur
	Analyse granulométrique par tamisage	NF P 18-560	respect de la courbe de formulation	2 analyses par jour
	Teneur en eau des granulats à la sortie du sécheur	NF P 18-555	$w < 1\%$	
	Température du BB à la sortie du malaxeur	Thermomètre	fabrication entre 145/165 °C	
	Essai Marshall	LCPC	respect des valeurs obtenues lors de l'étude de formulation	
	Teneur en liant du BB	LCPC Rec. 2/3 XP T 66-041	respect du module de richesse résultant de l'étude (considéré comme valeur plancher)	
<b>couche d'accrochage</b>	Dosage du liant	Pesée de plaquettes NF P 98-275-1	250 à 300 g/m <sup>2</sup> (bitume résiduel) à $\pm 0.1$ kg/m <sup>2</sup>	1 tous les 1500 m <sup>2</sup>
<b>Béton bitumineux (mise en œuvre)</b>	Vérification matériel	Inspection visuelle	propreté des bennes de camions, du finisseur, des compacteurs	au gré de l'ingénieur

Température du BB derrière finisseur	Thermomètre	140 à 160 °C	
Compacité en place	Gamma densimètre NF P 98-241-1	$92\% \leq 100\%$ des mesures $\leq 96\%$	1 carotte tous les 50 m côté G-A-D
Compacité sur carotte	LCPC	$92\% \leq 100\%$ des mesures $\leq 96\%$	
Réglage	Nivellement de précision	+ 1 cm et - 0.5 cm par rapport à la largeur théorique	à chaque profil en travers (trois points min)
Surfaçage	Règle de 3 m NF P 98-218-1	flèche maximale 1 cm	à chaque profil en travers
Largeur	Chaine	entre 0 et 5 cm par rapport à la largeur théorique	
Dévers	Règle	$\pm 0.5 \%$	
Épaisseur	Carottage	contrôle direct supérieur à l'épaisseur prescrite - 0.5 cm	1 carotte tous les 50 m côté G-A-D
Déflexion	Poutre de Benkelman NF P 98-200-2	valeur informative sur portance chaussée finie	1 mesure tous les 50 en quinconce

▪ Pour la GB :

MATERIAU	NATURE DES ESSAIS		RESULTATS EXIGE	NOMBRE D'ESSAIS
	NOM	PROCESSUS		
<b>Grave bitume 0/14 (étude de formulation)</b>	Compacité LCPC en %		> 89%	
	Rapport r/R		> 0.65	
<b>Grave bitume (fabrication)</b>	Température de stockage du liant	Thermomètre	145 à 155° C	au gré de l'ingénieur
	Analyse granulométrique par tamisage	NF P 18-560	respect de la courbe de formulation	2 analyses par jour
	Teneur en eau des granulats à la sortie du sécheur	NF P 18-555	w < 1%	
	Température du GB à la sortie du malaxeur	Thermomètre	fabrication entre 150/170 °C	
	Essai Marshall	LCPC	respect des valeurs obtenues lors de l'étude de formulation	
	Teneur en liant du GB	LCPC Rec. 2/3 XP T 66-041	respect du module de richesse résultant de l'étude (considéré comme valeur plancher)	
<b>couche d'accrochage</b>	Dosage du liant	Pesée de plaquettes NF P 98-275-1	350 à 400 g/m <sup>2</sup> (bitume résiduel) à ± 0.1 kg/m <sup>2</sup>	1 tous les 1500 m <sup>2</sup>
<b>Grave bitume (mise en œuvre)</b>	Vérification matériel	Inspection visuelle	propreté des bennes de camions, du finisseur, des compacteurs	au gré de l'ingénieur
	Température du GB derrière finisseur	Thermomètre	Optimale de 140 à 150 °C (Tmin=130° C)	
	Compacité en place	Gamma densimètre NF P 98-241-1	100% des mesures > 89%	1 carotte tous les 50 m côté G-A-D
	Compacité sur carotte	LCPC	100% des mesures > 89%	

	Réglage	Nivellement de précision	+ 1 cm et - 0.5 cm par rapport à la largeur théorique	à chaque profil en travers (trois points min)
	Surfaçage	Règle de 3 m NF P 98-218-1	flèche maximale 1 cm	à chaque profil en travers
	Largeur	Chaine	entre 0 et 5 cm par rapport à la largeur théorique	
	Dévers	Règle	± 0.5 %	
	Épaisseur	Carottage	contrôle direct supérieur à l'épaisseur prescrite - 0.5 cm	1 carotte tous les 50 m côté G-A-D
	Déflexion	Poutre de Benkelman NF P 98-200-2	Calcul de dm, vérification compatibilité avec la résistance à la traction admissible à la base de la GB	1 mesure tous les 50 en quinconce

## ANNEXE 10 : CALIBRAGE DE L'OUVERTURE DES TREMIES

▪ **Données :**

- Capacité de la centrale = 100 tonnes/h
- Vitesse des courroies d'alimentation = 20 révolutions/minute
- Débit des trémies selon l'ouverture :

Hauteur des portes (cm)	Trémie N°	Masse Totale (Kg)	Masse du récipient (Kg)	Masse Nette (Kg)	nombre de révolution /mn	Masse par révolution (Kg)
<b>4</b>	1	76.6	15.1	61.5	3.4	18.1
	2	55.4	14.9	40.5		11.9
	3	49.8	14.8	35		10.3
	4	48.5	14.8	33.7		9.9
	5	42.3	15.1	27.2		8.0
<b>8</b>	1	148.9	15.1	133.8	2.8	47.8
	2	124.4	14.9	109.5		39.1
	3	115.3	14.8	100.5		35.9
	4	99.1	14.8	84.3		30.1
	5	89	15.1	73.9		26.4
<b>12</b>	1	186.3	15.1	171.2	2.2	77.8
	2	155.7	14.9	140.8		64.0
	3	138.4	14.8	123.6		56.2
	4	120.6	14.8	105.8		48.1
	5	110.1	15.1	95		43.2
<b>16</b>	1	193.9	15.1	178.8	1.7	105.2
	2	178.6	14.9	163.7		96.3
	3	143	14.8	128.2		75.4
	4	126.8	14.8	112		65.9
	5	112.7	15.1	97.6		57.4
<b>20</b>	1	154.6	15.1	139.5	1.4	126.8
	2	129.4	14.9	114.5		104.1
	3	118.1	14.8	103.3		93.9
	4	105.7	14.8	90.9		82.6
	5	91.9	15.1	76.8		69.8

▪ Quantité formulé :

	10/14	6/10	4/6	0/4	Filler	Bitume
<b>GB</b>	42	18	20	20	-	4.39
<b>BB</b>	-	42.2	23.7	24.6	3.8	5.3

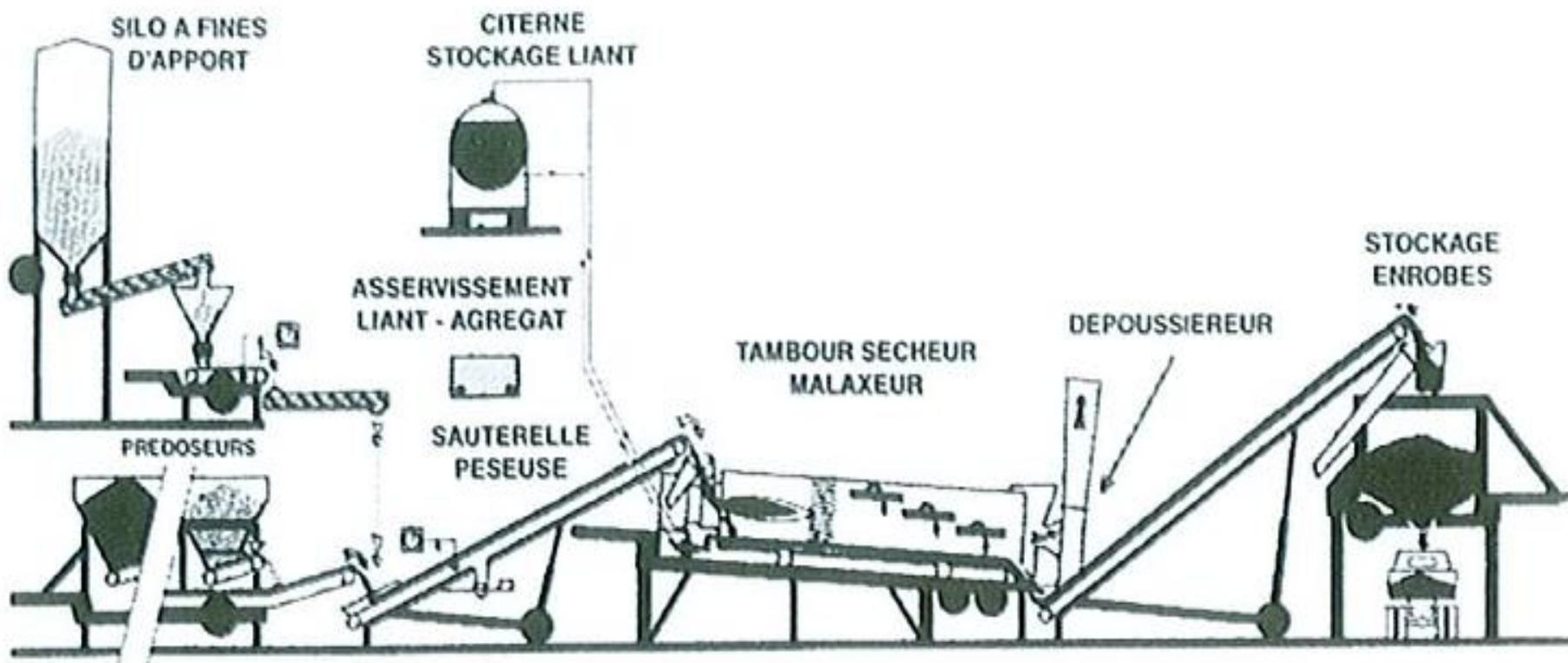
▪ Calcul des différentes masses :

Masse (Kg/rév)	GB	BB
<b>Totale</b>	79.68	78.92
<b>10/14</b>	33.46	-
<b>6/10</b>	14.34	33.30
<b>4/6</b>	15.94	18.70
<b>0/4</b>	15.94	19.41
<b>Bitume (Kg/mn)</b>	73.17	88.33

▪ Calibrage :

	Trémie 1 (cm)	Trémie 2 (cm)	Trémie 3 (cm)	Trémie 4 (cm)	Débit bitume (l/min)
<b>GB</b>	3.54	4.61	4.65	8.78	78.33
<b>BB</b>	4.18	5.00	7.60	-	94.56

## ANNEXE 11 : SCHEMA DE LA CENTRALE D'ENROBAGE



## **ANNEXE 12 : DEFINITION DES DIFFERENTS ESSAIS**

### ▪ **Analyse granulométrique**

La granulométrie est la distribution dimensionnelle d'un matériau donné. La méthode utilisée est celle par tamisage à sec après lavage de la norme française NF P 94-056.

#### ▪ Principe

L'essai consiste à tamiser au moyen d'une série de tamis normalisés à mailles carrées, un échantillon représentatif d'un matériau donné. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

#### ▪ Mode opératoire

L'échantillon soumis à l'essai est préalablement séché à l'étuve pendant au moins quatre heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Il est ensuite lavé au tamis de  $80\mu\text{m}$ , qui représente le plus petit diamètre des tamis. Le lavage est repris plusieurs fois, jusqu'à ce que l'eau de lavage devienne claire. Ensuite le matériau humide est remis à l'étuve pour séchage pendant au moins vingt quatre heures à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Après cela, le matériau sec est pesé à l'aide d'une balance, afin d'obtenir la masse de l'échantillon sec notée  $M_s$ . Le matériau est versé dans une colonne de tamis constituée par l'emboîtement de tamis à mailles carrées, classés de haut en bas dans l'ordre de maille décroissante. Cette colonne est agitée manuellement ou mécaniquement, puis les tamis sont repris un à un en commençant par celui qui a le plus grand diamètre. Le refus des tamis est pesé de façon cumulée, en commençant par celui ayant le plus grand diamètre.

### ▪ **Los Angeles (LA)**

#### ▪ Principe

Le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques. Il fait l'objet de la norme française NF P 18- 573. Le coefficient Los Angeles est calculé à partir du passant au tamis de  $1,63\text{mm}$ , mesuré en fin d'essai.

#### ▪ Exécution de l'essai

En fonction de la classe granulaire du matériau, on fait le choix d'une classe granulaire comprise dans la classe du matériau. On tamise le matériau entre les tamis correspondant à la classe granulaire choisie, et on prélève exactement une masse  $A = 5000$  g de cette classe pour l'exécution de l'essai. En fonction de la classe granulaire choisie, un abaque donne le nombre de billes normalisées à utiliser pour l'essai. Introduire le matériau et les billes dans l'appareil. Après 500 tours soit 15mn on arrête l'appareil et on retire le matériau. Celui-ci est tamisé au tamis de 1,63mm, lavé, étuvé puis pesé. Soit B la masse du refus au tamis de 1,63mm.

- Expression des résultats

Le coefficient de Los Angeles exprimé en pourcentage est obtenu par la formule suivante :

$$LA = \frac{A-B}{A} \times 100$$

- **Equivalent de Sable (ES)**

- Principe

La propreté superficielle est le coefficient pondéral de particules inférieures à 0,5 mm contenues dans un échantillon de matériau. Il s'agit donc, pour ce qui est du principe de l'essai, de séparer par lavage sur tamis de 0,5mm les particules inférieures à cette dimension. La norme de référence est la norme française NF P18-591.

- Exécution de l'essai

Une masse d'échantillon d'environ 5 à 7 kg est prélevée. Cette masse est pesée au gramme près. On prépare deux échantillons à partir de l'échantillon pour laboratoire. Les deux échantillons sont pesés au gramme près, et on obtient respectivement M1h pour le premier échantillon et Mh pour le deuxième. Le premier échantillon est séché à l'étuve à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante au gramme près. On le pèse et on obtient une masse sèche M1s. Il est ensuite lavé au tamis de 0,5mm, puis on sèche le refus à l'étuve à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante au gramme près. On tamise le refus séché au tamis de 0,5mm pendant une minute environ, et on le pèse pour obtenir une masse sèche m' du refus.

- Expression des résultats

On calcule d'abord la masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai Ms à partir de la

formule suivante :  $Ms(g) = Mh \times \frac{M1s}{M1h}$

Ensuite, on calcule la masse sèche  $m$  des éléments inférieurs à 0,5mm par la formule  $m(g) = M_s - m'$ . La propreté superficielle  $P$  est donnée par la relation suivante :

$$P = 100 \times \frac{m}{M_s}$$

### ▪ Coefficient d'Aplatissement (CA)

#### ▪ Principe

Le coefficient d'aplatissement caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur. L'essai consiste à effectuer un double tamisage effectué selon la norme française NF P 18-561:

- ✓ Tamisage par voie sèche sur tamis à mailles carrées pour la détermination des classes granulaires du matériau à travers l'échantillon représentatif
- ✓ Tamisage des différentes classes granulaires sur grilles à fentes parallèles normalisées.

#### ▪ Exécution de l'essai

On prélève un échantillon représentatif dont la masse est d'environ 5 à 7 kg. L'échantillon est lavé et séché à l'étuve à  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  pendant au moins 4 h. il est ensuite écrêté au tamis à mailles carrées de 4mm puis pesé au gramme près avant le début de l'essai. Le premier s'effectue sur colonne de tamis à mailles carrées et on pèse chaque classe granulaire séparément. On procède au tamisage sur grille en fonction de la classe granulaire correspondante, puis on pèse au gramme près le passant sur la grille correspondant à chaque classe granulaire.

#### ▪ Expressions des résultats

Le coefficient d'aplatissement est calculé pour chaque classe granulaire selon la formule :  
 $A_{\text{classe}} = 100 \times \frac{M_e}{M_g}$ , avec  $M_e$ , la masse de chaque classe granulaire et  $M_g$ , la masse du refus au tamis à mailles carrées de 4 mm pour chaque classe granulaire. Le coefficient d'aplatissement global  $A$  est calculé à partir de la formule :  $A = 100 \times \frac{\sum M_e}{\sum M_g}$ , avec  $\sum M_e$ , la masse totale de toutes les classes granulaires et  $\sum M_g$ , la masse totale du refus au tamis à mailles carrées de 4 mm.

- **L'essai de pénétration (EN 1426)**

Cet essai détermine l'enfoncement d'une aiguille normalisée de 1 mm de diamètre sur un échantillon de bitume maintenu à 25 °C sous une charge de 100 g appliquée pendant 5 secondes. Cet essai est exprimé en dixièmes de millimètre. Plus le bitume est mou plus la valeur absolue de la pénétrabilité est grande. Les bitumes sont définis par leur classe de pénétrabilité qui correspond à sa borne inférieure et à sa borne supérieure. (Exemple : 20/30 – 35/50 – 50/70 – 70/100 – 160/220)

Il est possible de tracer l'évolution de la pénétrabilité en fonction de la température et de calculer un indice de pénétrabilité très utile pour apprécier la susceptibilité thermique du bitume en faisant varier la température mais en gardant tous les autres paramètres.

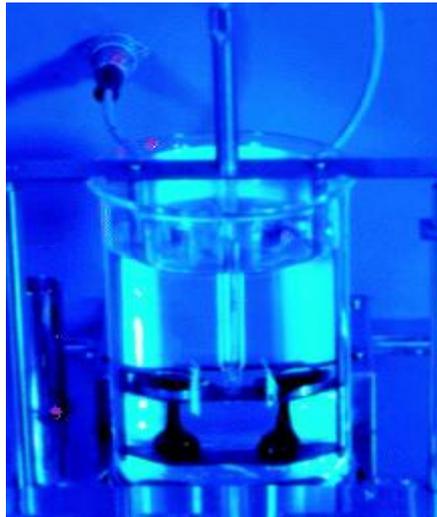


- **Point de ramollissement bille et anneau (EN 1427)**

Cet essai consiste à donner une indication de la température à laquelle le bitume acquiert une plasticité donnée. Les bitumes ne sont pas des corps purs et n'ont pas de point de fusion franc et leur consistance évolue avec la température. C'est pourquoi, pour chaque classe de bitume, un intervalle de TBA de 8 °C est imposé, c'est le repère de changement de consistance des bitumes dans des conditions parfaitement définies. Une petite bille en acier de 3,5 g et de 9,5 mm de diamètre est posée sur un disque de bitume préalablement coulé dans un anneau de 19,8 mm de diamètre intérieur, lui-même placé sur un support normalisé. Le tout est installé dans un bain d'eau dont la température initiale et stabilisée est de 5 °C. La face inférieure de l'anneau de bitume se trouve à 25,4 mm de la surface supérieure de la plaque du dessous du

support, ce qui correspond à la distance de chute de la bille au cours de l'essai. Le bain est chauffé à une vitesse constante de 5 °C/min, sous agitation. Le point de ramollissement bille et anneau (souvent noté TBA) est la température à laquelle la poche de bitume, formée pendant la chute de la bille, touche la plaque de référence.

Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur.

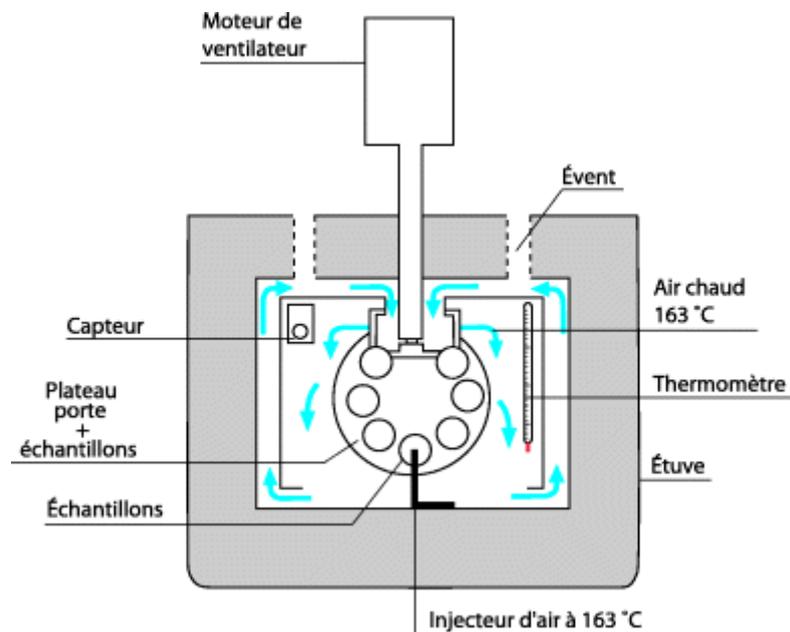


- **Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air (EN 12607-1)**

Le RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) est un essai d'une durée de 75 minutes qui permet de mesurer les effets combinés de la chaleur et de l'air sur un mince film de bitume qui est continuellement renouvelé.

On coule une petite quantité de bitume dans un flacon à ouverture réduite placé horizontalement sur un disque rotatif disposé verticalement au fond d'une étuve ventilée. La température est réglée à 163 °C et à chaque tour (c.à.d. toutes les 4 secondes), l'ouverture du flacon passe devant un jet d'air chaud.

Le point de rupture selon FRASS donne une indication sur le comportement du bitume à basse température.



## XI. DETERMINATION DE LA TENEUR EN BITUME :

Cet essai consiste à déterminer le pourcentage de bitume d'un enrobé selon la teneur en liant de la formulation retenue au laboratoire. Cette procédure s'applique dans le laboratoire sur un matériau d'origine naturelle, dans le domaine des routes.

### **Appareillage :**

- Centrifugeuse + filtre.
- Solvant.
- Série de tamis (0/20 GB ou 0/14 BB)
- Divers accessoires : spatule, plateau métallique, paire de gant, petite pelle

- Balance + étuve.

### Mode opératoire :

- Procéder à un prélèvement au niveau de la station d'enrobé ou après épandage.
- passer l'échantillon à l'étuve à 150°C pendant 1h environs.
- Homogénéiser le matériau et faire un quartage.
- Peser le matériau enrobé puis l'introduire dans la centrifugeuse en ajoutant du solvant.
- Centrifuger jusqu'à obtention d'une couleur claire de solvant.
- Sécher le matériau désenrobé et peser.
- La différence de pesée donne le poids du liant.
- Laver le matériau désenrobé au tamis 0.080mm puis sécher.
- Faire une analyse granulométrique suivant la norme N.F.P 18-560.

### Expression des résultats :

La teneur en liant est donnée par la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = \frac{\text{poids du liant}}{\text{poids du matériau désenrobé}} \times 100$$

## ANNEXE 13 : METHODE THEORIQUE DE PREDICTION DE L'ORNIERAGE

Pour appliquer cette nouvelle procédure de prédiction il faut passer par les cinq étapes décrites ci-dessous.

- Etape 1 :

Faire un essai d'orniérage à l'aide de l'orniéreur LPC du matériau et destiné à être mis en place (ou déjà en place), puis déterminer les coefficients expérimentaux  $\alpha$  et  $\beta$ .

- Etape 2 :

Déterminer la charge de trafic équivalent total  $W$ , exprimé en essieux équivalents [ESAL], prévue durant toute la période de service du tronçon de chaussée considéré. Une fois que la charge de trafic total est calculée, il faut l'intégrer dans l'équation d'orniérage en faisant intervenir un coefficient de trafic  $C_w$  dont la valeur est constante :

$$C_w = 5.102 \times 10^{-3}$$

- Etape 3 :

Déterminer la vitesse effective moyenne des véhicules lourds (>3.5t) prévue sur le tronçon de chaussée considéré. La vitesse doit être liée à l'équation d'orniérage en introduisant un coefficient de vitesse  $C_v$  variable en fonction de la vitesse. Lorsque la vitesse moyenne est connue ou estimée, et pour connaître la valeur de  $C_v$ , on introduit dans l'équation :

$$C_v = 5 \times 10^5 \times V^{-2.5177}$$

- Etape 4 :

Déterminer la température maximale pour une période de retour de 20 ans ou la température des 4 jours les plus chauds issus des mesures des stations environnantes. Pour lier la température à l'équation d'orniérage, il faut calculer un coefficient pour la température  $C_\theta$ , variable en fonction de la température. Il est égal à :

$$C_\theta = e^{\frac{\theta - 50}{10.80}}$$

- Etape 5 :

Prédire l'orniérage à l'aide de la formule :  $T = C_\theta \times \alpha \times \left( \frac{C_w \times W}{1000 \times C_v} \right)^\beta + \delta$