

REPUBLIQUE DU SENEGAL  
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC.0057

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE  
CENTRE de THIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

**Titre : PROBLEMATIQUE DU CHOIX DU MODULE DES  
MATERIAUX RECYCLES DANS LE DIMENSIONNEMENT PAR LA  
METHODE RATIONNELLE : APPLICATION AU TRONÇON  
DIAMNIADIO-MBOUR**

Préparé et soutenu par :

Nourou-Dine IMAM  
Elève ingénieur en Génie Civil

Directeur interne :  
M. Ibrahima Khalil CISSE

Directeur externe :  
M. SEIDOU Zoulkaneini

Année académique 2002-2003

## DEDICACES

A Sourakatou IMAM et Rabi SOUMANOU,

Chers parents, pour toutes vos peines et vos sacrifices, recevez ce travail en signe de ma profonde reconnaissance. Vos conseils m'ont été profitables.

A ma sœur et à mes frères.

A la mémoire de Rafiou.

A mon épouse.

## REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord exprimer ma reconnaissance à mon Directeur interne, Monsieur Ibrahima Khalil CISSE, Professeur titulaire au département de Génie Civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique ma sincère reconnaissance pour sa disponibilité et pour la peine qu'il s'est donnée de nous encadrer et nous suivre tout au long de ce travail.

Je remercie également toutes les personnes ressources qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet et particulièrement mon Directeur externe, Monsieur Zoukaneini SEIDOU, chef de mission adjoint de la mission de contrôle du projet Diamniadio-Mbour pour sa disponibilité et son apport intellectuel ainsi que Monsieur Meissa FALL, Professeur à l'Institut des Sciences de la Terre pour ses précieux conseils et contributions. J'en profite pour remercier également le chef de mission de contrôle, Monsieur Jean de Dieu RAKOTONDRAZAFY ainsi que tout le personnel de la mission de contrôle à Mbour.

Ma gratitude va également à tous nos formateurs et plus particulièrement à tous les professeurs du département de Génie Civil de l'Ecole Supérieure Polytechnique pour la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont donné ainsi qu'à tout le personnel du Laboratoire de Mécanique des Sols de l'école sans qui la réalisation des essais n'aurait pas été facile ; il s'agit de MM. Lamine LO, Djiby SOW, Madiaw GUEYE, Cheikh SARR, Ngary...

Je remercie enfin MM Gualbert FADEGNON et Mohamed YAYA, tous deux cadres au Ministère des Travaux Publics en République du Bénin, pour m'avoir proposé le sujet et fournis de précieuses informations utiles à son étude.

## SOMMAIRE

Au Sénégal comme dans la plupart des pays tropicaux, les assises des chaussées se construisent avec la latérite crue ou améliorée au ciment. Face à la raréfaction de ce matériau, la nouvelle tendance est de recycler les matériaux en place pour le renforcement ou la construction des nouvelles structures de chaussée.

La présente étude s'intéresse à la détermination du module d'élasticité du matériau recyclé grâce à une relation du type  $E = f(\text{CBR})$ . Le module en question a été déterminé par l'essai de compression uniaxiale réalisé sur des éprouvettes préalablement compactées dans les mêmes conditions que l'essai Proctor modifié, et le CBR par la méthode classique.

Les résultats ainsi obtenus ont permis l'établissement d'une corrélation entre les deux paramètres.

Ces résultats ont également servi au dimensionnement du tronçon routier Diamniadio-Mbour en faisant varier les modules des différentes couches. Au total, quatre cas de figure ont été examinés et les résultats des simulations ont permis de tirer des conclusions sur l'influence du module d'élasticité.

---

## TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
SOMMAIRE.....	III
TABLE DES MATIERES.....	IV
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES PHOTOS.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES ABREVIATIONS.....	VI
INTRODUCTION.....	1
1 <sup>ERE</sup> PARTIE : NOTIONS GENERALES.....	3
CHAPITRE 1 : LE RECYCLAGE DES MATERIAUX ROUTIERS.....	4
I- DEFINITION ET AVANTAGES.....	4
II- DIFFERENTES TECHNIQUES DE RECYCLAGE.....	4
II-1- LE RECYCLAGE DES COUCHES BITUMINEUSES DANS DE NOUVELLES COUCHES BITUMINEUSES.....	5
II-2- RECYCLAGE DES COUCHES BITUMINEUSES DANS LES COUCHES DE BASE.....	5
II-3 RECYCLAGE DES MATERIAUX DE BASE NON TRAITES.....	6
III- EXEMPLES PRATIQUES.....	7
III-1 TECHNIQUE DE RECYCLAGE APPLIQUEE EN REPUBLIQUE DU BENIN.....	7
III-2 TECHNIQUE UTILISEE SUR LE CHANTIER DIAMNIADIO-MBOUR (SENEGAL).....	8
CHAPITRE II : METHODES ET TECHNIQUES DE DIMENSIONNEMENT ROUTIER.....	12
I- LES METHODES EMPIRIQUES.....	12
I-1 LA METHODE CBR.....	12
I-2 LA METHODE DU TRRL.....	12
I-3 LA METHODE DU CEBTP.....	13
II- LES METHODES RATIONNELLES.....	14
CHAPITRE III : ETUDE THEORIQUE DU MODULE D'ELASTICITE E ET DE L'INDICE CBR D'UN MATERIAU.....	17
I- ELASTICITE ET MODULE D'ELASTICITE.....	17
I-1 HISTORIQUE.....	17
I-2 IMPORTANCE DU MODULE D'ELASTICITE E EN CONSTRUCTION ROUTIERE.....	18
I-3 NOTION DE MODULE D'ELASTICITE STATIQUE ET DE MODULE D'ELASTICITE DYNAMIQUE.....	18
I-4 DETERMINATION DU MODULE E DES MATERIAUX EN MECANIQUE DES SOLS.....	19
I-4-1 L'essai de compression simple.....	19
I-4-2 L'essai de plaque.....	20
II- L'INDICE CBR.....	22

---

<b>III- RECAPITULATIF DES ETUDES DE CORRELATION DU MODULE D'ELASTICITE E.....</b>	<b>22</b>
2 <sup>EME</sup> PARTIE : PHASE EXPERIMENTALE.....	25
<b>CHAPITRE I : IDENTIFICATION DU MATERIAU RECYCLE .....</b>	<b>26</b>
I- L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE .....	26
II- LES LIMITES D'ATTERBERG.....	27
III- L'ESSAI PROCTOR MODIFIE.....	28
IV- L'ESSAI CBR .....	29
<b>CHAPITRE II : EXPERIMENTATION ET ETABLISSEMENT DES CORRELATIONS.....</b>	<b>31</b>
I- ESSAIS EN LABORATOIRE .....	31
I-1- ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE AVEC DETERMINATION DU MODULE ELASTIQUE	31
I-1-1- Dispositif de l'essai de compression simple avec détermination de module.	31
I-1-2- Présentation des résultats .....	32
I-1-3- Résistances à la compression.....	33
I-1-4- Module d'Young.....	34
I-2- ETABLISSEMENT DES CORRELATIONS .....	35
I-3 COMPARAISON DE LA RELATION TROUVEE AVEC CELLES PROPOSEES PAR LES ETUDES ANTERIEURES.....	36
<b>CHAPITRE III : APPLICATION DU DIMENSIONNEMENT AU TRONÇON ROUTIER DIAMNIADIO-MBOUR.....</b>	<b>38</b>
I- PRESENTATION DU PROJET DIAMNIADIO-MBOUR .....	38
II- DIMENSIONNEMENT DE LA CHAUSSEE .....	39
II-1 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX.....	39
II-2 CALCUL DES LIMITES ADMISSIBLES .....	40
II-3. - VERIFICATION DU DIMENSIONNEMENT .....	42
II-4- ANALYSE DES RESULTATS .....	43
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>45</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>47</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXE N°1 :.....</b>	<b>49</b>
ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT PAR LA METHODE CBR .....	49
<b>ANNEXE N°2 : .....</b>	<b>51</b>
DIMENSIONS DU CORPS DE CHAUSSEE SELON LA METHODE DU CEBTP ...	51
<b>ANNEXE N°3 :.....</b>	<b>53</b>
COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION.....	53
<b>ANNEXE N°4 :.....</b>	<b>59</b>
CALCUL DES LIMITES ADMISSIBLES.....	59

## LISTE DES FIGURES

FIG N°1. - SCHEMATISATION DES CHARGES .....	15
FIG N°2 : ESSAI DE TRACTION SUR UNE TIGE D'ACIER .....	17
FIG N°3 RELATION CONTRAINTE-DEFORMATION DONNANT LE MODULE E D'UN MATERIAU	19
FIG N°4 : DIAGRAMME DE CHARGEMENT DE L'ESSAI A LA PLAQUE.....	20
FIG N°5 COURBES GRANULOMETRIQUES AVANT ET APRES CBR.....	26
FIG N°6 LIMITES DE LIQUIDITE DU MATERIAU RECYCLE.....	28
FIG N°7 ESSAI PROCTOR MODIFIE .....	29
FIG. N°8. - DIAGRAMME POUR LA CORRECTION DES VALEURS DE CONTRAINTE.....	33
FIG N°9 - ALLURE GENERALE DES COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION.....	34
FIG N°10 -- RELATION ENTRE $E_{DYN}$ ET CBR AVEC UNE REGRESSION LINEAIRE.....	35
FIG N°11. – RELATION ENTRE $E_{DYN}$ ET CBR AVEC UNE REGRESSION EXPONENTIELLE.....	36

## LISTE DES PHOTOS

PHOTO N°1 : PREPARATION DE LA PARTIE DE L'ACCOTEMENT DEVANT SERVIR A L'ELARGISSEMENT.....	9
PHOTO N°2 : MISE EN ŒUVRE DE LA LA'ERITE CRUE D'APPORT .....	9
PHOTO N°3 : DECOHESION DES MATERIAUX DU REVETEMENT ET DE LA COUCHE DE BASE AVEC LA RECYCLEUSE RR 250 (PULVIMIXER).....	10
PHOTO N°4 : MELANGE ET REGLAGE A L'AIDE DE LA NIVELEUSE.....	10
PHOTO N° 5 : ARROSAGE DU MELANGE HOMOGENEISE .....	11
PHOTO N°6 : COMPACTAGE DE L'ENSEMBLE.....	11
PHOTO N° 7. - DISPOSITIF DE L'ESSAI DE COMPRESSION AVEC DETERMINATION DU MODULE ELASTIQUE.....	32

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU N°1 : CLASSE DE TRAFIC DU CEBTP .....	13
TABLEAU N°2 : CLASSE DE PORTANCE DU CEBTP .....	14
TABLEAU N°3 : CLASSE DES SOLS SELON LEUR MODULE .....	21
TABLEAU N°4 CLASSIFICATION DES SOLS EN FONCTION DE LEUR INDICE DE PLASTICITE ....	27
TABLEAU N°5 . - RECAPITULATIF DES VALEURS DE RESISTANCES A LA COMPRESSION .....	34
TABLEAU N°6 VALEURS OBTENUES AVEC LES DIFFERENTES RELATIONS .....	37
TABLEAU N°7 : RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT DES DIFFERENTES STRUCTURES.....	43

## LISTE DES ABREVIATIONS

CEBTP : Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics

TRRL : Transport and Road Research Laboratory

ESP : Ecole Supérieure Polytechnique

## INTRODUCTION

La route est un moyen de communication et d'échanges qui sert d'appui aux moyens de transport par voie terrestre. Le niveau d'aménagement du réseau routier d'un pays est souvent le reflet de son niveau de développement économique. Il situe son poids dans son environnement régional.

Le maintien dans un bon état de praticabilité du réseau routier apparaît alors comme une nécessité pour toute communauté qui ambitionne de se positionner sur l'orbite du développement durable. Dans ces conditions, les investissements consacrés pour la construction des routes doivent être rentabilisés et en adéquation avec une politique rationnelle d'entretien et surtout de suivi du réseau.

Il nous a été donné de constater qu'en Afrique Occidentale d'expression française, la durée de vie de la plupart des routes nouvellement construites varie de 15 à 20 ans au maximum. Vu l'étendue des réseaux, il arrive une période où les seuils critiques de dégradation nécessitant des renforcements de la structure existante s'observent à des dates très rapprochées. Si le renforcement de ce réseau est une conditionnalité des bailleurs de fonds pour la mobilisation de nouvelles ressources, il se pose cependant un problème au niveau du dimensionnement de la nouvelle structure.

En effet, dans le contexte actuel où les ressources en matériaux s'amenuisent progressivement et où la notion de développement durable devient plus préoccupante que jamais, la technique de recyclage des couches des chaussées existantes est de plus en plus utilisée pour le renforcement de ces dernières. Dans ce cas, le choix des paramètres, particulièrement le module de déformation élastique de la nouvelle couche recyclée -souvent couche de base + revêtement- est déterminant dans la durée de vie de la route. Les méthodes de dimensionnement souvent utilisées pour ces types de renforcement sont des programmes tels que ECOROUTE et ALIZE. Ces programmes utilisent la méthode de dimensionnement rationnelle qui permet de comparer les performances du matériau aux sollicitations du trafic. Elle s'appuie essentiellement sur les paramètres d'élasticité (module de Young et coefficient de Poisson) des matériaux.

Le choix des modules des anciennes chaussées recyclées où le revêtement est en béton bitumineux est difficile à l'étape actuelle des études parce que l'ancienne couche de base et le revêtement sont deux matériaux complètement différents alors que dans la structure



renforcée et actualisée, les deux forment un mélange homogénéisé qui est considéré soit comme une couche de fondation, soit comme une couche de base.

C'est pour cela que nous avons voulu nous pencher sur le cas d'une route actuellement en chantier de renforcement avec recyclage des matériaux au Sénégal pour mettre en exergue l'importance du choix du module d'élasticité dans le dimensionnement.

L'objectif visé est de déterminer une corrélation entre le module E et l'indice portant californien CBR que nous allons comparer aux relations traditionnellement utilisées jusqu'ici. Sur la base des résultats obtenus, nous essayerons de proposer un dimensionnement pour la route Diamniadio-Mbour en cours d'exécution. Nous procéderons enfin au dimensionnement de la même route pour d'autres valeurs du module d'élasticité et nous ferons une étude comparative avec la solution proposée et nous tirerons les conséquences qui s'imposent.

Dans la première partie, nous aborderons les notions générales en examinant successivement le recyclage des matériaux, les techniques de dimensionnement routier et l'étude théorique du module d'élasticité ainsi que du CBR. Quant à la deuxième partie, elle traite de l'expérimentation et du dimensionnement.

Nous terminerons par la conclusion générale suivie de recommandations.

## 1<sup>ERE</sup> PARTIE : NOTIONS GENERALES

CHAPITRE I : LE RECYCLAGE DES MATERIAUX ROUTIERS

CHAPITRE II : METHODES ET TECHNIQUES DE DIMENSIONNEMENT  
ROUTIER

CHAPITRE III : ETUDE THEORIQUE DU MODULE D'ELASTICITE E ET DE  
L'INDICE CBR D'UN MATERIAU

## **CHAPITRE 1 : LE RECYCLAGE DES MATERIAUX ROUTIERS**

### **I- DEFINITION ET AVANTAGES**

Le recyclage est une technique qui consiste à réutiliser les matériaux (par transformation ou par amélioration) d'une structure dans de nouvelles constructions.

Au sens large du terme, le recyclage est une opération de rénovation des chaussées qui permet soit de réutiliser le tapis de roulement, soit de reprendre le revêtement et une partie des couches sous-jacentes.

Il permet d'une part de limiter l'utilisation des ressources naturelles en granulats, ce qui participe à la politique de développement durable convenue en 1992 pendant la conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. Cette politique permet ainsi de répondre aux besoins du présent sans pour autant compromettre l'aptitude des prochaines générations à répondre à leurs propres besoins.

D'autre part, dans le contexte actuel où l'accent est mis sur la protection de l'environnement, le recyclage des matériaux est une solution recommandable vu que les capacités de mise en décharge s'amenuisent de plus en plus et que leurs coûts sont appelés à augmenter.

Enfin, il serait intéressant de souligner également l'aspect économique du recyclage des matériaux. L'expérience a montré que les matériaux recyclés coûtent moins cher que les matériaux neufs tout en étant presque aussi performants qu'eux.

De nos jours, plusieurs techniques ont été développées pour recycler efficacement les matériaux routiers. Nous essayons dans la suite de passer en revue ces différentes techniques.

### **II- DIFFERENTES TECHNIQUES DE RECYCLAGE**

Il existe actuellement deux principales techniques de recyclage dans le domaine routier : le recyclage à froid et le recyclage à chaud qui peuvent être réalisés soit sur place, soit en centrale.

Le recyclage à chaud n'est rien d'autre que la régénération de la couche de roulement existante. Ce type d'intervention est superficiel et s'applique le plus souvent aux routes à revêtement en enrobé de forte épaisseur ( 6 à 12 cm) présentant des dégradations en surface mais reposant sur une structure supportant encore assez bien le trafic avec un système d'assainissement fonctionnel.

Par contre, on a recourt au recyclage à froid ou au renforcement quand on est en présence d'une situation telle que :

- ❖ La structure de la chaussée est sous dimensionnée par rapport au trafic ;
- ❖ L'amélioration des matériaux existants au niveau de la chaussée est possible ;
- ❖ Le drainage n'est plus efficient.

Ainsi, on distingue successivement :

### **II-1- Le recyclage des couches bitumineuses dans de nouvelles couches bitumineuses**

C'est un procédé qui consiste à récupérer l'enrobé d'une couche bitumineuse et à le recycler en béton bitumineux ayant la même qualité que l'original. L'enrobé récupéré doit être de bonne qualité et homogène du point de vue de la granulométrie et de l'origine.

Le procédé de récupération par fraisage sélectif suivi de stockage est l'un des plus utilisés. Cependant, la technique la mieux adaptée ne peut être retenue qu'après une bonne compréhension des types d'enrobés dans les couches de chaussées existantes ainsi que leurs caractéristiques.

### **II-2- Recyclage des couches bitumineuses dans les couches de base**

C'est une technique de recyclage qui consiste à réutiliser les matériaux récupérés dans les couches de chaussées en grave traitée. On distingue les trois cas suivants :

➤ Le recyclage des couches bitumineuses contaminées dans les couches de base en graves traitée : Dans la récupération des enrobés, ces derniers peuvent être contaminés par du goudron qui est un produit contenant une forte concentration d'Hydrocarbures Polycycliques Aromatiques (HPA) dont certains sont cancérigènes. Ces produits deviennent dangereux lorsque l'enrobé contaminé est soumis à des températures supérieures à 160°C. Pour remédier à cela et protéger la santé des ouvriers, les recherches ont donné naissance à une technique qui consiste à chauffer les matériaux contaminés à des températures inférieures à 110°C. Avec les nouvelles techniques, ces matériaux sont chauffés avec de la vapeur à 90°C et traités aux liants hydrauliques avec des proportions allant de 4 à 6% de la masse totale. On a recourt à ce mode de recyclage pour les routes à faible trafic ; et pour éviter les remontées de fissures, une épaisseur minimale de 12cm d'enrobé est souvent requise au niveau du revêtement.

➤ Le recyclage des couches de base non contaminées dans les couches de base en grave traitée : c'est un procédé de traitement à froid dans lequel l'enrobé récupéré est

concessé puis traité aux liants hydrauliques. Cela lui confère les propriétés voisines de celles des couches de base hydrauliques. Il est valable pour tous les niveaux de trafic. Il est à remarquer qu'on peut aussi procéder à la stabilisation sur place d'une couche en grave traitée en utilisant des additifs à base de ciment.

➤ Le recyclage des couches bitumineuses dans les couches de base en grave traitée : c'est une technique qui est de plus en plus pratiquée en raison des avantages qu'elle offre. Nous en donnons ci-dessous des exemples pratiques.

### II-3 Recyclage des matériaux de base non traités

La différence essentielle entre un corps de chaussée traité et un corps de chaussée non traité réside dans la capacité portante. Dans la suite, nous allons successivement passer en revue les différentes techniques de recyclage des couches de base et de fondation.

a- Recyclage des couches de base en grave dans des couches non traitées : on peut avoir trois cas de figure :

➤ Le matériau de la couche existante reste en place et les granulats sont ajoutés pour améliorer les propriétés de la structure. Après traitement, la nouvelle couche de base doit avoir une granulométrie se rapprochant de la courbe de Fuller qui a pour équation :

$$P(\%) = \sqrt{\frac{d}{D}} \times 100$$

avec P : Pourcentage en poids d'agrégat de diamètre inférieur à d et D la grosseur nominale [5].

➤ Le matériau de la couche de base est transporté sur le nouveau chantier sans traitement supplémentaire. C'est le cas des matériaux récupérés répondant aux prescriptions techniques de la nouvelle couche de base.

➤ Le matériau de la couche de base est excavé puis transporté à un dépôt où on le traite. Ceci a lieu dans le cas des matériaux qui ne conviennent pas pour le recyclage ou lorsque le recyclage en place n'est pas préféré.

b- Recyclage des couches de base en grave en couches de base en grave traitée : C'est un procédé largement utilisé. On y a recours du fait des avantages qu'il offre aussi bien du point de vue résistance structurelle que du point de vue environnemental. Pour réussir l'opération, il est recommandé d'utiliser des liants à prise lente ayant une maniabilité de longue durée. Aussi, des précautions comme l'application de produits d'étanchéité,

l'humidification de la surface ou la circulation de véhicules légers doivent être prises afin de minimiser la formation des fissures.

c- Recyclages de couches de fondation en couche de fondation non traitée : la contribution d'une couche de fondation au comportement structural d'une chaussée à fort trafic étant souvent faible, on utilise très peu les couches de fondation traitées pour ce type de chaussée. Ce n'est cependant pas le cas pour les chaussées à faible trafic où la tendance est de traiter les couches de fondation afin de réduire les épaisseurs des couches supérieures.

Nous pouvons retenir que dans la pratique, les couches de fondation ne sont pas souvent recyclées.

d- Recyclage des couches de fondation en couches de base traitées : cette solution peut être économique et avantageuse dans certains cas. Elle est généralement réalisable lorsque le matériau manque de fines. Cependant, le manque de fines entraîne un besoin en liant plus important.

### **III- EXEMPLES PRATIQUES**

#### **III-1 Technique de recyclage appliquée en République du Bénin**

Au Bénin, les matériaux recyclés sont souvent améliorés au ciment puis utilisés en couche de fondation ou de base. L'opération de recyclage se déroule en deux phases qui sont : l'épandage du ciment et le recyclage proprement dit.

L'épandage du ciment se fait :

❖ Soit à la main, auquel cas les paquets de ciment sont déposés directement sur la couche à traiter avant d'être défaits.

❖ Soit avec l'épandeuse de ciment ; dans ce cas, le compresseur et le dispositif d'épandage (encore appelé sous-marin) sont attelés au camion citerne. Le ciment est refoulé sous-pression par le compresseur dans le sous-marin –sorte de cercueil sans fond disposant d'une trappe à l'arrière pour le réglage de l'épaisseur du ciment répandu- avant d'être étalé à l'aide de raclettes sur toute la largeur de la bande à traiter.

Quant au recyclage, il s'effectue avec la recycleuse dont la profondeur de coupe du rotor est réglée à l'avance. La recycleuse effectue une première passe en tendon avec une citerne à eau qui est reliée à la pompe centrifuge de la recycleuse par un raccord pour l'alimentation en eau du circuit d'additif et de la rampe de gicleurs du caisson. Une seconde passe est parfois nécessaire quand le matériau est mal calibré. Cette passe se fait sans la citerne à eau, soit avec la recycleuse, soit avec un pulvimixer. La planche recyclée est ensuite traitée comme suit :

- Une passe de niveleuse pour régaler le matériau ;
- Quelques passes du compacteur à pneus pour serrer quelque peu le matériau ;
- Quelques passes (6 environ) avec vibration de chacun des deux compacteurs à rouleau ;
- Réglage de la plate-forme à l'aide d'une niveleuse ;
- Un dernier compactage(léger) avec les rouleaux pour arranger l'état de surface ;
- Un ou deux arrosages sont souvent nécessaires pour la cure car toute variation brutale et/ou importante dans la teneur en eau de la planche traitée engendrerait des désordres comme des fissures ou une mauvaise prise de ciment.

### **III-2 Technique utilisée sur le chantier Diamniadio-Mbour (SENEGAL)**

La technique utilisée sur ce chantier diffère quelque peu de la précédente. Ici, le matériau recyclé (revêtement + couche de base en latérite ciment) n'est pas amélioré au ciment et il est utilisé en couche de fondation. Vu qu'un élargissement de la route est prévu et que généralement, le niveau de la couche de fondation doit être le même que celui du revêtement actuel, un apport de matériau est nécessaire. Le matériau qui a été retenu est de la latérite.

La mise en œuvre se déroule successivement comme suit (voir photos à la page suivante):



PHOTO N°1 : PREPARATION DE LA PARTIE DE L'ACCOTEMENT DEVANT SERVIR A L'ELARGISSEMENT



PHOTO N°2 : MISE EN ŒUVRE DE LA LATERITE CRUE D'APPORT





PHOTO N°3 : DECOHESION DES MATERIAUX DU REVETEMENT ET DE LA COUCHE DE BASE AVEC LA RECYCLEUSE RR 250 (PULVIMIXER)



PHOTO N°4 : MELANGE ET REGLAGE A L'AIDE DE LA NIVELEUSE



PHOTO N° 5 : ARROSAGE DU MELANGE HOMOGENEISE



PHOTO N°6 : COMPACTAGE DE L'ENSEMBLE

## CHAPITRE II : METHODES ET TECHNIQUES DE DIMENSIONNEMENT ROUTIER

Pendant de nombreuses décennies, le dimensionnement des chaussées a été essentiellement fait de manière empirique. Avec la réalisation aux Etats-Unis des essais AASHO (American Association of States Highways Officials) qui ont été faits de 1951 à 1961, il a été donné une base expérimentale au choix des épaisseurs des couches de chaussées.

Au total, deux grandes catégories de méthodes de dimensionnement ont été utilisées : les méthodes empiriques (les plus anciennes) et les méthodes théoriques ou rationnelles.

### I- LES METHODES EMPIRIQUES

Elles sont fondées sur l'observation expérimentale des chaussées et de leur comportement sous le trafic. Au nombre de ces méthodes nous pouvons citer :

#### I-1 La méthode CBR

Connue en 1938, elle est basée sur deux abaques complémentaires qui donnent l'épaisseur totale de la chaussée. La première donne en fonction du CBR du sol, l'épaisseur nécessaire du corps de chaussée pour une charge considérée variant de 1 à 10 tonnes. La deuxième exprime cette épaisseur en fonction du trafic et du CBR du sol. (Voir Annexe N°1).

Pour le calcul direct, Peltier (1965) a proposé la formule suivante :

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{CBR + 5}$$

avec P : poids maximale de la roue en tonnes.

Avec les recherches, cette formule a été améliorée pour donner :

$$e = \frac{100 + \sqrt{P}(75 + 50 \log \frac{N}{10})}{CBR + 5}$$

où N est le nombre de poids lourds de plus de trois (03) tonnes.

#### I-2 La méthode du TRRL

Elle utilise la même formule que Peltier avec une différence au niveau des paramètres.

$$e = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{CBR + 5}$$

Ici P est le poids d'une roue fictive représentant à la fois la roue réelle et l'intensité du trafic ; il est donné par l'expression suivante :

$$P = p^3 \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

p : poids réel de la roue la plus lourde susceptible de circuler sur la route ; (p= 6,5t d'après le code de la route).

T : somme des poids des véhicules circulant pendant une année sur la chaussée divisée par la largeur de la chaussée ; T est exprimé en tonnes par mètre(t/m).

T<sub>0</sub> : trafic normal moyen d'une roue évalué à 10<sup>5</sup> t/m.

### I-3 La méthode du CEBTP

Mise au point en 1972, cette méthode se base sur les principes suivants :

➤ Le CBR et l'intensité du trafic déterminent l'épaisseur de la chaussée dans le cas des chaussées ne comportant aucune couche rigidifiée.

➤ Pour les chaussées comportant une ou plusieurs couches rigidifiées, le dimensionnement qui visait à éviter le poinçonnement de la plate-forme doit être complété par une analyse théorique dont l'objet est de vérifier que les contraintes effectives de traction développées à la base des couches rigidifiées sont compatibles avec les performances probables des matériaux.

La méthode du CEBTP comporte deux tableaux donnant en fonction du trafic et de la portance du sol de plate-forme, les épaisseurs requises en couches de fondation, de base et de surface.

Concernant le trafic, elle en définit cinq classes exprimées en nombre cumulé de passage d'un essieu équivalent à 13t.

Essieu équivalent de 13t
$T_1 < 5.10^5$
$5.10^5 < T_2 < 1,5.10^6$
$1,5.10^6 < T_3 < 4.10^6$
$4.10^6 < T_4 < 10^7$
$10^7 < T_5 < 2.10^7$

Tableau N°1 : Classe de trafic du CEBTP

Concernant les classes de portance, on a :

Classe	CBR
S <sub>1</sub>	CBR < 5
S <sub>2</sub>	5 < CBR < 10
S <sub>3</sub>	10 < CBR < 15
S <sub>4</sub>	15 < CBR < 30
S <sub>5</sub>	CBR > 30

Tableau N°2 : Classe de portance du CEBTP

En fonction de ces classes de trafic et de plate-forme, la méthode donne selon le matériau, les épaisseurs en centimètres des composants du corps de chaussée (voir Annexe N°2).

## II- LES METHODES RATIONNELLES.

Les méthodes rationnelles (ou méthodes théoriques) se basent sur l'étude des contraintes engendrées par le trafic à divers niveaux du corps de chaussée et leur comparaison avec les performances probables des matériaux du corps de chaussée. Elles se fondent sur des modèles parmi lesquelles on peut citer :

➤ Le modèle de Burmister qui assimile la chaussée non pesante à une dalle reposant sur un massif semi-infini. Il schématise la chaussée par un modèle multicouche traduisant sa structure stratifiée.

➤ Le modèle de Jeuffroy et Bachelez qui modélise la chaussée en deux couches, la couche supérieure étant assimilée à une plaque. Ce modèle a débouché pour la première fois sur un système très complet d'abaques.

Avec le développement de l'outil informatique, des logiciels élaborés comme Alizé 3® et Ecoroute® ont été mis au point par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) en France. Ces logiciels permettent de traiter complètement le problème d'un multicouche dans diverses conditions de collage des couches les unes aux autres. Ils se basent sur des modèles mathématiques et consistent à :

❖ Modéliser une structure de chaussée (neuve ou ancienne) en choisissant le nombre de couches, leurs hauteurs respectives ainsi que leurs caractéristiques mécaniques (module de

Young  $E$  et coefficient de Poisson  $\nu$ ) afin de calculer les contraintes et déformations provoquées par une charge unitaire type.

❖ Rechercher à l'aide du modèle, la contrainte ou la déformation maximale susceptible d'engendrer la rupture d'une couche pour la charge type.

❖ Comparer cette contrainte ou déformation à la valeur admissible découlant de la loi de fatigue des matériaux considérés.

Les logiciels Alizé 3® et Ecoroute® considèrent pour le calcul des contraintes et déformations un essieu de référence de 13t ; chaque demi-essieu comporte un jumelage à roues simples, représenté par deux charges exerçant une pression uniformément répartie de 0,662 MPa sur deux disques de 12,5 cm de rayon avec un entre-axe de 37,5 cm. Les charges se schématisent comme suit :

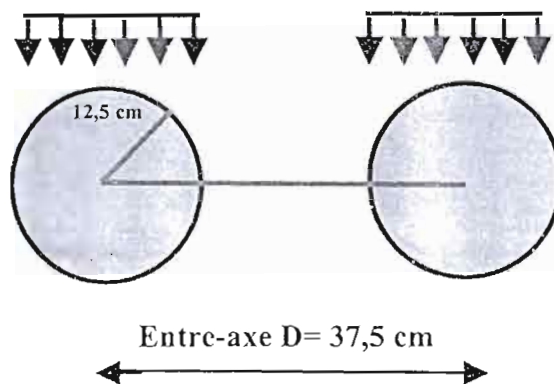


Fig N°1. - Schématisation des charges

### Conclusion :

En examinant les différentes techniques ainsi exposées, on remarque que les méthodes empiriques de dimensionnement ont été conçues dans des conditions particulières qui ne correspondent pas totalement à celles des pays tropicaux. Leur extrapolation dans nos pays est fortement risquée vu que pour un matériau utilisé dans le corps de chaussée, elles ne simulent pas les conditions réelles de sollicitations dynamiques qui sont de nature cyclique.

Aussi, dans le dimensionnement des chaussées revêtues composées d'une ou plusieurs couches de matériaux traités aux liants hydrauliques, la méthode CBR n'envisage pas le mode de rupture qui peut se traduire à la suite des effets de contraintes de traction à la base de la couche liée.

Les méthodes rationnelles quant à elles, peuvent donner des résultats satisfaisants en ce sens qu'elles prennent en compte les caractéristiques intrinsèques des matériaux du corps de

chaussée. Ces résultats seront d'autant plus fiables que les caractéristiques élastiques que sont le module de Young et le coefficient de Poisson correspondent exactement à ceux des matériaux considérés.

### CHAPITRE III : ETUDE THEORIQUE DU MODULE D'ELASTICITE E ET DE L'INDICE CBR D'UN MATERIAU

#### I- ELASTICITE ET MODULE D'ELASTICITE

##### I-1 Historique

C'est Hooke (1776) qui fut le premier à remarquer que l'allongement d'un fil tendu était proportionnel à la force qui lui était appliquée. La notion de contrainte n'avait pas encore vu le jour. Il faut attendre Young (1807) pour connaître le module qui porte aujourd'hui son nom et qui a été aussi défini à partir d'expérimentations sur l'acier.

En effet, en considérant une tige d'acier de diamètre (D) et de section (S) soumise à une force de traction (F), on remarque que l'allongement de la tige est proportionnel à la force appliquée tant que cette dernière est inférieure à une valeur liée à la nature du matériau. L'étude de l'évolution de l'allongement relatif ( $\epsilon$ ) révèle l'existence d'une droite dont la pente est constante ; cette pente a les dimensions d'une contrainte : c'est le module d'élasticité E ou module d'Young.

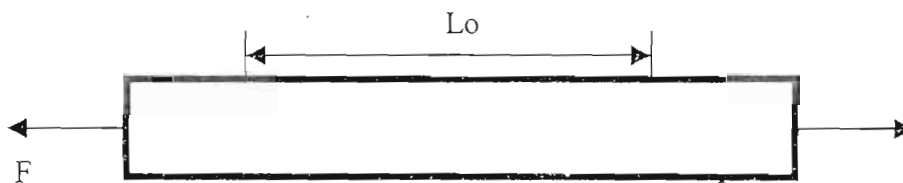


Fig N°2 : Essai de traction sur une tige d'acier

Le module de déformation E ou module de Young ou encore module de rigidité longitudinale d'un matériau est la caractéristique principale qui permet de connaître ses caractéristiques de contraintes et de déformations.

Les contraintes et les déformations sont liées par la relation suivante dans le domaine élastique :

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$\sigma$  : Contrainte en MPa ( $\sigma = \frac{F}{S}$ )

$\epsilon = \Delta L/L$  : Déformation longitudinale

E : Module de Young en MPa.



Remarque :

Lorsque la tige tendue s'allonge, son diamètre (D) diminue. La diminution relative du diamètre notée  $\epsilon' = \frac{\Delta D}{D}$  est proportionnelle à l'allongement relatif  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$ . La relation qui les lie est de la forme :

$$\frac{\Delta D}{D} = \nu \cdot \frac{\Delta L}{L} = \nu \epsilon \quad \text{avec} \quad \nu = \frac{\epsilon'}{\epsilon}$$

Le coefficient de proportionnalité ( $\nu$ ) est appelé coefficient de Poisson : c'est la seconde caractéristique élastique du matériau. C'est une grandeur sans dimension.

L'élasticité peut donc être définie comme l'aptitude d'un corps à reprendre sa forme initiale après suppression de la sollicitation. Sur la courbe contrainte-déformations, le point au-delà duquel la contrainte n'est plus proportionnelle à la déformation est la limite d'élasticité du matériau.

### **I-2 Importance du module d'élasticité E en construction routière**

En général, lorsque les contraintes appliquées sur un matériau entraînent des déformations permanentes, on peut affirmer sans se tromper que la limite d'élasticité du matériau est dépassée. Ainsi, connaissant la limite d'élasticité, on pourra prévoir la valeur de la contrainte à prendre en compte pour éviter des déformations irréversibles.

Cependant, du fait de la complexité de la courbe contrainte-déformations, la limite d'élasticité n'est pas toujours connue de manière précise ; ce qui fait qu'on a le plus souvent recours au module d'élasticité.

### **I-3 Notion de module d'élasticité statique et de module d'élasticité dynamique**

Le module d'élasticité statique ou encore module statique est le module déterminé dans les conditions décrites précédemment ; aucune vibration n'est associée à l'application des contraintes.

Par contre, le module d'élasticité dynamique ou module dynamique correspond à la réaction d'un sol sous des sollicitations dynamiques brèves : vibrations de machines, séismes, passage de véhicules, etc. C'est une grandeur ayant une valeur sensiblement plus élevée que celle du module statique.

Le module dynamique peut être mesuré in situ au vibreur au moyen d'ondes au laboratoire. Il est admis que sa valeur est au moins deux à quatre fois plus importante que celle du module statique. On retient généralement :

$$E_{\text{dyn}} = 3 E_{\text{stat}}$$

**NB :** La théorie de l'élasticité est utilisée en mécanique des sols à condition d'associer à un module d'élasticité, le niveau d'intervalle de contraintes dans lequel il est applicable ainsi que le type de chargement auquel il se rapporte. [3]

#### I-4 Détermination du module E des matériaux en mécanique des sols

En mécanique des sols, le module E d'un matériau peut être déterminé à l'aide d'un certain nombre d'essais au nombre desquels on peut citer :

##### I-4-1 L'essai de compression simple

On utilise une éprouvette cylindrique normalisée qu'on écrase dans le sens longitudinal au moyen d'une presse agissant à vitesse constante. Deux disques de même diamètre que l'éprouvette sont placés à ses deux extrémités. A l'aide d'un piston relié à un anneau dynamométrique, on exerce à vitesse constante une charge par l'intermédiaire d'une bille en acier logée dans un trou pratiqué sur le disque supérieur ; on note à des intervalles de temps réguliers la valeur des contraintes et déformations et ce, jusqu'à la rupture de l'éprouvette. Les valeurs expérimentales portées sur un graphique donnent l'allure suivante :

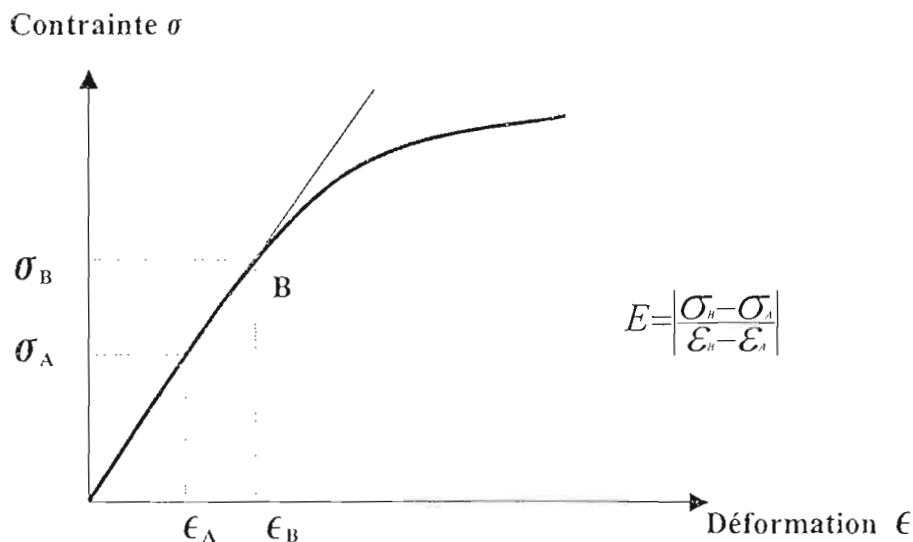


Fig N°3 Relation Contrainte-déformation donnant le module E d'un matériau

### I-4-2 L'essai de plaque

C'est un essai qui permet de calculer le module de réaction d'un sol à partir de chargement statique à la plaque (étude de la déformabilité d'une plate forme). On l'utilise pour contrôler le compactage des remblais et assises de chaussées.

Il est réalisé sur le terrain et nécessite la présence d'un camion de 15 tonnes, 6 roues avec châssis long. On utilise soit une plaque de 40 cm de diamètre, soit une plaque de 60 cm et une poutre BENKELMAN.

On réalise deux mises en charge (2.5 bars et 2 bars). On mesure les déflexions correspondantes W1 et W2 à partir desquelles on calcule les modules de déformation EV1 et EV2. EV est donné par la formule de Boussinesq :

$$EV = \frac{\pi}{2} (1 - \nu^2) \cdot \frac{\sigma \cdot r}{e}$$

r : rayon de la plaque rigide ;

e : enfoncement

$\sigma$  : contrainte appliquée ;

$\nu$  : coefficient de Poisson = 0,25

Contrainte

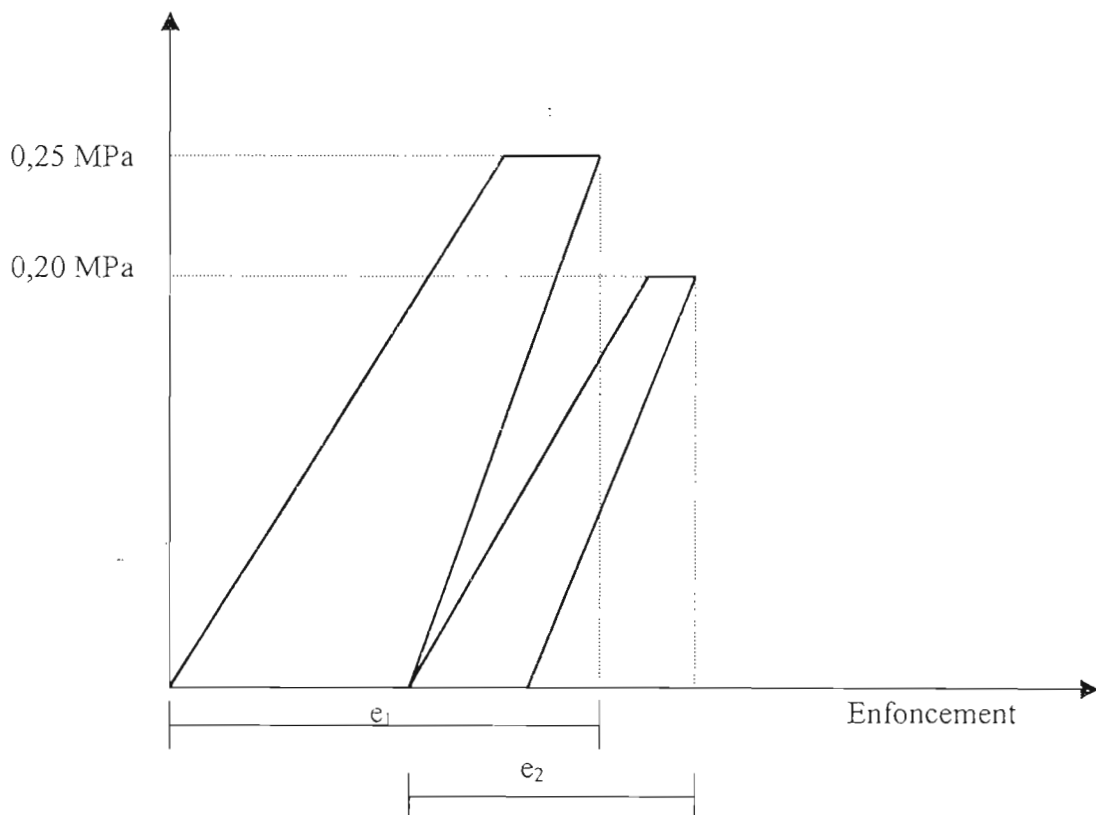


Fig N°4 : Diagramme de chargement de l'essai à la plaque

Le rapport :  $k = (EV2/EV1)$  donne la compacité et doit être inférieur à 2. Les valeurs indicatives pour cet essai sont les suivantes :

$0 < EV2 < 5 \text{ MPa}$ , sol très déformable (portance 0)

$5 \text{ MPa} < EV2 < 20 \text{ MPa}$ , sol déformable (portance 1)

$20 \text{ MPa} < EV2 < 35 \text{ MPa}$ , sol déformable (portance 2)

$35 \text{ MPa} < EV2 < 50 \text{ MPa}$ , sol peu déformable (portance 3)

$EV2 > 50 \text{ MPa}$ , sol très peu déformable (portance 4)

Pour une chaussée de trafic  $> T3$

$20 \text{ MPa} < EV2 < 50 \text{ MPa}$ : PF1

$50 \text{ MPa} < EV2 < 120 \text{ MPa}$ : PF2

$EV2 > 120 \text{ MPa}$ : PF3

Sol à indice de qualité 0	$0 < EV2 < 10 \text{ MPa}$
Sol à indice de qualité 1	$10 < EV2 < 20 \text{ MPa}$
Sol à indice de qualité 2	$20 < EV2 < 40 \text{ MPa}$
Couche de forme : qualité 3	$40 < EV2 < 100 \text{ MPa}$
Couche fondation : qualité 4	$EV2 > 100 \text{ MPa}$
Couche de base	$EV2 > 100 \text{ MPa}$

Tableau N°3 : Classe des sols selon leur module

En raison de la complexité et la difficulté liées à l'exécution de l'essai à la plaque, nous allons opter pour l'essai de compression simple qui présente les avantages suivants :

- Il est réalisable au laboratoire de l'ESP ;
- Il ne nécessite pas un matériel aussi lourd et onéreux que l'essai de plaque ;
- Il peut être réalisé par un nombre moins important de personnes.

## II- L'INDICE CBR

L'indice CBR est déterminé en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de section  $19,35 \text{ cm}^2$  pour le faire pénétrer dans un échantillon de sol à la vitesse constante de  $1,27 \text{ mm/mn}$ . Les valeurs particulières des deux sols ayant provoqué les enfoncements de  $2,5$  et  $5 \text{ mm}$  sont alors rapportées aux valeurs de  $13,35$  et  $20 \text{ kN}$  correspondant aux forces observées sur un matériau de référence aux mêmes enfoncements.

L'indice CBR est alors défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur exprimée en pourcentage des deux rapports ainsi calculés.

$$\text{CBR} = \max \left\{ \frac{F(2,5\text{mm})}{13,35}, \frac{F(5\text{mm})}{20} \right\}$$

F est en kN

On peut aussi l'exprimer comme suit :

$$\text{CBR} = \max \left\{ \frac{P(2,5\text{mm})}{70} \times 100, \frac{P(5\text{mm})}{105} \times 100 \right\}$$

P est en Bars

## III- RECAPITULATIF DES ETUDES DE CORRELATION DU MODULE D'ELASTICITE E

L'idée de corréler le module d'élasticité et le CBR a été initialement émise par le « Corps of Engineers » de l'US Army. Cela a permis à Forster et Heukelom de proposer les relations  $E_{\text{dyn}} = 50\text{CBR}$  et  $E_{\text{dyn}} = 200\text{CBR}$ . ( en bars)

Les corrélations proposées sont variées et dépendent généralement du traitement ou non des matériaux.

Pour les assises non traitées, on peut retenir [3]:

- G. Jeuffroy indique  $E = 6,5\text{CBR}^{0,65}$  (en MPa)
- Le laboratoire Shell d'Amsterdam propose :  $E = 10\text{CBR}$  (en MPa)
- Regis (1985) propose la formule  $E = 0,85\text{CBR}^{0,825}$  (en MPa)
- Actuellement, le LCPC utilise la relation  $E = 5\text{CBR}$  (en MPa). Cette relation est la plus utilisée pour les latérites crues au Sénégal.

Récemment en 2001, Papa Diallo NDIAYE [3] a proposé à la suite de ses recherches, la corrélation suivante :

$$E = 32\text{CBR} \text{ (en bars)}$$

Le CEBTP a proposé la relation empirique  $E_{dyn} = 100CBR$  pour les mesures in-situ au vibreur ou au laboratoire au moyen de la propagation d'ondes. Par contre pour les mesures in-situ à l'essai à la plaque, il propose les relations suivantes :

$E_{stat} = 50CBR$  pour les matériaux à gros éléments ;

$E_{stat} = 30CBR$  pour les matériaux à fraction fine importante.

En ce qui concerne les matériaux traités aux liants hydrauliques, c'est la relation suivante qui a été longtemps utilisée :

$$E_{stat} = 300R_{c7}$$

$R_{c7}$  : Résistance à la compression simple à 7 jours.

Par la suite, cette relation a été remplacée par :

$E_{stat} = 1000$  à  $2000 R_{c7}$  (1000 pour les matériaux les plus plastiques et 2000 pour les matériaux les plus crus).

En 1991, Michel Zohou [1] a trouvé à la suite d'essais réalisés sur les matériaux de deux carrières différentes (Goudiane et Thiès-Antenne Télé), les relations ci-après :

$E = 9,5339CBR + 127,985$  pour 0% de ciment ;

$E = 2,88209CBR + 634,01$  pour 2% de ciment ;

$E = 2,84553CBR + 597,199$  pour 4% de ciment.

Pour obtenir ces résultats, il a d'abord réalisé des essais CBR et des essais de compression simple sur le matériau cru ; ensuite sur le matériau amélioré à 2 et 4% de ciment, avec à chaque fois des cures de trois jours à l'air et des imbibitions de quatre jours à l'eau. Vu les disparités enregistrées au niveau des résultats et leur différence par rapport à ceux du CEBTP, il a suggéré que des études similaires soient réalisées sur l'ensemble des carrières afin de pouvoir dégager une corrélation plus fiable et représentative.

En 2002, Bocar Malick MBOW [2] a réalisé des études similaires à ceux de Michel ZOHOU sur les latérites des carrières de Gandigal, Sindia et Ndakhar Mbaye. Après des essais d'identification sur les divers matériaux et la détermination des pourcentages optimaux de leur amélioration au ciment, il a soumis les matériaux améliorés puis compactés à des essais de compression axiale et traction par fendage. Les matériaux en question ont préalablement subis des cures à l'air de 7, 28 et 90 jours. Ces essais lui ont permis de déduire les corrélations suivantes :

$$E_{\text{dyn}} = 395,21R_c \text{ et } E_{\text{dyn}} = 2925,6R_{\text{tb}} + 3396,9$$

Avec :

$R_c$  : Résistance à la compression simple variant de 12 à 22 bars.

$R_{\text{tb}}$  : Résistance à la traction par fendage variant de 1 à 2 bars.

Ces travaux lui ont permis de proposer l'utilisation de modules variant entre 8 000 et 9 500 bars dans les dimensionnements routiers contrairement aux valeurs supérieures à 15 000 bars résultant de la relation  $E = 100\text{CBR}$  souvent utilisée.

Les résultats de ces différents travaux rendent compte de la complexité du problème ; ils confirment davantage l'importance du choix du module d'élasticité dans un dimensionnement routier.

Les essais en vue de sa détermination pour les matériaux recyclés feront l'objet de la partie expérimentale.

## **2<sup>ème</sup> PARTIE : PHASE EXPERIMENTALE**

**CHAPITRE I : IDENTIFICATION DU MATERIAU  
RECYCLE**

**CHAPITRE II : EXPERIMENTATION ET APPLICATIONS**

**CHAPITRE III : APPLICATION DU DIMENSIONNEMENT  
AU TRONÇON ROUTIER DIAMNIADIO-MBOUR**



## CHAPITRE I : IDENTIFICATION DU MATERIAU RECYCLE

Dans le but de caractériser le matériau obtenu après recyclage, nous avons réalisé des essais d'identification sur le matériau prélevé en place lors de la réalisation de la planche d'essai. Nous avons à cet effet fait les essais suivants :

- Analyse granulométrique ;
- Limites d'Atterberg ;
- Essai Proctor ;
- Essai CBR

### I- L'ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Le but de cet essai est d'évaluer la continuité de la répartition des grains du matériau et de déterminer la proportion en fines. L'essai est réalisé conformément à la norme « NF P 94-056 (titre : Analyse granulométrique des sols- méthode par tamisage à sec après lavage ». Il a été effectué avant et après CBR .

L'analyse granulométrique des matériaux routiers est très importante car les matériaux mal gradués peuvent entraîner après compactage, des problèmes d'instabilité, ce qui ne donnera que des couches de qualité médiocre.

Les résultats des essais effectués montrent le comportement des courbes granulométriques avant et après CBR dans le fuseau proposé par le CEBTP pour les graveleux latéritiques. (Voir courbes ci-après).

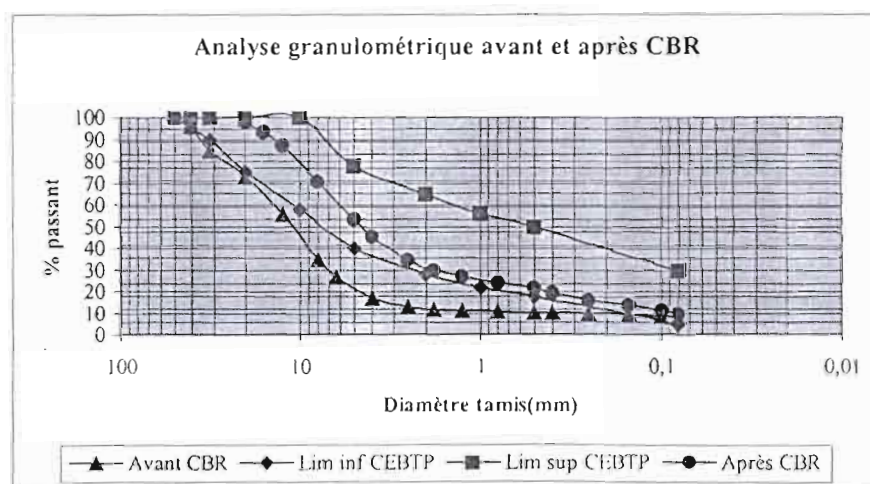


Fig N°5 Courbes granulométriques avant et après CBR

Après CBR, nous notons une augmentation du pourcentage de fines de 2% environ qui respecte toutefois les prescriptions du CEBTP en la matière. Nous remarquons cependant que seule la granulométrie après CBR s'insère dans le fuseau du CEBTP. A notre avis, cela est dû au gros élément de béton bitumineux qui n'ont pas pu être broyé lors du recyclage.

La proportion de fines est un critère très important car pour assurer la stabilité du matériau lors de son utilisation, on doit maintenir la proportion de fines au-delà d'un pourcentage minimal de façon à pouvoir contenir par cohésion l'action abrasive du trafic[3]. La limite supérieure est aussi contrôlée afin d'éviter une perte de contact entre les éléments de grandes dimensions.

## II- LES LIMITES D'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent d'apprécier la consistance d'un sol. Elles sont déterminées conformément à la norme « NF P 94-051 (titre : Détermination des limites d'Atterberg, limite de liquidité à la coupelle- limite de plasticité au rouleau) ».

On distingue trois états de consistance qui sont : l'état liquide, l'état plastique et l'état solide.

Pour les sols, l'indice de plasticité  $I_p$  définit l'étendu du domaine plastique qui est lié à la présence de fines argileuses plastiques. Les sols ont ainsi été classés d'après leur indice de plasticité.

Plasticité	Classification
$0 < I_p < 5$	Sol non plastique
$5 < I_p < 15$	Sol moyennement plastique
$15 < I_p < 35$	Sol plastique
$I_p > 35$	Sol très plastique

Tableau N°4 Classification des sols en fonction de leur indice de plasticité

Les limites d'Atterberg du matériau recyclé sont les suivantes :

- Limite de plasticité (LP) = 16,97
- Limite de liquidité (LL) = 28
- Indice de plasticité ( $I_p$ ) =  $LL - LP = 11,03$

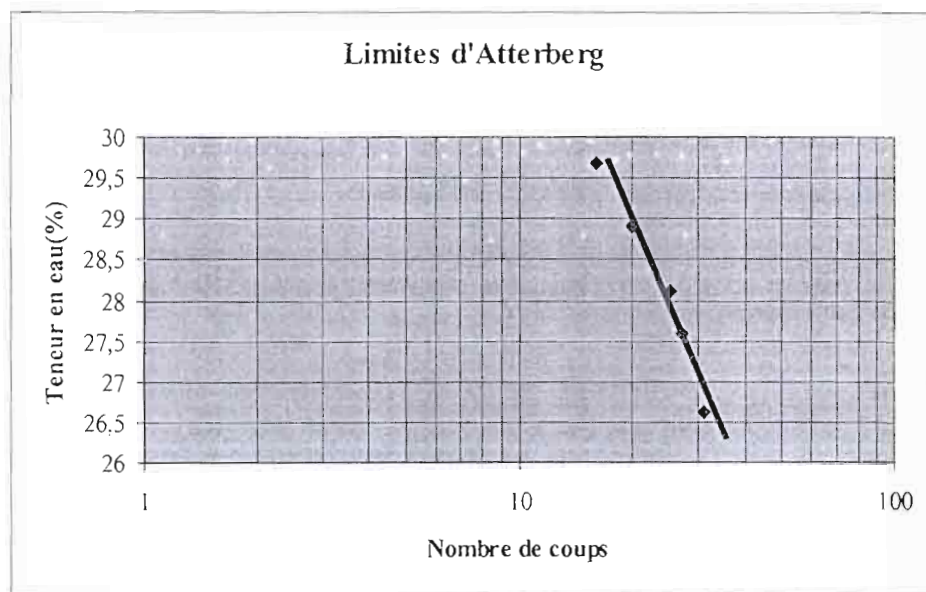


Fig N°6 Limites de liquidité du matériau recyclé

Pour une utilisation en couche de fondation, le matériau doit présenter un  $I_p$  au maximum égal à 25 (avec cependant une tolérance jusqu'à un  $I_p$  de 30 pour les trafics faibles) (CEBTP, 1984).

L'indice de plasticité du matériau étant de 11,03, nous pouvons dire que sa plasticité est bonne pour être utilisé en couche de fondation.

### III- L'essai Proctor Modifié

Dans les chantiers de routes, on utilise généralement l'essai Proctor car les compacités obtenues avec l'essai Proctor modifié sont plus grandes et correspondent à des valeurs nécessitant de meilleures qualités mécaniques de la part des matériaux mis en place. Il est réalisé conformément à la norme « NF P 94-093 (titre : Essai Proctor normal- Essai Proctor modifié) »

L'essai Proctor normal est plus utilisé pour les aménagements, les terrains de sport, les digues, etc.

Pour ces raisons, nous avons réalisé l'essai Proctor modifié. La courbe se présente comme suit :

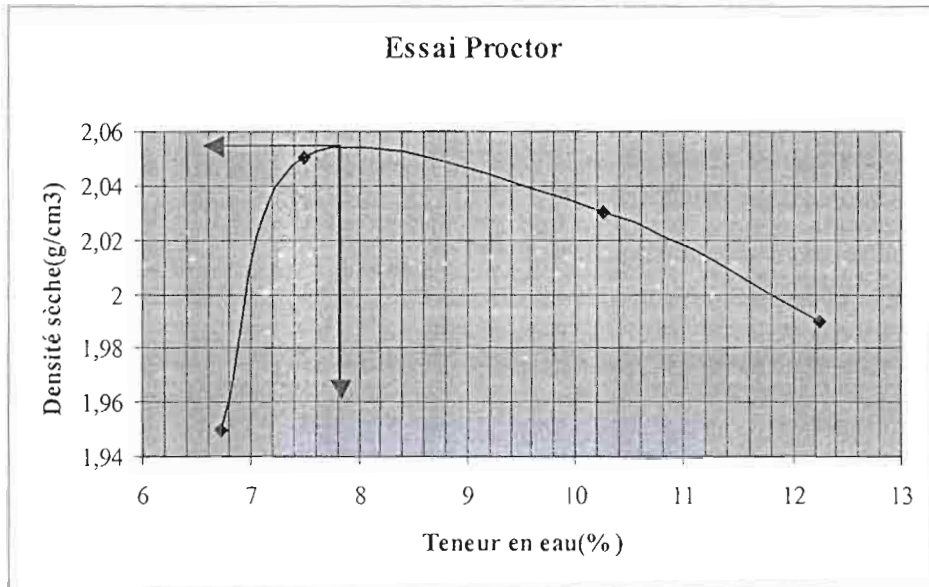


Fig N°7 Essai Proctor modifié

Nous avons obtenu une densité sèche maxi de 20,55 kN/m<sup>3</sup> pour une teneur en eau optimale de 7,8%.

L'aptitude d'un matériau à être porté à une certaine compacité dépend de la forme plus ou moins aplatie du sommet de la courbe Proctor, c'est-à-dire du domaine de variation de la teneur en eau dans lequel doit se trouver le matériau au moment du compactage. Plus ce domaine est étendu, plus le compactage du matériau sera facile.

Vu le fait que les normes du CEBTP recommandent une valeur de référence de 19 kN/m<sup>3</sup> et que le sommet de la courbe Proctor obtenue n'est pas pointu, nous pouvons prévoir que le matériau pourra se compacter sans difficultés. Cela se remarque d'ailleurs sur le terrain.

#### IV- L'ESSAI CBR

L'essai CBR est un essai mécanique de poinçonnement à vitesse constante qui mesure la portance d'un sol après compactage. Il est réalisé suivant la norme «NF P 94-078 (titre : Indice CBR après immersion (...) mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR)».

D'après les prescriptions du CEBTP, pour qu'un sol puisse être utilisé en couche de fondation, il faut qu'il ait un CBR au moins égal à 30.

Dans le cadre de notre étude, nous avons trouvé pour le matériau recyclé des CBR allant de 18 à 50. Il est à noter cependant que 65% des CBR obtenus sont supérieurs à 30. On peut alors dire que le matériau recyclé répond aux prescriptions du CEBTP du point de vue de la portance en couche de fondation. Les valeurs avoisinant 18 sont douteuses et doivent certainement provenir d'erreurs de manipulation.

## CHAPITRE II : EXPERIMENTATION ET ETABLISSEMENT DES CORRELATIONS

Le but de cette partie est de réaliser certains essais dont les résultats pourront aider à la détermination d'une corrélation de la forme  $E = f(\text{CBR})$ . Vu les difficultés liées à la détermination du module  $E$  des matériaux par rapport à celle du CBR, une telle corrélation serait d'une grande utilité dans les dimensionnements de chaussées par la méthode rationnelle.

La plupart des études de corrélations de ce genre réalisées jusqu'à ce jour ayant été réalisées sur la latérite, il n'existe quasiment pas de sources pouvant servir de base à des études semblables sur les matériaux recyclés. Pour ce faire, les essais que nous avons réalisés pour la présente étude se sont basés sur ceux qui ont été faits pour les études similaires sur la latérite. Ainsi, nous avons effectué successivement :

- des essais CBR ;
- des essais de compression simple
- des corrélations à partir des résultats obtenus pour ces deux essais.

### Remarques :

1- Les essais CBR et les essais de compression ont été réalisés sur le matériau recyclé cru sans amélioration au ciment. Ce choix est dû au fait que pour le projet de renforcement du tronçon Diamniadio-Mbour auquel nous allons appliquer nos résultats, le matériau recyclé est utilisé en couche de fondation et sans traitement au ciment.

2- Le matériau utilisé pour les essais a été prélevé lors d'une planche d'essai réalisée avant le démarrage effectif des travaux. Le recyclage a été effectué sur place par la technique décrite précédemment pour le chantier Diamniadio-Mbour.

### **I- ESSAIS EN LABORATOIRE**

#### **I-1- Essai de compression simple avec détermination du module élastique**

##### **I-1-1- Dispositif de l'essai de compression simple avec détermination de module**

L'éprouvette utilisée est de forme cylindrique et a les dimensions suivantes :

$$\Phi=15,1\text{cm} ; H=12,8\text{cm}$$

Cette éprouvette est écrasée suivant son axe vertical avec la même presse, le même anneau dynamométrique et la même vitesse que pour l'essai CBR. Deux disques de circonférence égale à celle de l'éprouvette sont placés l'un au-dessus, l'autre en dessous de l'éprouvette. Entre le piston et le disque supérieur se loge une bille en acier. Cette dernière permet de bien transmettre la charge appliquée à l'éprouvette, évitant ainsi les concentrations de contraintes.

L'appareillage comprend aussi, pour la mesure des déformations engendrées sous charge, un dispositif constitué par une tige à aimant fixée sur le plateau et un comparateur (voir photo ci-dessous).

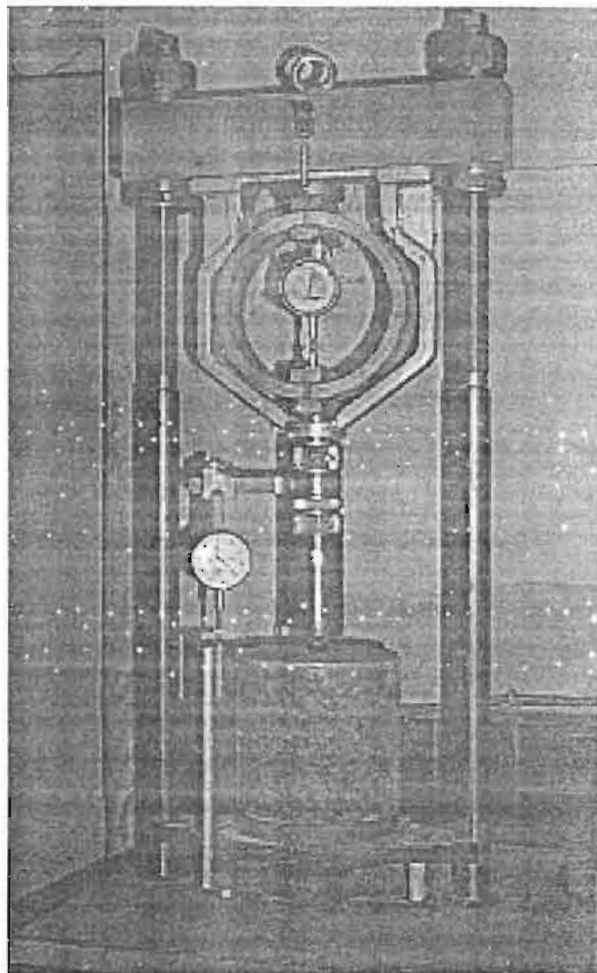


PHOTO N° 7. - DISPOSITIF DE L'ESSAI DE COMPRESSION AVEC DETERMINATION DU MODULE ELASTIQUE

### I-1-2- Présentation des résultats

Les essais de compression simple se faisant en général avec des moules d'élanement 2, il faudra apporter une correction aux valeurs trouvées. L'élanement de l'éprouvette que nous avons utilisée est :

$$\text{Elancement} = \frac{H}{\phi} = \frac{12,8}{15,1} = 0,85$$

Le diagramme ci-après a été utilisé pour déterminer le facteur de correction. Avec une valeur d'élancement égale à 0,85, on obtient avec ce diagramme, un facteur de 0,775.

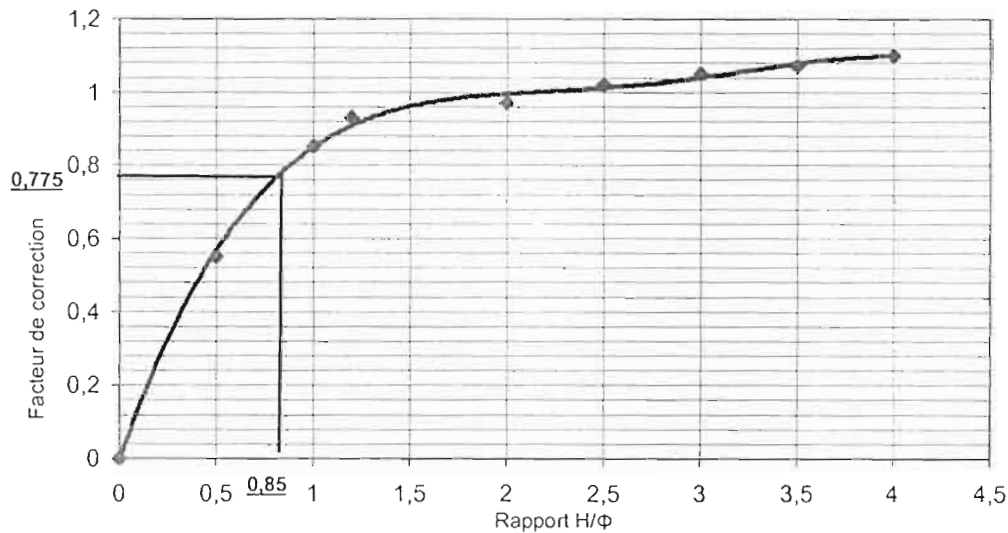


Fig. N°8. - Diagramme pour la correction des valeurs de contrainte

A la rupture de l'éprouvette, on note la force maximale appliquée appelée force de rupture.

### I-1-3- Résistances à la compression

La valeur de la résistance à la compression simple en bars est donnée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{S} = \frac{4 \times F}{\pi \times d^2}$$

où :

S est la section de l'éprouvette en  $\text{cm}^2$  ;

F est la force de rupture en kgf.

Les différents résultats obtenus pour la détermination des résistances à la compression sont récapitulés dans le tableau N°5.



Rc	0,62	1,2	1,9	2	2,06	2,2	2,16	2,2	2,17	2,25	2,48	2,51	2,95	4,42
Estat	83	130	130	143	150	200	200	318	344	417	444	588	625	775
Edyn	249	390	390	429	450	600	600	954	1032	1251	1332	1764	1875	2325

Tableau N°5 . - Récapitulatif des valeurs de résistances à la compression

#### I-1-4- Module d'Young

Les résultats enregistrés permettent de tracer des courbes contrainte-déformation. Celles-ci présentent l'allure générale suivante :

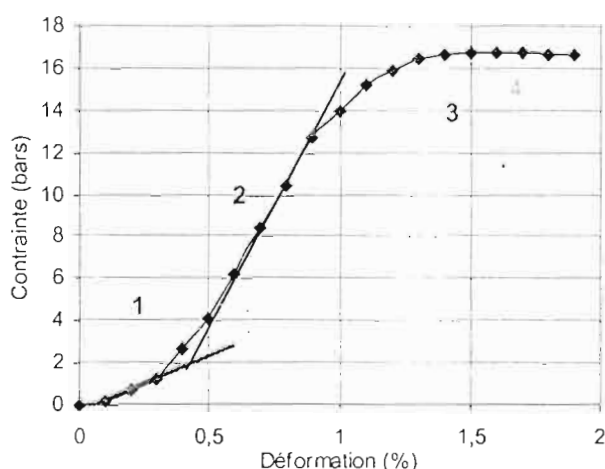


Fig N°9 - Allure générale des courbes contrainte-déformation

L'ensemble des courbes contrainte-déformation sont reportées à l'annexe N°3.

Leur analyse permet de distinguer quatre (4) phases de déformation :

- Une phase 1 à pente relativement faible due généralement à une réorganisation et à un resserrement des constituants granulaires.
- Une phase 2 de déformation à pente forte correspondant à la phase élastique de déformation linéaire où contraintes et déformations sont proportionnelles : c'est au niveau de cette phase que le module élastique tangent utilisé dans cette étude est calculé.
- Une phase 3 de déformation importante à pente faible correspondant à la phase plastique de déformation.

➤ Une dernière phase 4 correspondant à la phase de ruine de l'échantillon où on note une chute des contraintes due à la dissipation importante des vides créés par la ruine.

### I-2- Etablissement des corrélations

Pour l'établissement des corrélations entre les différentes caractéristiques, nous avons utilisé la méthode de la régression linéaire. Grâce aux résultats des différents essais, nous avons obtenu un nuage de points représentant des couples de valeurs CBR- $E_{dyn}$ . Les résultats se présentent comme suit (figure N° 10) :

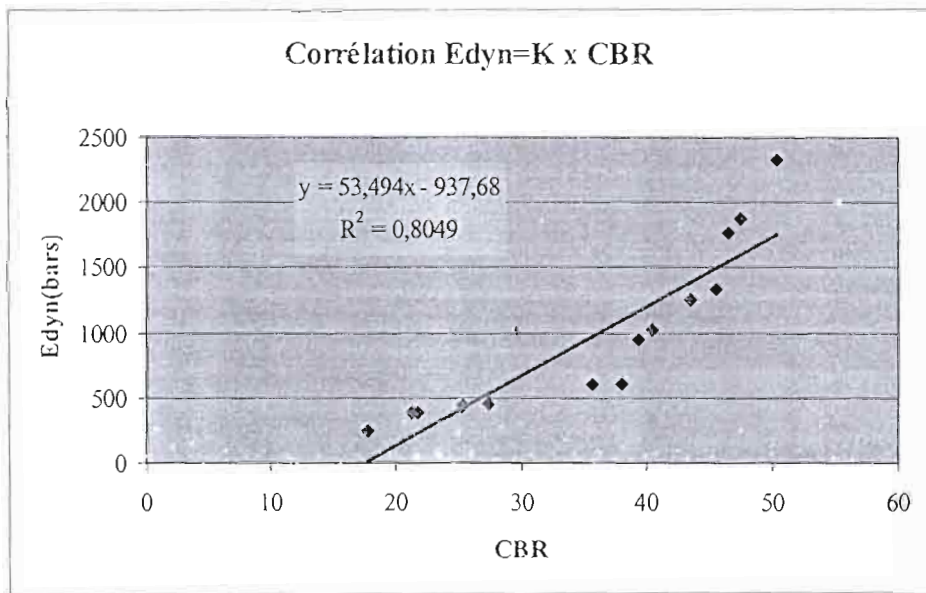


Fig N°10 – Relation entre  $E_{dyn}$  et CBR avec une régression linéaire

Nous avons ensuite recherché une courbe de tendance pour ce nuage de points. L'analyse de cette courbe montre que le module d'élasticité n'est pas proportionnel au CBR. Par ailleurs, l'équation de la courbe en question nous a permis de tirer la relation  $E_{dyn}$  (module utilisé dans le dimensionnement) en fonction du CBR. On obtient l'expression suivante (en bars) :

$$E_{dyn} = 53,494CBR - 937,68$$

avec un coefficient de corrélation  $R^2 \approx 0,8049$

La valeur du coefficient de corrélation obtenu n'étant pas satisfaisante, nous avons jugé bon d'essayer d'autres types de régression. C'est ainsi que nous avons obtenu un meilleur coefficient de corrélation avec la régression de type exponentielle.

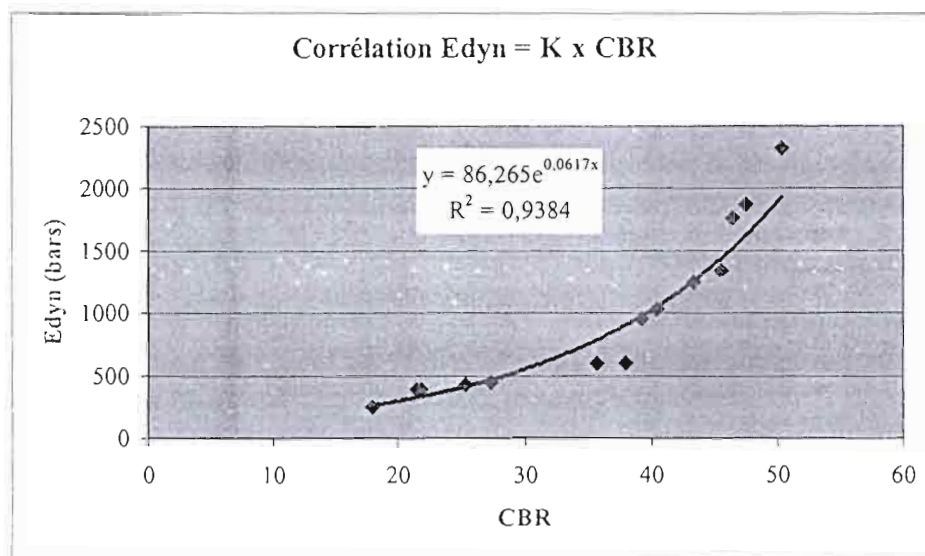


Fig N°11. – Relation entre  $E_{dyn}$  et CBR avec une régression exponentielle

L'expression trouvée cette fois-ci est satisfaisante puisque son coefficient de corrélation est plus proche de 1 que dans le cas de la régression linéaire. Cela prouve bien qu'il existe une relation entre le module d'élasticité dynamique et le CBR même si ce n'est pas une relation de proportionnalité. L'équation de la courbe obtenue nous permet de retenir la relation suivante :

$$E_{dyn} = 86e^{0,06CBR}$$

Avec E en bars.

Remarque :

La relation obtenue ci-dessus est appréciable pour des valeurs de résistance à la compression variant entre 1 et 4 bars environ.

### I-3 Comparaison de la relation trouvée avec celles proposées par les études antérieures

Le but de cette partie est de confronter les résultats obtenus avec notre relation avec les relations telles que  $E=50CBR$  et  $E=32CBR$ . Ces deux relations ont été retenues pour la

-----  
comparaison parce que la première est la plus utilisée et la dernière est le fruit d'une étude récente faite au Sénégal [3]. Les valeurs trouvées sont récapitulées dans le tableau ci-après :

$E_{dyn}=86 * e^{0,06CBR}$	252	311	318	392	445	732	841	909	977	1163	1319	1392	1487	1759
$E_{dyn}=32CBR$	573	685	698	810	877	1142	1216	1258	1296	1389	1456	1485	1520	1610
$E_{dyn}=50CBR$	895	1070	1090	1265	1370	1785	1900	1965	2025	2170	2275	2320	2375	2515

Tableau N°6 Valeurs obtenues avec les différentes relations

### Conclusion :

L'étude expérimentale a été faite dans le but de mieux caractériser le mélange recyclé revêtement + couche de base et de vérifier les relations empiriques (  $E= 50CBR$ ,  $E=100CBR$ , etc.) généralement utilisées dans le dimensionnement des structures routières.

Cette étude nous a permis de constater que les valeurs trouvées sont largement inférieures à celles résultant des relations  $E=50 CBR$  et  $E=32CBR$ .

En tout état de cause, les disparités entre les différents résultats ne nous permettent pas de faire une quelconque généralisation.

## CHAPITRE III : APPLICATION DU DIMENSIONNEMENT AU TRONÇON ROUTIER DIAMNIADIO-MBOUR

Dans cette partie, il s'agira d'évaluer l'influence du choix de la valeur du module d'élasticité du matériau recyclé sur le dimensionnement du tronçon considéré. Cette évaluation sera faite en utilisant le code de dimensionnement ECOROUTE® avec les considérations de notre étude puis celles prises en compte pour retenir la solution définitive du projet.

### I- PRESENTATION DU PROJET DIAMNIADIO-MBOUR

Le projet est intitulé : « Travaux de renforcement et d'élargissement de la route nationale N°1, Tronçon Diamniadio-Mbour ». Le linéaire d'intervention est constitué de deux parties : la première est relative aux zones de renforcement avec élargissement de la route existante avec maintien du tracé actuel et la seconde concerne les rectifications de tracé. La première partie est constituée de six sections mesurant au total 36.409 km. Les travaux à entreprendre sur cette partie sont :

- Débroussaillage et terrassements ;
- Recyclage de la chaussée actuelle par scarification, apport de matériaux et compactage ;
- Elargissement de la couche de fondation constituée par l'actuelle chaussée recyclée à 10.80m ;
- Construction d'une nouvelle couche de base de 20cm stabilisée à 3% de ciment ;
- Pose d'un tapis d'enrobés denses de 7cm d'épaisseur après une couche d'imprégnation + couche d'accrochage sur une largeur de 7.20m.

Les paramètres qui ont été pris en compte pour le dimensionnement sont les suivants :

- ❖ Le trafic : un trafic  $NE=7.10^6$  a été considéré ; il correspond à un trafic T4
- ❖ Le sol support : Son CBR a été pris égal à 20 ; il appartient à la catégorie S4 avec un module  $E = 1500$  bars

- ❖ La couche de fondation : Module  $E = 3\ 000$  bars
- ❖ La couche de base : Module = 15 000 bars
- ❖ Le béton bitumineux (Température équivalente de l'ordre de 30°C) :

Module = 15 000 bars

## II- DIMENSIONNEMENT DE LA CHAUSSEE

### II-1 Caractéristiques des matériaux

Pour la couche de fondation, en considérant un CBR de 50, nous obtenons un module d'élasticité  $E = 1\ 727$  bars en utilisant notre corrélation. Ce module étant différent du module considéré ci-dessus, nous avons jugé bon de faire des simulations avec le logiciel ECOROUTE® en faisant varier les modules d'élasticité des couches de base et de fondation. Pour ce faire, nous avons considéré les modules d'élasticité suivants :

- Couche de base :  $E = 15\ 000$  bars et  $E = 9\ 500$  bars (résultant des travaux de Bocar Malick MBOW [2] ).
- Couche de fondation :  $E = 3\ 000$  bars et  $E = 1\ 700$  bars (notre étude).

Puisque, nous ne disposons pas d'autres études réalisées sur les bétons bitumineux, nous allons utiliser la seule valeur donnée ci-dessus c'est-à-dire  $E = 13\ 000$  bars. Le module de la plate-forme sera  $E = 1\ 500$  bars.

En ce qui concerne les coefficients de Poisson, les valeurs suivantes ont été utilisées :  $\nu = 0.25$  pour la latérite ciment et  $\nu = 0.35$  pour les autres couches.

Ces différentes considérations sur les modules des matériaux nous ont permis d'avoir quatre cas de combinaisons qui sont :

#### CAS N°1 :

- Béton bitumineux :  $E = 13\ 000$  bars
- Couche de base :  $E = 15\ 000$  bars
- Couche de fondation :  $E = 3\ 000$  bars
- Plate-forme :  $E = 1\ 500$  bars

#### CAS N°2 :

- Béton bitumineux :  $E = 13\ 000$  bars
- Couche de base :  $E = 9\ 500$  bars
- Couche de fondation :  $E = 1\ 700$  bars
- Plate-forme :  $E = 1\ 500$  bars

CAS N°3 :

- Béton bitumineux :  $E = 13\ 000$  bars
- Couche de base :  $E = 15\ 000$  bars
- Couche de fondation :  $E = 1\ 700$  bars
- Plate-forme :  $E = 1\ 500$  bars

CAS N°4 :

- Béton bitumineux :  $E = 13\ 000$  bars
- Couche de base :  $E = 9\ 500$  bars
- Couche de fondation :  $E = 3\ 000$  bars
- Plate-forme :  $E = 1\ 500$  bars

## II-2 Calcul des limites admissibles

Les limites admissibles correspondent soit à une contrainte soit à une déformation selon l'assise considérée.

Pour la plate-forme et la couche de fondation (constituées de matériaux granulaires non liés), elles sont caractérisées par les contrainte  $\sigma_{z\ adm}$  et déformation  $\varepsilon_{z\ adm}$  verticales admissibles calculées à partir des formules suivantes :

$$\sigma_{z\ adm} = \frac{0,3 \times CBR}{1 + 0,7 \times \log N} \text{ en bars (Kerkoven et Dormon)}$$

$$\varepsilon_{z\ adm} = 2,8 \cdot 10^{-2} \times N^{-0,25} \text{ en mm (Loi de tassement de Shell).}$$

Pour la couche de base en graveleux-ciment, la limite admissible est caractérisée par la contrainte de traction par flexion  $\sigma_{t\ adm}$  à la base de la couche traitée exprimée par la relation :

$$\sigma_{t\ adm} = k_1 \times k_3 \times k_4 \times \sigma_i$$

$$\text{Si } \sigma_i \text{ est } \sigma_0 \text{ alors } k_1 = (1 - 6\beta) \times \frac{N^{-b}}{10};$$

$$\text{Si } \sigma_i \text{ est } \sigma_6 \text{ alors } k_1 = \frac{N^{-b}}{10};$$

$$\sigma_6 = (1 - 6\beta) \times \sigma_0$$

$\sigma_6$  est la contrainte de flexion pour  $10^6$  cycles ;

$\sigma_0$  est la contrainte de flexion pour un cycle ;

$\beta$  est la pente de la courbe de fatigue semi-logarithmique ;

$k_3$  est lié au risque supporté par la chaussée avec  $k_3 = 10^{-t \cdot b \cdot \delta}$  ;

$t$  est la fractile de la loi normale réduite centrée et est directement liée aux risques de dépassement du nombre de poids lourds ;

$b$  est la pente de la droite de fatigue bilogarithmique dans le domaine  $10^5$ - $10^6$  cycles

avec :  $b = 0,5 \times \log \frac{1 - 5\beta}{1 - 7\beta}$  ;

$\delta$  est l'écart type sur les épaisseurs en cm avec  $\delta = \sqrt{\delta_N^2 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 \times \delta_H^2}$  ;

$\delta_N$  est la dispersion de la fatigue ;

$\delta_H$  est la dispersion des épaisseurs ;

$c$  est le coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée ,  $c$  est de l'ordre de  $0,02 \text{ cm}^{-1}$  ;

$k_4 = 1,4$  est le coefficient de calage.

**NB** : la valeur de  $\sigma_6$  variant généralement entre 3,5 et 7,5 bars [7], nous avons utilisé une valeur de  $\sigma_6 = 5$  bars dans les calculs.

En ce qui concerne la limite admissible pour les couches de chaussée bitumineuses, on considère l'élongation par traction à leur base  $\varepsilon_{t \text{ adm}}$  donnée par la formule suivante :

$$\varepsilon_{t \text{ adm}} = \varepsilon_6 \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{0,5} \times \left(\frac{N}{10}\right)^{-b} \times k_r \times k_c \times k_s$$

$E_1$  est le module du matériau à la température équivalente de  $10^\circ\text{C}$  ;

$E_2$  est le module du matériau à la température équivalente du milieu d'utilisation (soit  $30^\circ\text{C}$  dans notre cas) ;

$N$  est le trafic pondéral de dimensionnement ;



$\epsilon_6$  est l'élongation admissible pour une fréquence de 25 Hz et une température de 10°C ;

$b$  est la pente de la loi de fatigue des matériaux ;

$kr$  est le coefficient qui ajuste la valeur de la déformation admissible au risque de calcul retenu  $kr = 10^{-\mu \cdot b \cdot \delta}$  ;

$\mu$  est la fractile de la loi normale réduite centrée et est directement liée au niveau de risque choisi en fonction du niveau de trafic et de la catégorie de route ;

$kc$  est le facteur de calage pour ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement réel observé des chaussées ;

$ks$  est le facteur de stabilité tenant compte des hétérogénéités locales de portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées.

La durée de vie du dimensionnement est de 15 ans.

Ces différentes expressions étant difficilement manipulables, nous avons eu recours à des feuilles de calcul Excel (annexe N°4 ) pour effectuer les opérations plus facilement. Ainsi, nous avons :

- pour le revêtement, une élongation  $\epsilon_{t \text{ adm}}$  en traction admissible de  $146,7 \cdot 10^{-6}$  mm ;
- pour la couche de base, une contrainte  $\sigma_{t \text{ adm}}$  de traction admissible de 4.43 bars ;
- pour la plate-forme,  $\sigma_z = 1,036$  bar et  $\epsilon_z = 544 \cdot 10^{-6}$  mm.

### II-3. - Vérification du dimensionnement

La démarche du dimensionnement rationnel impose qu'il soit procédé à une vérification des contraintes et déformations après le choix d'une structure. Comme structure de départ, nous avons considéré celle qui a été proposée par l'entreprise à savoir :

Revêtement : 7cm ; Couche base : 20 cm et couche de fondation : 35 cm.

Toutes les couches ont été supposées collées.

Les résultats des simulations sont consignés dans le tableau à la page suivante :

		Cas N°1	Cas N°2	Cas N°3	Cas N°4
Revêtement	H(cm)	7	7	7	7
	$\epsilon_t$ (mm)	$10,8.10^{-6}$	$34,7.10^{-6}$	$26,4.10^{-6}$	$36,6.10^{-6}$
Couche de base	H(cm)	30	15	15	15
	$\sigma_t$ (bar)	2,46	3,21	4,41	2,28
Couche de fondation H(cm)		35	15	25	15
Plate-forme	$\epsilon_z$ (mm)	$226,8.10^{-6}$	$482,6.10^{-6}$	$348.10^{-6}$	$477,9.10^{-6}$
Limites admissibles	$\epsilon_z$ (PF)	$544.10^{-6}$ mm			
	$\sigma_t$ (base)	4,43 bars			
	$\epsilon_t$ (rev)	$146,7.10^{-6}$ mm			

Tableau N°7 : Résultats du dimensionnement des différentes structures.

#### II-4- Analyse des résultats

L'analyse que nous proposons va se faire en comparaison avec les résultats du cas n°1 qui a été calculé à partir des paramètres pris en compte par l'entreprise.

Nous avons remarqué que la solution proposée par l'entreprise passe de façon très large. Nous avons alors utilisé des épaisseurs plus faibles afin de déterminer les épaisseurs minimales des différentes couches. Cela nous a permis d'obtenir des épaisseurs de 15 cm pour chacune des couches de base et de fondation.

Sur cette base, nous remarquons qu'en remplaçant le module d'élasticité de la couche de fondation par celui trouvé dans notre étude (cas n°3), nous remarquons une augmentation de l'épaisseur de la couche de fondation de 10 cm.

Par contre pour le cas n°2 ( $E_{base} = 9500$ bars et  $E_{fond} = 1700$ bars), nous remarquons que les épaisseurs (couches de base et fondation) ne changent pas.

Dans le dernier cas également, nous constatons une constance des épaisseurs des couches de base et de fondation et ce, malgré une diminution notable du module d'élasticité de la couche de base (de 15 000 à 9 500 bars); donc, on ne peut pas affirmer systématiquement que les épaisseurs des couches de chaussées augmentent lorsque les modules d'élasticité desdites couches diminuent.

En outre, nous avons procédé à des variations de coefficient de Poisson au cours de nos simulations. Par exemple, nous avons considéré un  $\nu = 0.35$  pour le revêtement et un

Ces résultats confirment davantage l'importance du choix du module d'élasticité dans un dimensionnement routier. Des choix fantaisistes ne peuvent que conduire à des résultats erronés qui réduiront la durée de vie de nos routes. Aussi, il faudra s'intéresser également au choix du coefficient de Poisson dans les dimensionnements.

Dans le cadre du projet Diamniadio-Mbour, nous suggérons que les valeurs suivantes soient considérées dans le dimensionnement :

- Béton bitumineux :  $E = 13\ 000$  bars  $\nu = 0,35$
- Couche de base :  $E = 9\ 500$  bars et  $\nu = 0,25$
- Couche de fondation :  $E = 1\ 700$  bars et  $\nu = 0,25$
- Plate-forme :  $E = 1\ 500$  bars et  $\nu = 0,25$

Cette suggestion a été faite en raison des valeurs des modules d'élasticité des couches de base et de fondation qui sont issues d'études récentes réalisées au Sénégal.

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

L'étude des corrélations a permis d'apprécier les valeurs des modules par rapport aux CBR du matériau. Avec la relation  $E_{dyn} = 86e^{0,06CBR}$  que nous avons trouvée, nous nous sommes rendu compte que la relation liant le module d'élasticité au CBR n'est pas linéaire comme le laissent paraître les relations empiriques généralement utilisées dans les dimensionnements routiers. Ces relations ne reflètent pas toujours la réalité, ce qui confirme bien les résultats des études similaires effectuées antérieurement.

Pour ce qui est de la variation des épaisseurs des couches de chaussées en fonction de leur module d'élasticité, nous avons remarqué que les épaisseurs n'augmentent pas toujours lorsque les modules diminuent. Aussi, les différentes simulations effectuées avec le code de dimensionnement ECOROUTE ® ont révélé que le choix du coefficient de Poisson est aussi important que celui du module d'élasticité.

La présente étude nous aura permis de mieux connaître le matériau issu du recyclage des couches de chaussées existantes. De nos jours où la latérite, matériau de base dans la construction routière dans les pays tropicaux, se raréfie de plus en plus, il est important voire urgent de multiplier les études de ce genre afin de maîtriser les caractéristiques des matériaux recyclés. En ce sens, nous pensons que les sujets suivants pourraient être étudiés au cours des prochaines études sur les matériaux recyclés :

- ✓ Etude des matériaux recyclés améliorés au ciment en vue leur utilisation en couche de base de chaussées ;
- ✓ Etude du coefficient de Poisson.

Ces études permettront à coup sûr :

- d'éviter les erreurs commises jusqu'ici sur le choix des paramètres d'élasticité de la latérite-ciment, erreurs qui ont le plus souvent influé sur la durée de vie de nos routes ;
- de promouvoir la notion de développement durable en limitant l'utilisation des ressources naturelles.

Nous ne saurions finir sans insister sur le fait que les résultats de ce travail ne peuvent pas être systématiquement généralisés à tous les cas de recyclage de matériaux. En effet, les conditions peuvent varier d'un chantier à l'autre à cause des épaisseurs du revêtement et de la

couche de base en place ainsi que les caractéristiques géotechniques de ces matériaux. Pour cela, nous proposons que pour chaque étude d'avant-projet, des essais soient effectués en vue de la détermination des valeurs réelles de chaque paramètre d'élasticité.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] Michel ZOHOU : Etude de la corrélation entre le module d'élasticité et l'indice de portance CBR dans le dimensionnement des structures routières : Applications aux graveleux latéritiques. (Projet de Fin d'Etudes 1991, Ecole Polytechnique de Thiès).

[2] Bocar Malick MBOW : Paramètres de rupture / caractéristiques élastiques de la latérite-ciment : influences sur le dimensionnement routier. application aux tronçons routiers thies-sindia et seo-diourbel (Mémoire de fin d'études 2002, Institut des Sciences de la Terre).

[3] Papa Diallo NDIAYE : Etude de la corrélation  $E=K.CBR$  – Influence du module d'élasticité comme paramètre d'entrée dans le code de dimensionnement routier ALIZE III® du LCPC : Application aux projets de renforcement des tronçons routiers Séo-Diourbel et Diamniadio-Mbour. (Mémoire de fin d'études 2001, Institut des Sciences de la Terre).

[4] Awa TOURE : Renforcement du tronçon routier Diamniadio-Mbour, cas particulier des changements de tracé. Evaluation de la rentabilité économique du projet. (Mémoire de fin d'études 2001, Institut des Sciences de la Terre).

[5] Guide de Construction Routière – Ministère de Transports du Québec (Octobre 1978).

[6] CEBTP : Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. (1984).

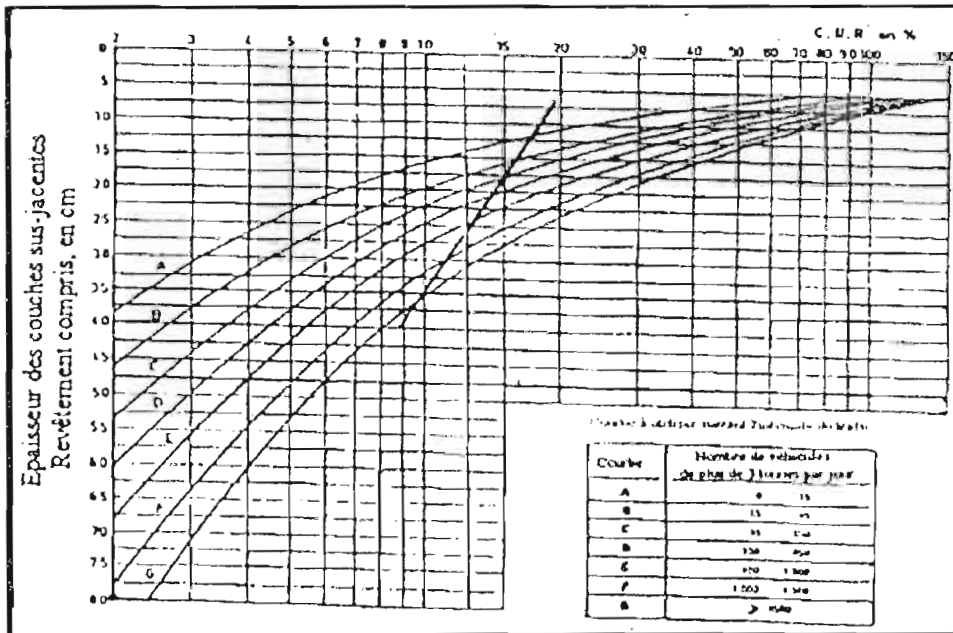
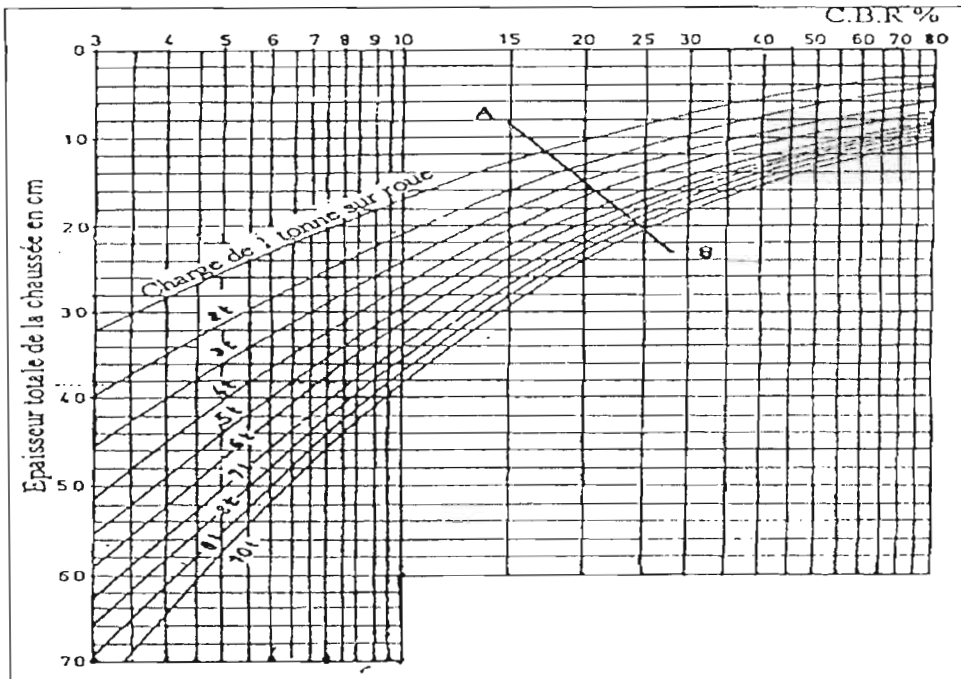
[7] Papa Sounkalo DOUMBIA : Traitement des graveleux latéritiques suite à une substitution des particules fines nuisibles dans l'optique de leur utilisation en couche de base de chaussée sous trafic lourd. (Projet de Fin d'Etudes 2002, Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès).

[8] LCPC-SETRA : Conception et dimensionnement des structures de chaussées. (Guide technique, Décembre 1994).

## ANNEXES

**ANNEXE N°1 :**  
ABAQUES DE DIMENSIONNEMENT PAR LA METHODE CBR





**ANNEXES N°2 :**  
**DIMENSIONS DU CORPS DE CHAUSSEE SELON LA METHODE DU**  
**CEBTP**

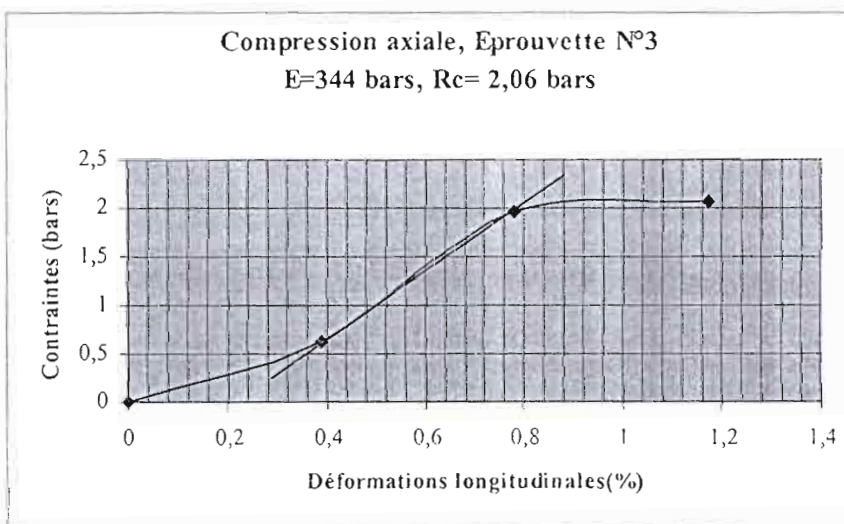
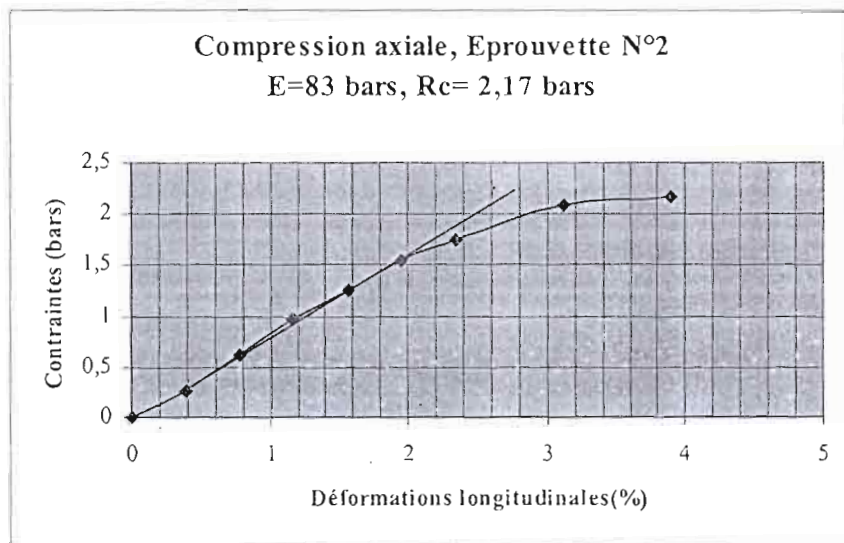
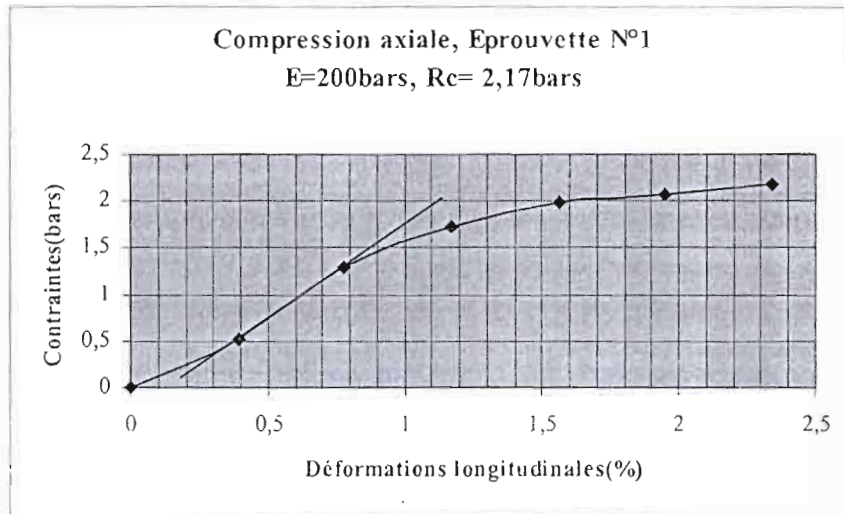
Classes de portance	Trafic T1		Trafic T2		Trafic T3		Trafic T4		Trafic T5	
	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base
S <sub>1</sub>	45	15	45	15	40	20	-	-	-	-
S <sub>2</sub>	35	15	35	15	30	20	-	-	-	-
S <sub>3</sub>	25	15	30	15	20	20	-	-	-	-
S <sub>4</sub>	15	15	20	15	15	20	-	-	-	-
S <sub>5</sub>	0	25	0	25	0	25	-	-	-	-

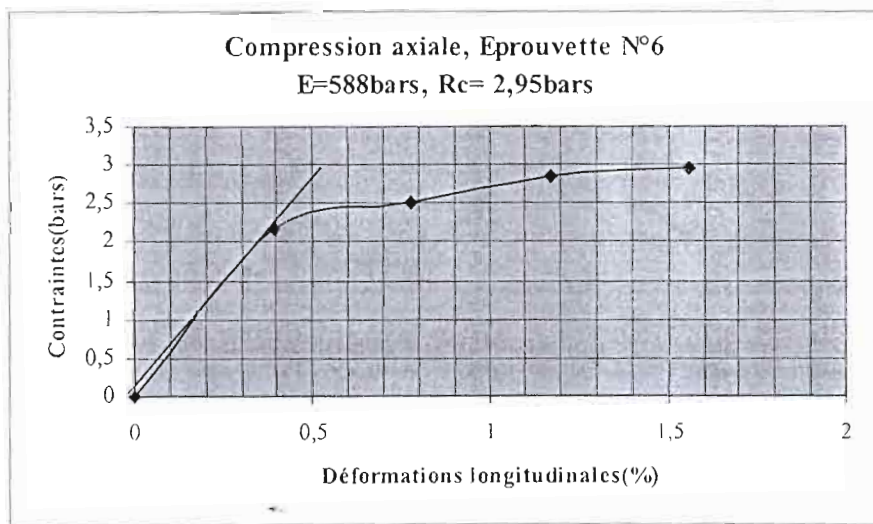
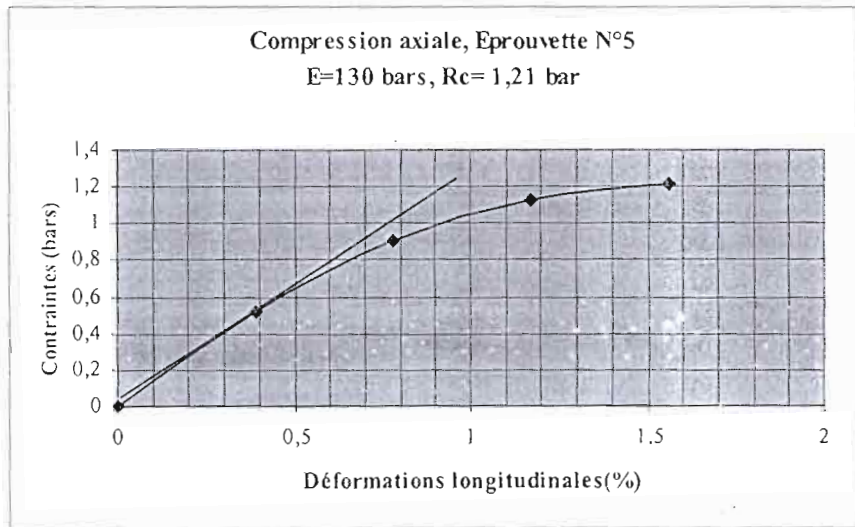
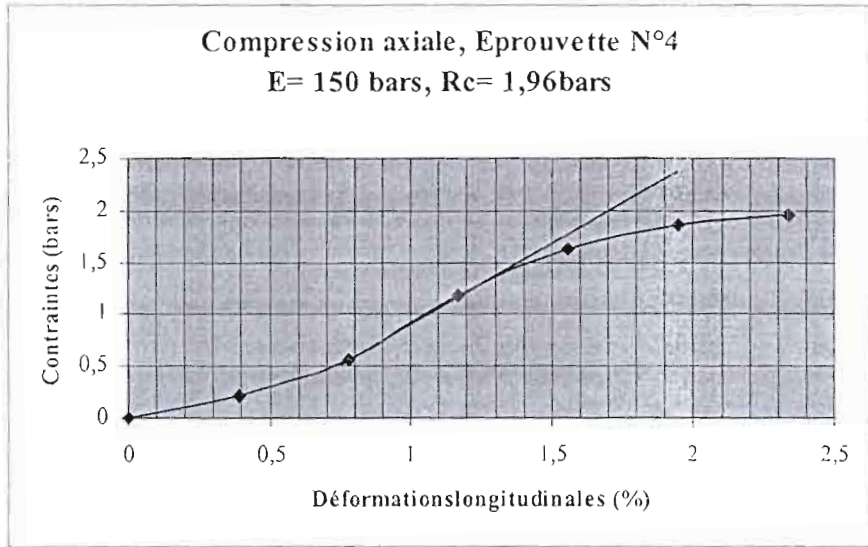
Dimensions du corps de chaussée en latérite crue selon le CEBTP

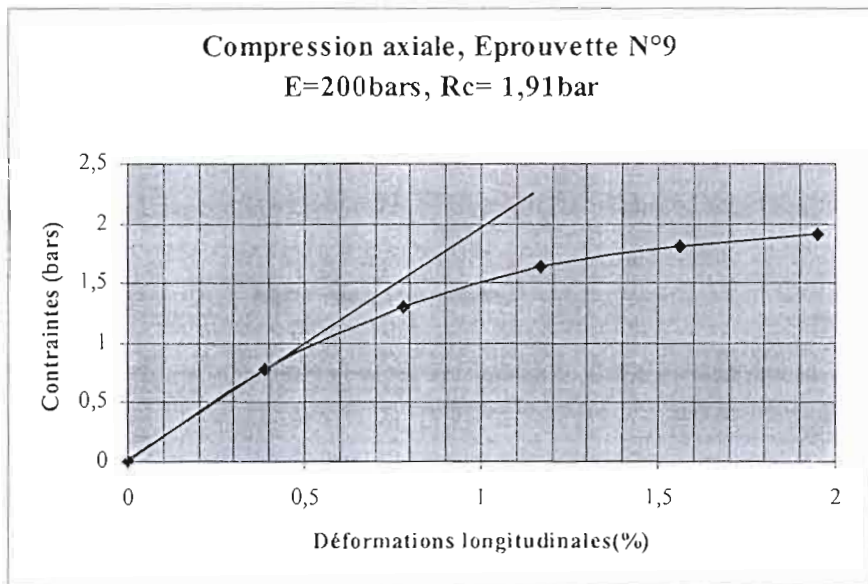
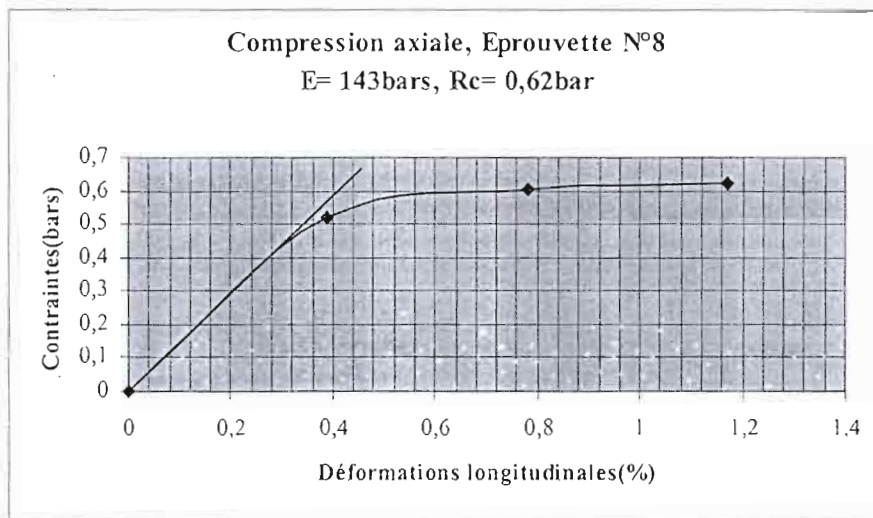
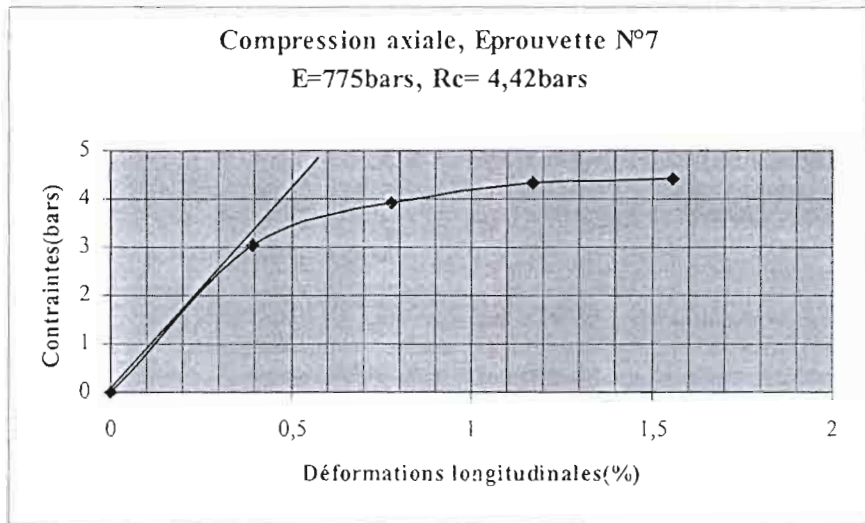
Classes de portance	Trafic T <sub>1</sub>		Trafic T <sub>2</sub>		Trafic T <sub>3</sub>		Trafic T <sub>4</sub>		Trafic T <sub>5</sub>	
	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base	Fondation	Base
S <sub>1</sub>	40	15	45	15	45	20	50	20	-	-
S <sub>2</sub>	30	15	35	15	25	20	30	20	35	22
S <sub>3</sub>	25	15	25	15	20	20	25	20	20	22
S <sub>4</sub>	15	15	20	15	15	20	20	20	25	22
S <sub>5</sub>	0	20	0	20	0	20	-	-	0	25

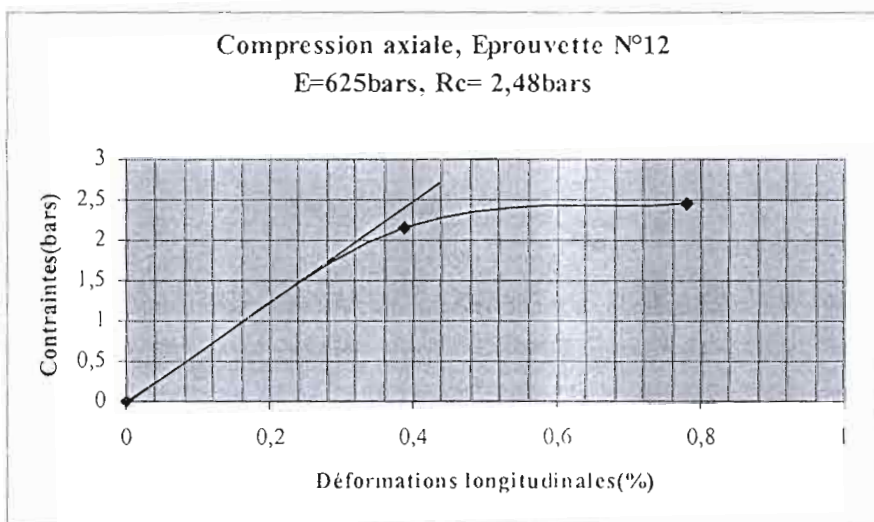
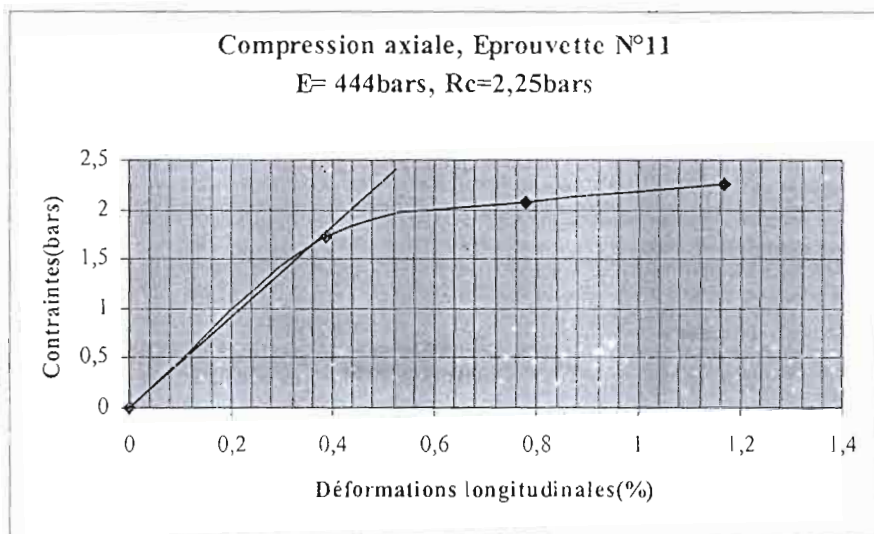
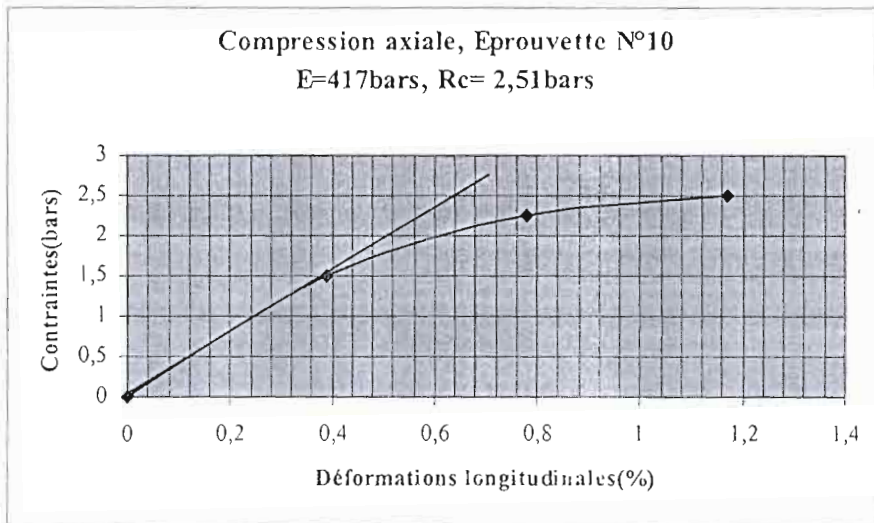
Dimensions du corps de chaussée en latérite-ciment selon le CEBTP

**ANNEXE N°3 :**  
**COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION**

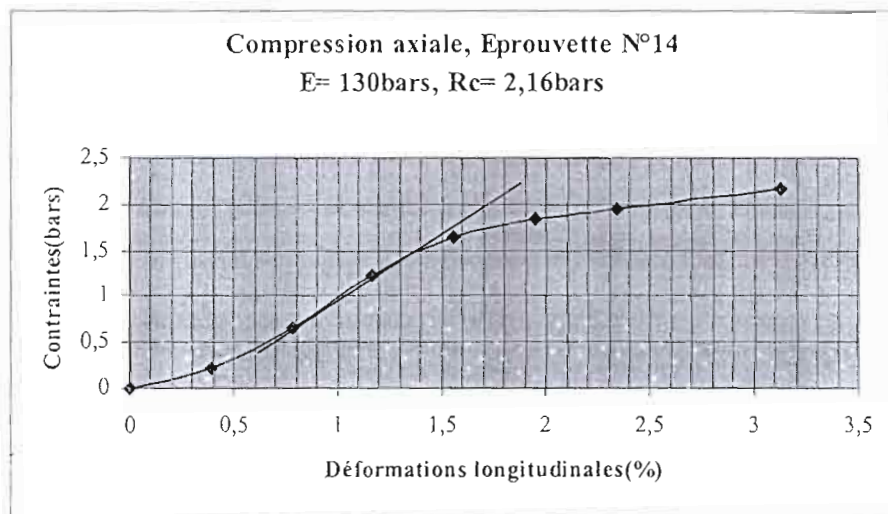
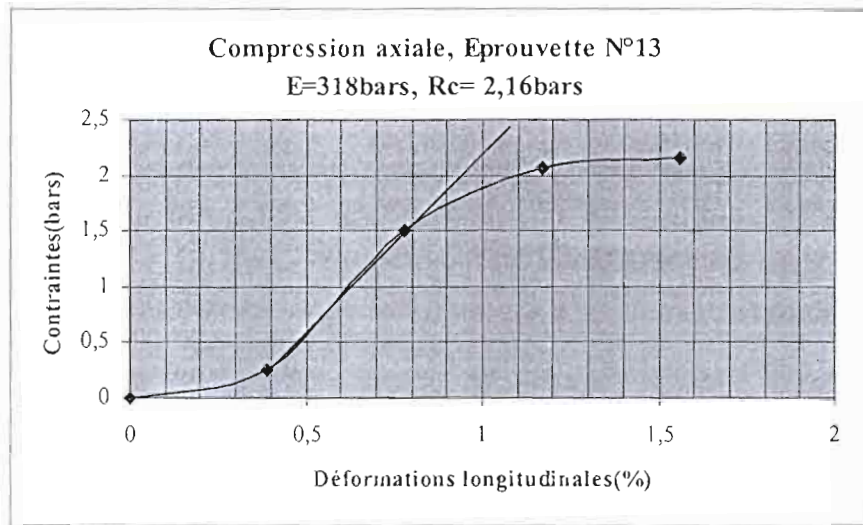












**ANNEXE N°4 :**  
**CALCUL DES LIMITES ADMISSIBLES**

<b>CALCULS DES LIMITES ADMISSIBLES POUR LE BETON BITUMINEUX</b>	
TRAFIC EQUIVALENT (million)	7 000 000
$E(10^{\circ}\text{C})$ (MPa)	7 200
$E(15^{\circ}\text{C})$ (MPa)	1 300
$\epsilon_6$ ( $10^{\circ}\text{C}; 25\text{Hz}$ ) ( $10^{-6}$ )	100
<i>pente de la droite de fatigue : b</i>	-0,2
<i>écart-type sur la loi de fatigue : sigma N</i>	0,25
<i>écart-type sur les épaisseurs : sigma H</i>	1
risque (%)	25
t	-0,674
coefficient $K_T$ (trafic) : $(N_{eq}/10^6)^b$	0,678
coefficient $K_t$ (température) : $(E(10^{\circ}\text{C})/E(15^{\circ}\text{C}))^{0,5}$	2,353
Delta	0,27
coefficient $K_r$ (risque)	0,920
coefficient $K_c$ (calage)	1,1
coefficient $1/K_s$ (rigidité de la couche support)	1,1
<b>EPSILON T admissible (<math>10^{-6}</math> mm)</b>	<b>146,7</b>
<b>EPSILON Z admissible (<math>10^{-6}</math> mm)</b>	<b>22,5</b>

<b>CALCULS DES LIMITES ADMISSIBLES POUR LA LATERITE-CIMENT</b>	
TRAFIC EQUIVALENT (million)	<b>7 000 000</b>
<i>Sigma 6 ( bars )</i>	5
<i>pente de la droite de fatigue : b</i>	-0,067
<i>écart-type sur la loi de fatigue : sigma N</i>	1
<i>écart-type sur les épaisseurs : sigma H</i>	3
risque ( % )	24
t	-0,706
coefficient KT (trafic) : $(N_{eq}/10^6)^b$	0,88
Delta	1,35
coefficient Kr (risque)	0,86
coefficient Kc (calage)	1,4
coefficient Kd (discontinuité)	1,0
coefficient 1/Ks (rigidité de la couche support)	1,2
<b>SIGMA admissible ( bars )</b>	<b>4,43</b>
<b>EPSILON Z admissible (10 E-6 mm)</b>	<b>16,9</b>