

ANALYSE DE LA PRATIQUE DU DIMENSIONNEMENT RATIONNEL DES STRUCTURES DE CHAUSSÉES AU SÉNÉGAL. INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE DANS LES CODES DE CALCUL POUR LE RENFORCEMENT DES CHAUSSÉES

Meïssa FALL, Enseignant-Chercheur,

Babacar SENGHOR, Ingénieur, Institut des Sciences de la Terre (IST), Faculté des Sciences et Techniques,
Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD),

Aly LAKHOUNE, Ingénieur et Coordinateur Technique,
Centre Expérimental de Recherches et d'Études pour l'Équipement (CEREEQ) de Dakar-Hann

INTRODUCTION

Le réseau routier sénégalais est constitué de 4 276 km de routes bitumées sur un linéaire total classé de 14 576 km. Plus de 70 % de ce réseau est affecté d'une dégradation très avancée, avec un âge qui est inférieur à 15 ans (Banque Mondiale, 1999). D'importants travaux de recherches sont menés sur le sujet, tout d'abord dans la caractérisation des matériaux mis en œuvre, ensuite sur les techniques de dimensionnement. Au Sénégal, comme d'ailleurs dans toute la zone inter-tropicale le matériau de construction routière de référence demeure la latérite. Un nombre impressionnant de travaux a été effectué sur ce matériau. La plupart des résultats obtenus est constituée de caractérisations physiques simples. Seules, ces caractéris-

tiques permettront de bien définir les cartes d'identité des graveleux latéritiques pour des applications dans le domaine routier. C'est le cas des méthodes de dimensionnement semi empiriques (méthode CBR, Steele, par exemples). Cependant, pour ce qui concerne le dimensionnement rationnel, la détermination des caractéristiques mécaniques des matériaux, notamment les paramètres élastiques est nécessaire. Les matériaux nouveaux identifiés depuis peu font l'objet d'une attention plus accrue, mais de la même manière que pour les graveleux latéritiques, les chercheurs et ingénieurs travaillant dans le domaine se heurtent au même problème d'identification et de caractérisation de ces derniers. Le Sénégal, à l'instar des pays de la CEDEAO (Communauté Économique des États de l'Afrique de l'Ouest) reste sans aucune normes de

conception et de dimensionnement en technique routière. Les seuls outils de référence demeurent les spécifications routières élaborées avant les indépendances par les divers Laboratoires du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP) affiliés pour la plupart au CEBTP (Centre d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics) français.

L'utilisation des méthodes dites « rationnelles » en technique routière au Sénégal date de très longtemps. Même si les techniques de dimensionnement utilisées dans le temps faisaient appel à des méthodes empiriques, la vérification des contraintes et des déformations s'est toujours fait par l'application des codes de calcul tels que Alizé III® ou Ecoroute® du LCPC. A l'heure actuelle, tous les bureaux d'études et les organismes gérant la construction routière utilisent essentiellement ces moyens pour le dimensionnement routier.

LE DIMENSIONNEMENT RATIONNEL DES STRUCTURES DE CHAUSSEE

Le dimensionnement routier fait appel à une méthode de calcul de l'épaisseur de la chaussée. Il consiste à évaluer le niveau de sollicitation de la structure et de déterminer les épaisseurs à donner aux différentes couches de la chaussée afin de réduire les contraintes et déformations à des valeurs admissibles pour un trafic donné (MARTINEZ, 1982 et 1990). Le dimensionnement consiste en la mise en œuvre d'un système qui, à partir des paramètres d'entrée (trafic, type de structure et de plate forme) fournit les paramètres de sortie (épaisseurs) recherchés. Sous l'optique du chercheur (MARTINEZ, 1990), les phases ci-dessous restent couplées ; les progrès réalisés dans les méthodes de dimensionnement des structures, impliquent une meilleure connaissance de leur fonctionnement mécanique répercutée sur la conception de celles-ci. Par exemple, la connaissance précise des efforts dans les couches permet la définition des performances attendues des matériaux constitutifs et la rationalisation du choix de ceux-ci.

POSITION DU PROBLÈME

La charge est supposée uniformément répartie sur une ou plusieurs empreintes circulaires. Dans le cas de l'essai « légal » sénégalais, on obtient la schématisation de la figure 1.

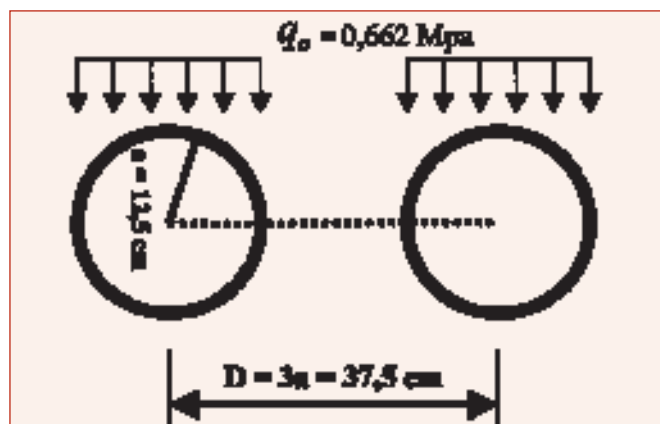


Figure 1 : Principe d'application du chargement.

MODÉLISATION DE L'ANCIENNE CHAUSSEE

Au Sénégal, dans la grande majorité des cas, l'ancienne chaussée sera modélisée selon les représentations des figures 2 et 3. Dans le cas du tri couche, la couche de base est le plus souvent un matériau traité *in situ*, ne présentant pas de caractéristiques mécaniques très élevées, surtout lorsqu'elle a subi les agressions du trafic pendant plusieurs années.

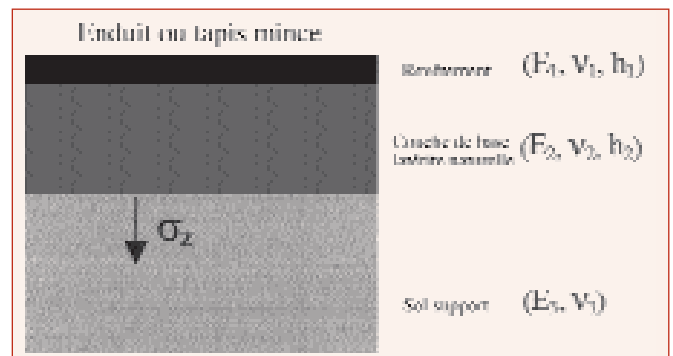


Figure 2 : Modélisation de la structure sans renforcement.

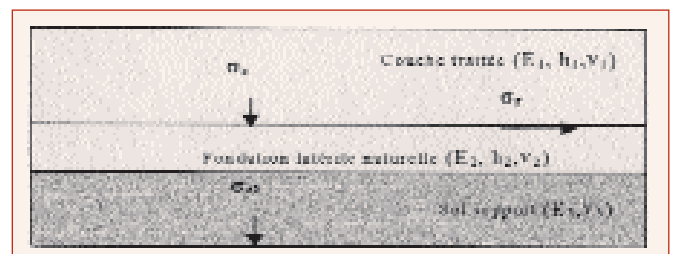


Figure 3 : Modélisation de l'ancienne chaussée.

LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

Les caractéristiques mécaniques retenues pour les matériaux dans le cadre de la modélisation par Alizé III® ou Ecoroute® sont le module d'Young, le coefficient de Poisson, et la résistance à la fatigue (LCPC, 1987). Les valeurs de ces paramètres sont définies à partir d'essais de laboratoire et de constatations expérimentales (AUTRET et al., 1982) :

- CBR pour les modules des sols supports et des matériaux granulaires,
- Courbe LCPC pour les coefficients de Poisson,
- le paramètre de rupture en fatigue est :
 - La contrainte de traction par flexion (σ_f) à la base de la couche pour les matériaux traités aux liants hydrauliques. La limite admissible est calculée pour un nombre de cycles donnés,
 - L'allongement relatif de traction par flexion (ϵ_f) de la couche pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés.

Au niveau du sol support, les limites admissibles sont déterminées à partir des formules suivantes :

– la contrainte est donnée par la relation de Kerkoven et Dormon (MARCHANDS et al., 1983)

$$\sigma_z = \frac{0,3 \times CBR}{1 + 0,7 \log N} \text{ en bars}$$

(N étant le trafic cumulé sur les deux sens et le CBR étant l'indice portant californien)

– le sol de plate-forme est supposé obéir à la loi de tassement de la Shell (MARCHAND et al., 1983)

$$\varepsilon_z = 2,8.10^{-2} \times N^{0,25} \text{ en mm}$$

DIMENSIONNEMENT OU RECHERCHE D'UNE ÉPAISSEUR OPTIMALE

La structure renforcée sera modélisée par référence aux caractéristiques de la chaussée ancienne, avec sa couche de renforcement (E_o , h_o). La modélisation d'une telle structure, aboutit à la détermination d'une contrainte pour les graves (améliorées au ciment ou non) et d'un allongement pour les matériaux hydrocarbonés (LCPC-SETRA, 1987). Pour aboutir à l'épaisseur h_o recherchée, on est conduit à répéter le même calcul pour différentes épaisseurs d'une couche, ce qui permet de tracer une courbe indiquant la variation de la contrainte en fonction de l'épaisseur corres-

pondant et de comparer les contraintes engendrées à la contrainte admissible (σ_{ad}).

APPLICATION ET INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE DU MODÈLE

Exemple de dimensionnement proposé

La figure 4 traduit les choix techniques opérés à la suite d'une étude de projet sur la RN 2 reliant deux grandes localités du Sénégal (DIAMNADIO et MBOUR). Il s'agit pour ce projet de renforcement d'élaborer un schéma de dimensionnement reposant essentiellement sur la vérification des contraintes et des déformations à partir de Alize III®. Les résultats obtenus montrent toute la complexité du problème ainsi posé. Il existe des zones à changements de tracé, ce qui constitue pour ainsi dire des structures neuves (donc à dimensionner autrement). Ainsi, pour tout ce linéaire, il existe des tronçons dimensionnés d'une part par des méthodes dites rationnelles et d'autre part des sections à dimensionner par des méthodes empiriques.

Les choix techniques opérés dans le cadre de cette étude relèvent essentiellement du sentiment et des certitudes des ingénieurs routiers chargés du projet, dans la mesure où aucune norme ou spécification n'est proposée par l'Etat du Sénégal pour le dimensionnement des structures routières.

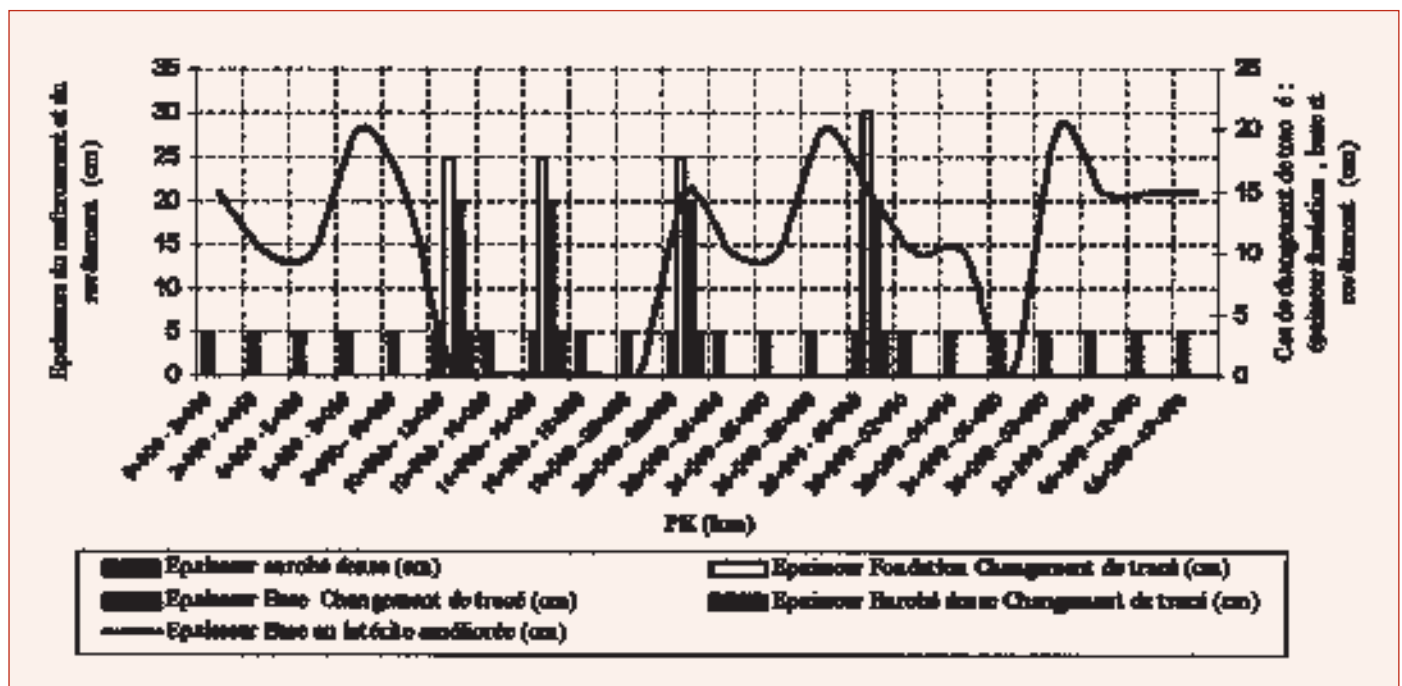


Figure 4 : Solution technique proposée pour le renforcement du tronçon Diamnadio - Mbour (RN 2).

INFLUENCE DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE SUR LE DIMENSIONNEMENT

Dans ce qui suit, il sera étudié l'influence des caractéristiques élastiques, ainsi que du type de liaison à l'interface des couches, dans la détermination des épaisseurs de renforcement, faisant l'objet du dimensionnement par Alizé III®. L'exemple pris dans le cadre de cette étude est le projet Banque Mondiale de renforcement de la RN 2

entre Thiés-Thiénaba/Séo-Diourbel. La mesure des déflexions traduite à la figure 5 a très largement justifié le choix du renforcement de l'axe Thiés-Diourbel. La figure 6 récapitule tous les choix techniques retenus pour ce projet. L'étude que nous proposons de faire se base essentiellement sur les travaux effectués pour le renforcement de ce tronçon routier. Pour cela, on va considérer les caractéristiques suivantes retenues au Sénégal pour le dimensionnement routier :

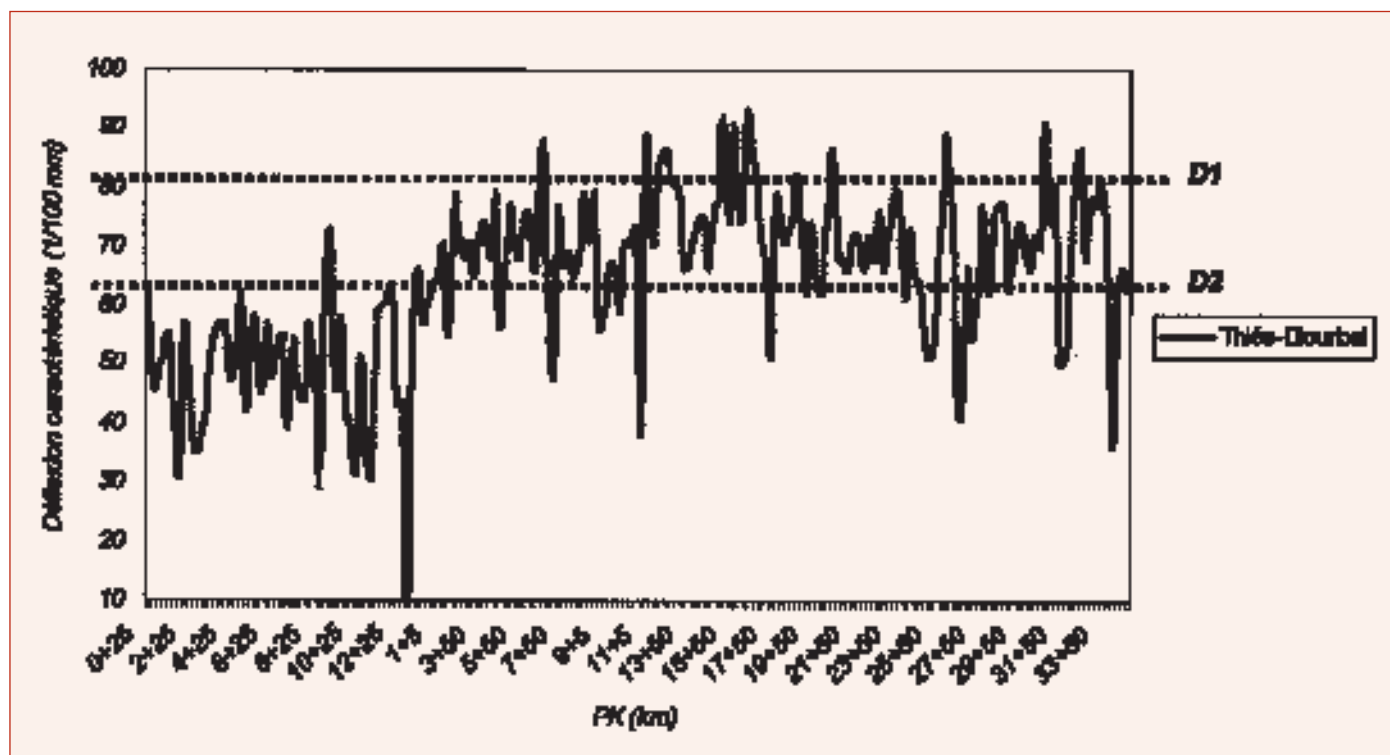


Figure 5 : Auscultation de la chaussée existante par la mesure des déflexions.

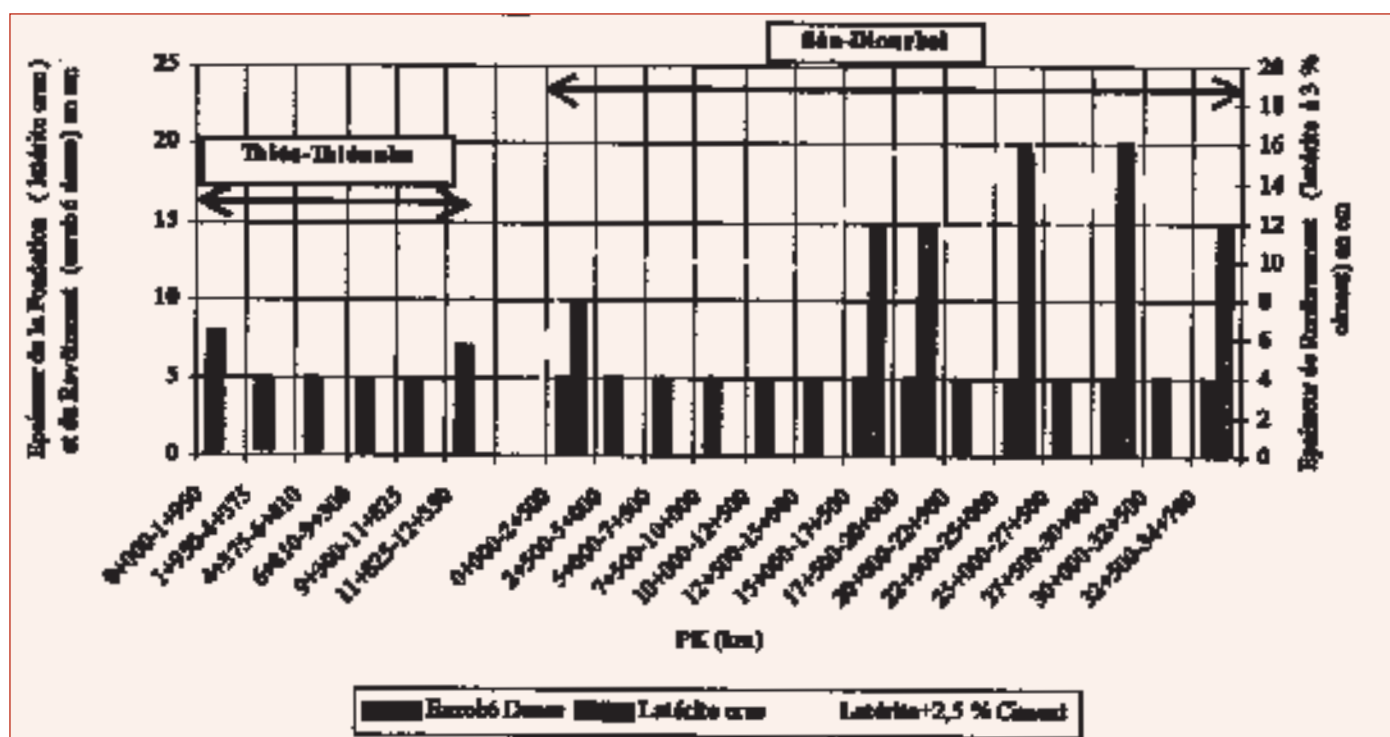


Figure 6 : Schéma technique proposé pour le renforcement du tronçon Thiés-Diourbel (RN1).

- Les modules de rigidité de la chaussée en place, de la couche de renforcement en latérite stabilisée au ciment et du revêtement en enrobé dense.
- Les coefficients de poisson du sol support et du revêtement.
- Et enfin le type de liaison à l'interface des différentes couches de chaussée.

Cette étude sera effectuée sur deux (2) sections très représentatives de l'itinéraire Thiès-Diourbel (RN 1). Il s'agit :
 – du PK 0 au PK 1+950 sur l'axe Thiès-Thiènaba,
 – du PK 22+500 au PK 25 sur l'axe Séo-Diourbel.

LE MODULE D'YOUNG

Ancienne chaussée

On va faire varier le module de la valeur minimale à celle maximale (à partir des mesures de déflexion) pour suivre l'évolution des contraintes et déformations et par la même occasion celle des épaisseurs de renforcement. Le tableau I donnent le domaine de variation des caractéristiques retenues dans le cadre de cette étude. Pour ces cas, toutes les interfaces entre les différentes couches seront considérées

TABLEAU I : Caractéristiques élastiques des différentes couches de chaussée.

	Du PK 0 au PK 1+925 Axe Thiès- Thiènaba	PK 22+500 au PK 25 Axe Séo- Diourbel
Enrobé dense	(35 000 ; 0,35)	(35 000 ; 0,35)
Latérite ciment	-	(15 000 ; 0,25)
Latérite crue	-	(3 750 ; 0,25)
Ancienne chaussée (min. et max.)	(3 729 ; 0,25) (15 381 ; 0,25)	(3 076 ; 0,25) (12 305 ; 0,25)
Sol de plate-forme	(900 ; 0,25)	(300 ; 0,25)

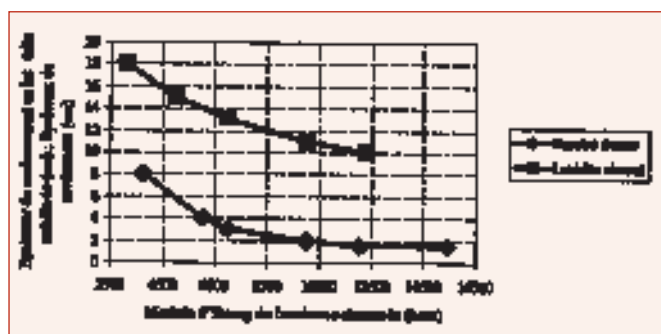


Figure 7 : Variation de l'épaisseur de renforcement en latérite ciment (Thiès-Thiènaba, PK 0-1+950) et du revêtement (Séo-Diourbel, PK 22+500+25) en fonction du module de l'ancienne chaussée.

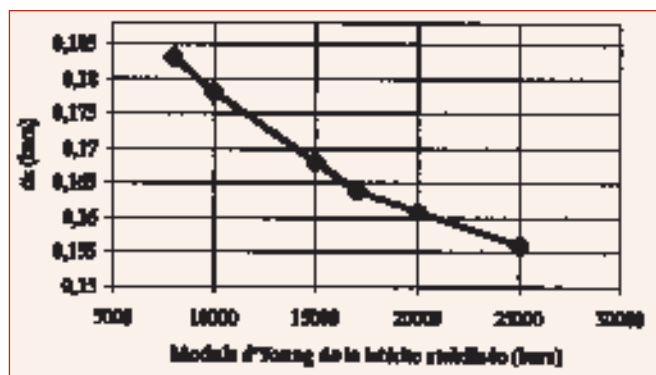


Figure 8 : Evolution de la contrainte verticale sur le sol support en fonction du module de la latérite ciment (Séo-Diourbel, PK 22+500-25).

comme collées. Les figures 7 et 8 expriment les résultats obtenus. La variation du module de l'ancienne chaussée de la valeur minimale à celle maximale (à partir des mesures de déflexion) entraîne une diminution de l'épaisseur de renforcement de l'enrobé dense de 75 % sur l'axe Thiès-Thiènaba et de 45 % celle de la latérite stabilisée sur Séo-Diourbel. En effet, une baisse des contraintes et déformations sur le sol support entraîne de la même manière la baisse de l'épaisseur minimale de renforcement nécessaire.

INFLUENCE DU MODULE DE LA LATÉRITE CIMENT

On va faire varier le module de la latérite ciment de 8 000 à 25 000 bars, pour suivre l'évolution de la contrainte verticale et de la déformation axiale sur sol support et de la contrainte de traction à la base de la couche traitée (figures 9 et 10). On remarque qu'une augmentation du module de la latérite stabilisée entraîne une diminution de la contrainte et de la déformation verticale sur le sol support, mais parallèlement, une augmentation de la contrainte de traction à la base de la couche en latérite ciment se manifeste. Cela se traduit en terme d'épaisseur de renforcement par le comportement de l'épaisseur de renforcement à la figure 11. La variation du module de la latérite ciment à une influence considérable sur l'épaisseur de renforcement. Sa variation de 10 000 à 20 000 bars se traduit par une chute de l'épaisseur de l'enrobé dense de 5 % et celle

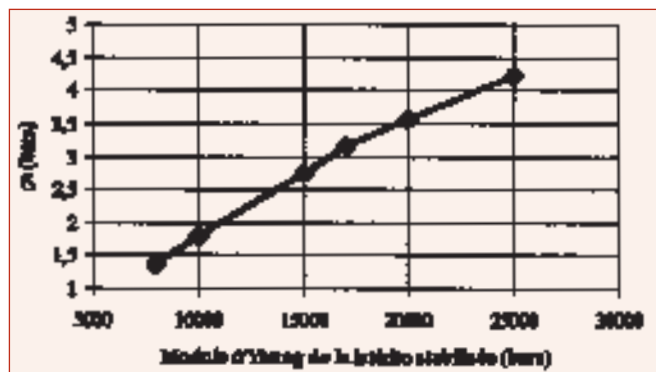


Figure 9 : Evolution de la contrainte de traction à la base de la couche de renforcement en fonction de son module (Séo-Diourbel, PK 22+500-25).

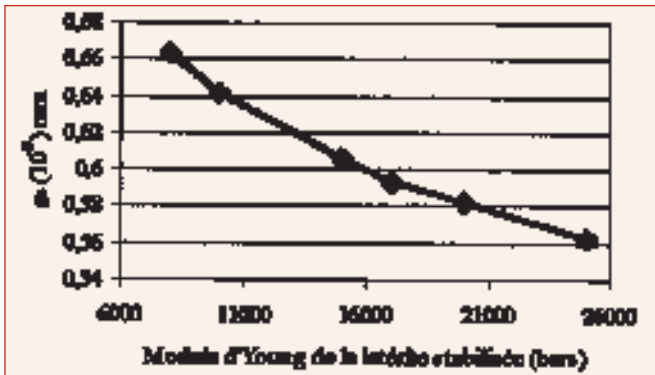


Figure 10 : Evolution de la déformation verticale du sol support en fonction du module de la latérite ciment (Séo-Diourbel, PK 22+500-25).

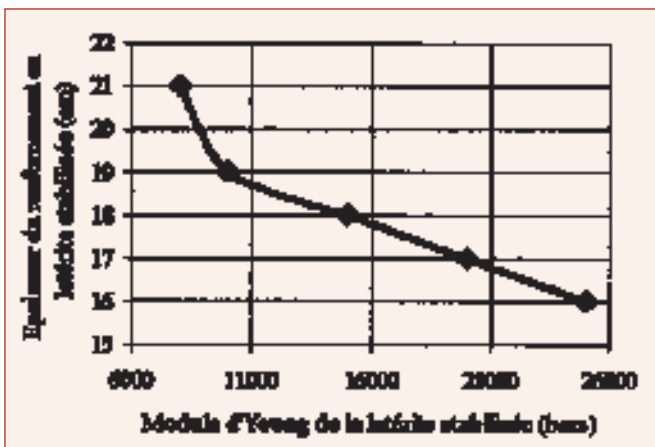


Figure 11 : Variation de l'épaisseur de renforcement en latérite ciment en fonction de son module (Séo-Diourbel, PK 22+500-25).

de la latérite ciment de 12 %. Il faut encore retenir que toutes les valeurs intermédiaires entre ces deux extrêmes peuvent être malencontreusement utilisées au Sénégal en l'absence de véritable outil de normalisation et de spécifications en techniques routières.

MODULE DE L'ENROBÉ DENSE

On considère ici le module de l'enrobé dense variant entre 35 000 et 55 000 bars (valeurs communément prises).

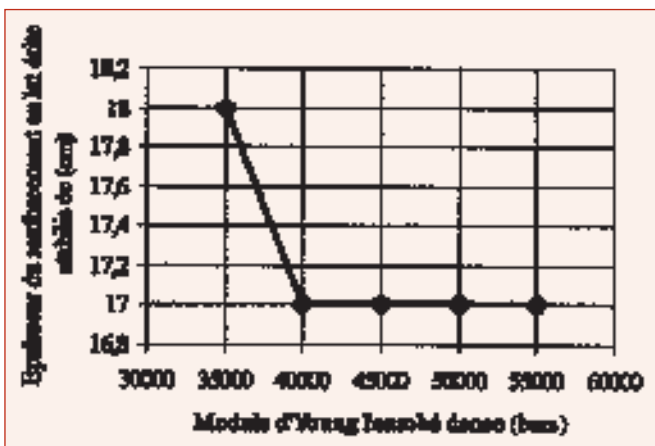


Figure 12 : Evolution de l'épaisseur de renforcement en latérite ciment en fonction du module de l'enrobé (Séo-Diourbel, PK 22+5-25).

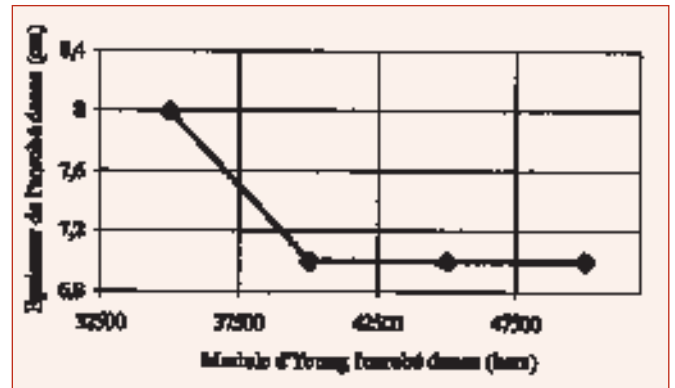


Figure 13 : Evolution de l'épaisseur de renforcement en enrobé dense en fonction de la variation de son.....

L'influence de celle-ci sur le renforcement et l'épaisseur du revêtement est traduite aux figures 12 et 13. La variation du module de l'enrobé influe faiblement sur l'épaisseur de renforcement. Néanmoins, une augmentation sensible de celui-ci aboutit à une réduction de l'épaisseur de renforcement. Sur les deux sections, on observe que l'épaisseur de renforcement se stabilise à partir d'une valeur de module égale à 40 000 bars.

LE COEFFICIENT DE POISSON (ν)

En ce qui concerne la latérite ciment, un coefficient de poisson de 0,25 est généralement fixé. Ceci reste valable pour la latérite naturelle. Dans cette partie, il sera étudié l'influence du coefficient de poisson du sol support ainsi que celle du revêtement sur l'épaisseur de renforcement.

SOL SUPPORT

Le coefficient de poisson du sol de plate-forme a une forte influence sur l'épaisseur de renforcement. En effet, sa variation de 0,25 à 0,50 fait passer d'une épaisseur de 8 cm d'enrobé dense à une épaisseur de 3 cm. Cependant la variation est faible pour un module compris entre 0,25 et 0,35 (figure 14).

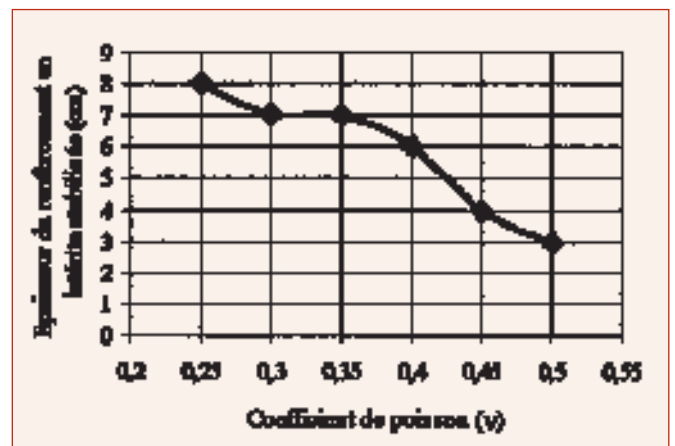


Figure 14 : Evolution de l'épaisseur de renforcement en enrobé dense en fonction du coefficient de poisson du sol support (Thiès-Thiënaba, PK 0-1+950).

ENROBÉ DENSE

Nous allons suivre l'évolution de la déformation verticale sur le revêtement en fonction de la variation du coefficient de poisson. Cette augmentation de la déformation verticale sur le revêtement se traduit en terme d'épaisseur de renforcement par une augmentation du coefficient de poisson de l'enrobé dense se traduisant à son tour par une augmentation de l'épaisseur de renforcement (figures 15 et 16).

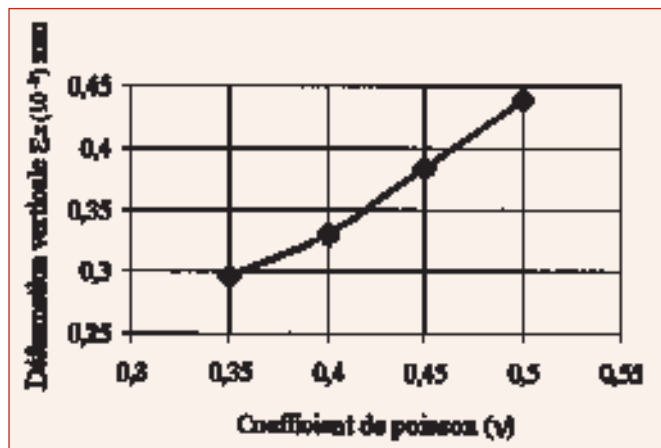


Figure 15 : Evolution de la déformation verticale de l'enrobé dense en fonction de son coefficient de poisson (Thiès-Thiènaba, PK 0-1+950).

L'INTERFACE

Le contact entre deux matériaux de même nature peut être considéré comme collé. C'est le cas de deux matériaux latéritiques qu'on superpose. Il n'en est pas de même pour un ancien revêtement sur lequel on pose une nouvelle base

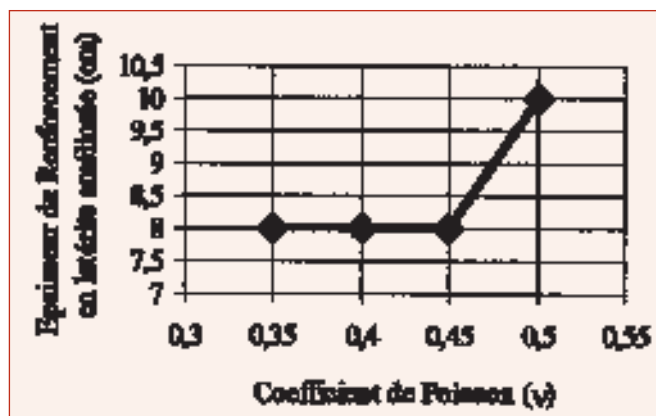


Figure 16 : Evolution de l'épaisseur de renforcement de l'enrobé dense en fonction de son coefficient de poisson (Thiès-Thiènaba, PK 0-1+950).

TABLEAU II : Evolution des contraintes et déformations en fonction de l'interface.

	σ_z (bars)	ϵ_z (10-3)	σ_t (bars)
Collé	0,168	0,606	2,75
Décollé	0,296	0,977	6,46
Rapport	76 %	61 %	135 %

en latérite ciment. L'influence du type d'interface décollée est dès lors assez importante (tableau II). Il apparaît une augmentation considérable des paramètres de rupture (qui ont presque doublé). En terme d'épaisseurs de renforcement, on passe ainsi de 18 à 26 cm de latérite ciment pour pallier à l'augmentation des contraintes et des déformations. D'où toute l'importance des précautions à prendre en compte pour assurer un bon accrochage entre l'ancienne chaussée et la nouvelle base.

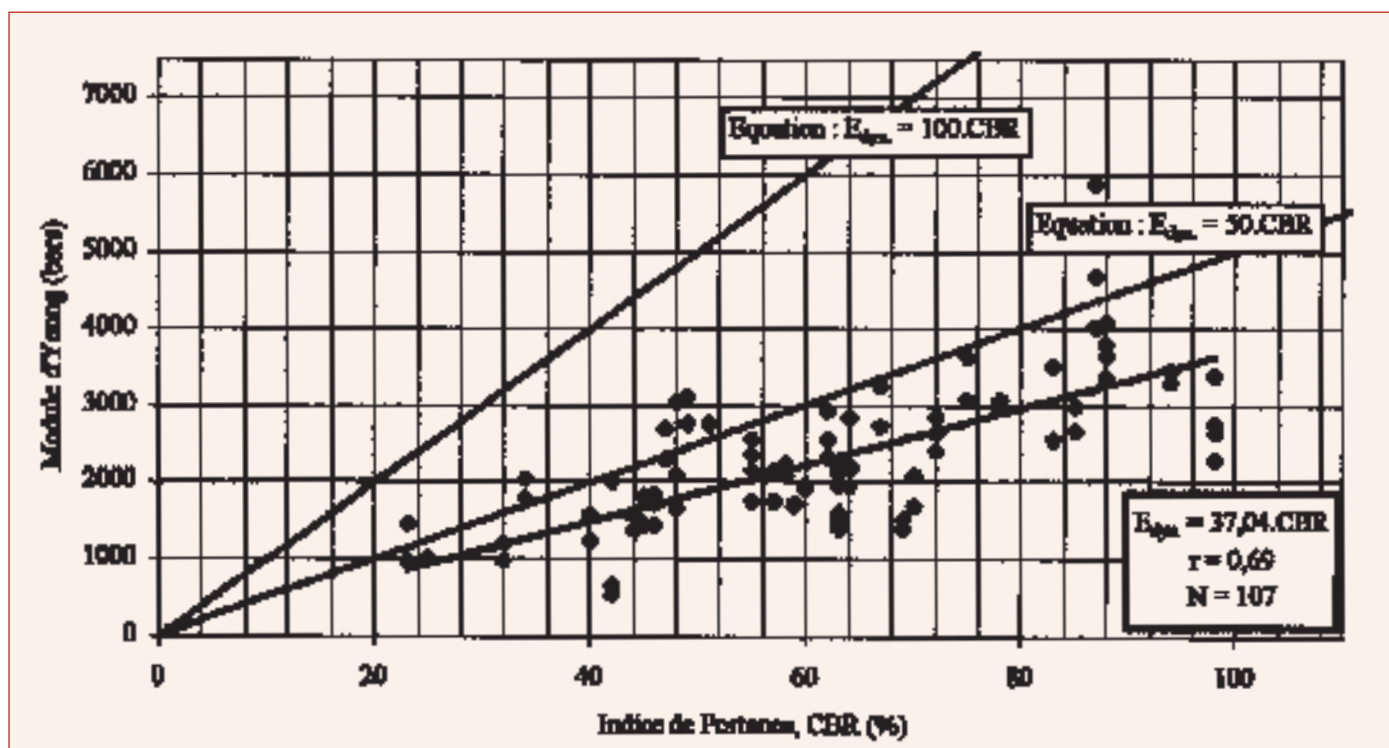


Figure 17 : Relation entre le module dynamique et le CBR.

MODULES DE LATÉRITE CRUE

Lorsqu'il s'agit de matériaux crus en couche de chaussée (fondation ou base), la caractérisation du module élastique est supposée faite par la relation suivante :

$$E = k \times CBR \text{ en bars } (50 < k < 100)$$

Les résultats obtenus à la figure 17 montrent un comportement assez différent de l'approximation ainsi utilisé.

INCIDENCE FINANCIÈRE

Dans cette partie, nous allons essayer de traduire en terme de coûts, l'influence des paramètres d'entrée sur le dimensionnement. Il faut signaler que cette étude est réalisée pour une section de 2 km (PK 22+500-25) sur le tronçon Séo-Diourbel. Elle est établie sur la base du devis des travaux de renforcement de la route Diamnadio-Mbour. La chaussée présente une largeur de 7 m et des accotements de 1,5 m de large. Cette étude portera sur 3 cas :

- Renforcement avec 10 cm de latérite ciment, obtenu avec le module maximal de l'ancienne chaussée (tableau III).

- Renforcement avec 18 cm de latérite ciment obtenu avec le module minimal et une interface collée (tableau IV).
- Renforcement avec 26 cm de latérite ciment obtenu avec une interface décollée (tableau V).

Cette étude montre qu'une variation des paramètres d'entrée peut avoir des répercussions considérables en terme de coûts (tableau VI). Le dimensionnement doit non seulement tenir compte de nos réalités économiques, mais aussi doit permettre une pérennisation de nos ouvrages routiers.

CONCLUSION

Les résultats de cette étude montrent toute l'importance qu'il faut accorder au choix des valeurs des paramètres d'entrée. En effet, un mauvais choix va se traduire par une durée de service généralement inférieure à celle fixée dans la phase de dimensionnement. L'introduction des méthodes de dimensionnement dites « rationnelles » s'est vite imposée au Sénégal et dans l'optique d'une meilleure optimisation des qualités routières, mais force est de croire que ces techniques requièrent des préalables qui sont essentiellement liés à une bonne acquisition des paramètres réels des matériaux (sol support et matériaux de chaussée). Rares

TABEAU III : Estimation du coût de la mise en œuvre de la latérite ciment pour un renforcement avec 10 cm.

Renforcement avec 10 cm de latérite-ciment (1 franc CFA = 100 francs français)

	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Fourniture et mise en œuvre de latérite pour couche de base et accotements améliorés au ciment	m ³	2 000	8 000	16 000 000
Fourniture du ciment	T	180	95 000	17 100 000
Total				33 100 000

TABEAU IV : Coût de la mise en œuvre de la latérite ciment pour un renforcement avec 18 cm.

Renforcement avec 18 cm de latérite-ciment

	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Fourniture et mise en œuvre de latérite pour couche de base et accotements améliorés au ciment	m ³	3 600	8 000	28 800 000
Fourniture en ciment Portland	T	324	95 000	30 780 000
Total				59 580 000

TABEAU V : Estimation du coût de la mise en œuvre de la latérite ciment pour un renforcement avec 26 cm.

Renforcement avec 26 cm de latérite-ciment

	Unité	Quantité	Prix unitaire	Prix total
Fourniture et mise en œuvre de latérite pour couche de base et accotements améliorés au ciment	m ³	5 200	8 000	41 600 000
Fourniture du ciment	T	468	95 000	44 460 000
Total				86 060 000

TABLEAU VI : Récapitulatif des coûts de la latérite ciment.

Dimensionnement type (interfaces collées) et prise en compte du module minimal de l'ancienne chaussée	Dimensionnement avec prise en compte du module maximal de l'ancienne chaussée	Dimensionnement avec interfaces décollées
59 580 000	33 100 000	86 060 000
	- 44 %	+ 44 +

sont les projets initiés au Sénégal où un accent est réellement mis pour l'acquisition de ces informations capitales même si l'on remarque que tous les projets routiers (constructions neuves, renforcements, etc.) sont toujours dimensionnés à l'aide des codes de dimensionnement sus énumérés. La pratique de ces moyens de vérification des contraintes et des déformations devrait être mieux pensée.

Remerciements :

Les auteurs tiennent à remercier le CEREEQ pour avoir mis à notre disposition l'extraordinaire base de données routières dont il dispose. Nos remerciements s'adressent également au bureau d'études GIC (Groupement d'Ingénierie et de Construction) qui a bien voulu mettre à notre disposition les données de travaux routiers en cours d'exécution.

BIBLIOGRAPHIE

LIAUTAUD G. : La conception des corps de chaussée en zone tropicale, Annales de l'ITBTP, n°146 (1971).
MARTINEZ J. : Contribution au dimensionnement des chaussées souples. Comportement des matériaux et méthodes de calcul, Thèse Doctorat Ingénieur, INSA de Rennes, (1982).
MARTINEZ J. : Contribution au dimensionnement rationnel des structures de chaussées souples et inverses.

Comportement des graves non traitées et des sols supports, Thèse Doctorat Ingénieur Etat, Université Montpellier II (1990).

REMILLON A. : Les recherches routières entreprises en Afrique d'expression française. Application à la conception et au renforcement des chaussées économiques, Annales de l'ITBTP (1967).

FALL M. : Identification et caractérisation mécanique de trois graveleux latéritiques du Sénégal Occidental : Application au domaine routier, Thèse Doctorat INPL Nancy, (1993).

AUTRET P., de BOISSOUY A., MARCHANDS J.P. : Pratique d'Alize 3, 5^e Conférence Internationale sur le dimensionnement routier DELF (1982).

LCPC : Abaques bi couche Alize 3, Paris (1975).

MARCHANDS J.P. et al : Quelques formules utiles pour le calcul des chaussées sur petites calculatrices programmables. Bulletin de Liaison L.C.P.C n° 125, (1983).

LCPC : L'essai AASHO, Bulletin de Liaison L.C.P.C (1966).

LCPC-SETRA : Note pour l'utilisation d'Alize 3, (1987).

BCEOM-CEBTP : Manuel de dimensionnement des chaussées des pays tropicaux et désertiques, Tome 1, Edition Ministère Français Coop. et Développement (1974).

BCEOM-CEBTP : Manuel sur les routes dans les pays tropicaux et désertiques, Tomes 1.2.3, Edition Ministère Français Coop. et Développement (1984).

✉ Université Cheikh Anta Diop de Dakar
Faculté des Sciences et Techniques
Institut des Sciences de la Terre
B.P. 15 685
Dakar-Fann - Sénégal
✉ meissaf@ucad.sn