

DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSEES

CAS DE L'AUTOROUTE URBAINE DE CASABLANCA

M. SAILOUHI : *Ingénieur d'étude et de contrôle CERIT/LPEE*

(*sailouhi@lpee.ma*)

Résumé :

Le dimensionnement d'une structure de chaussée routière consiste à déterminer la nature et l'épaisseur des couches qui la constituent afin qu'elle puisse résister aux diverses agressions auxquelles elle sera soumise tout au long de sa vie.

Le trafic et l'influence des conditions climatiques seront exposés avant d'aborder le modèle mécanique utilisé et la détermination des sollicitations admissibles. En outre, les résultats de l'étude de dimensionnement de l'autoroute urbaine de Casablanca sont précisés à la fin de chaque chapitre.

Mots-clés: Chaussée, fatigue, trafic, température équivalente, déformation admissible

1. TRAFIC

Les sollicitations mécaniques prises en compte pour le dimensionnement des chaussées proviennent des charges de trafic. Le trafic qui est pris en compte pour le dimensionnement est le trafic poids lourds dont l'effet sur la chaussée est non négligeable. Le passage d'un poids lourd sur une chaussée provoque un endommagement élémentaire qui, cumulé, la dégradent progressivement. Cet endommagement dépend bien entendu des caractéristiques de l'essieu qui sollicite la chaussée et il est donc utile de choisir un essieu de référence.

On définit l'agressivité d'un essieu par le nombre de passages de l'essieu de référence qui conduit au même

endommagement qu'un passage de l'essieu considéré.

Notant par D (respectivement d) le dommage élémentaire associé à une contrainte σ qui correspond à un essieu de charge P (respectivement σ_0 qui correspond à l'essieu de référence). En utilisant la loi de fatigue, on trouve

$$D = d \times \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Il est bien sûr tentant de transformer cette relation en une relation de la forme

$$D = d \times \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Rappelant les lois mises en évidence par l'essai AASHO. Cela est possible quant les contraintes sont proportionnelles aux poids.

Ainsi, l'agressivité A de l'essieu de charge P est donnée par la formule :

$$A = \frac{D}{d} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Cette relation est essentiellement valable pour les essieux isolés, car pour les essieux tandem et tridem, il faut tenir compte de la superposition des essieux. Pour ces essieux, on obtient une bonne approximation entre l'agressivité et la charge en écrivant :

$$A = K \times \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Les équivalences précédentes permettent de convertir en un nombre cumulé NE de passages d'essieux de référence, le spectre du trafic réel constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieux différentes. L'essieu de référence est l'essieu isolé à roues jumelées de 13 t.

Le nombre NE est fonction :

- de la moyenne journalière annuelle MJA du trafic à la mise en service, qui tient en compte la répartition probable du trafic entre voies (dans le cas d'une chaussée à voies séparées)

- du taux de croissance τ pendant la durée initiale de calcul,
- de la composition du trafic (distribution des natures d'essieux et des charges à l'essieu),
- de la nature de la structure de chaussée.

Il est calculé par la relation :

$$NE = MJA \times 365 \times \left[\frac{(1 + \tau)^p - 1}{\tau} \right] \times CAM$$

Où CAM est l'agressivité moyenne des poids lourds par rapport à l'essieu de référence

Dans le cas de l'autoroute urbaine de Casablanca, le tableau 1 présente le nombre d'essieux de référence par section

Section	MJA	NE voie lente	NE voie rapide
Route d'Eljadida – échangeur Médiouna	70 000	6,02 10 ⁶	4,05 10 ⁶
Ech. Médiouna- éch. Route Ouled Ziane	112 500	9,67 10 ⁶	6,45 10 ⁶
éch. Route Ouled Ziane-éch. Tit Mellal	89 000	7,67 10 ⁶	5,10 10 ⁶

Tableau 1 : nombre d'essieux de référence

Un pourcentage de poids lourds de 40%, un CAM de 0.149, une durée de vie de 10 ans avec un accroissement de 6%, un trafic équilibré par sens de circulation et la voie lente supporte 60% du trafic sont

les hypothèses prises pour le calcul de NE.

2. L'ENVIRONNEMENT - DONNEES CLIMATIQUES

Les facteurs climatiques qui peuvent intervenir dans le dimensionnement des structures de chaussées sont principalement les précipitations et la température. En effet, l'état hydrique du sol support, influencé par les précipitations, joue un rôle majeur dans le comportement de la plate-forme. Il est pris en considération à travers la portance de la plate-forme correspondant à la situation la plus défavorable compte tenu du climat et des conditions de drainage. Par ailleurs, le comportement des matériaux traités au bitume dépend fortement de la température qui modifie profondément leurs propriétés. Par conséquent, les champs de contraintes et déformations sont fortement dépendants de la température. Pour le dimensionnement, il est donc nécessaire de choisir une température de calcul. Cette température, appelée température équivalente, est telle que la somme des dommages subis par la chaussée pendant une année, pour une distribution de températures donnée, soit égale au dommage que subirait la chaussée soumise au même trafic mais pour une température constante.

Pour calculer cette température équivalente, on fait appel à la loi de Miner qui régie le cumul des dommages

que subit un matériau sous l'effet de sollicitations répétées

Si pour un niveau de sollicitation ε_i , le nombre de cycles nécessaire pour mener la pièce à la rupture est N_i , le dommage produit par chaque chargement est

$$d_i = \frac{1}{N_i}$$

Compte tenu de la loi de fatigue du matériau, le dommage d_i créé par le passage d'une charge sur la structure à la température θ_i est :

$$d_i = \left[\frac{\varepsilon(\theta_i)}{\varepsilon_0(\theta_i)} \right]^{\frac{1}{b}}$$

Si t_i est le nombre de charges passées au cours d'une année sur la structure à la température θ_i , le dommage correspondant sera $t_i \times d_i$

La température équivalente découle ainsi de la relation :

$$d(\theta_{eq}) = \frac{\sum_i \left[\frac{\varepsilon(\theta_i)}{\varepsilon_0(\theta_i)} \right]^{\frac{1}{b}} \times t_i}{\sum_i t_i}$$

Le calcul de la température équivalente nécessite :

- la connaissance du rapport $\left[\frac{\varepsilon(\theta_i)}{\varepsilon_0(\theta_i)} \right]$
- l'histogramme annuel de la température

Pour le Maroc, on retient généralement les valeurs 19 ou 25°C.

$$\Delta^2 \phi(r, z) = 0$$

3. MODELE MECANIQUE DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement d'une chaussée consiste tout d'abord à apprécier le niveau de sollicitation engendré par la charge de référence, qui est un jumelage à roues simples, représenté par deux charges exerçant une pression uniformément répartie de 0,662 MPa sur 2 disques de 0,125 m de rayon, avec un entre-axe de 0,375 m. le niveau de sollicitation est évalué à l'aide d'un modèle mécanique permettant de déterminer les champs de contraintes et de déformations. Le modèle mécanique utilisé par la méthode française de dimensionnement est le modèle de Burmister, permettant de traiter le problème général de n couches avec des interfaces collées ou décollées reposant sur un sol infini de type Boussinesq.

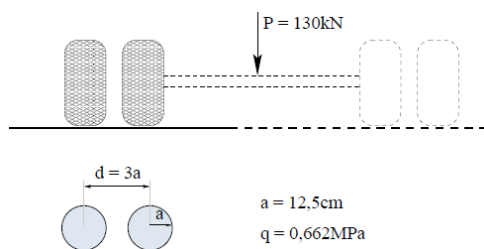


Figure 1 : charge de référence

En supposant que la charge est un cercle, ce qui facilite beaucoup le problème en le rendant axisymétrique, La résolution du problème d'élasticité en coordonnées cylindriques se réduit à la recherche d'une fonction de tension (ou de Love) $\Phi(r; z)$ à double Laplacien nul :

Les contraintes (σ_r , σ_z , σ_θ et τ_{rz}) et les déplacements (u suivant r et w suivant z) s'expriment simplement à partir des fonctions $\Phi(r, z)$.

Pour le problème de n couches, on recherche n fonctions définies, dans chacune des couches i par $\Delta^2 \Phi_i(r; z) = 0$ et par les conditions aux limites. En effectuant la transformation de Hankel qui associe à toute fonction $f(r, z)$, la fonction $f^*(m, z)$ définie par

$$f^*(m, z) = \int_0^{+\infty} r J_0(mr) f(r, z) dr$$

Les transformées satisferont ainsi l'équation :

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - m^2 \right)^2 \phi_i^*(m, z) = 0$$

Les solutions sont de la forme :

$$\phi_i^*(m, z) = y_i(m) \left[(A_i(m) + zB_i(m))e^{mz} - (C_i(m) + zD_i(m))e^{-mz} \right]$$

Où $y_i(m)$ est une fonction arbitraire de m et $A_i(m)$, $B_i(m)$, $C_i(m)$, $D_i(m)$ sont déterminées par les $4n$ conditions aux limites du problème ($4(n-1)$ conditions aux $n-1$ interfaces, 2 conditions à la surface et 2 à l'infini).

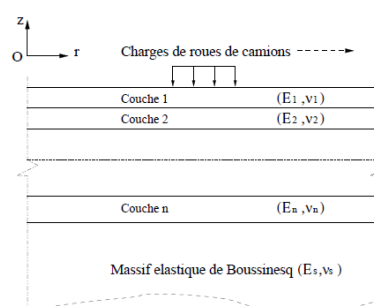


Figure 2 : schéma du modèle de Burmister

Le logiciel Alizé est utilisé pour la résolution numérique du problème des multicouches et permet une analyse complète des contraintes et déformations dans les structures de chaussée.

Dans le cas de l'autoroute urbaine de Casablanca, le modèle multicouche a tout d'abord été utilisé pour apprécier les caractéristiques résiduelles de la chaussée à renforcer. Ainsi pour chaque section homogène, le corps de chaussée existant a été modélisé en adoptant un système multicouche semi infini, et en affectant à chaque type de matériau un module de rigidité permettant d'atteindre le même ordre de grandeur des déflexions mesurées (75 mm/100). Pour la section du PK5+000/PK7+000& PK12+400/PK20+500 sens Rabat/Casa, la chaussée existante a été modélisée par deux couches d'enrobés, de 12 cm chacune avec une interface décollée, reposant sur une couche de grave non traitée, de 25 cm d'épaisseur. Les modules correspondant à chaque couche et permettant d'avoir la déflexion mesurée sont renseignés dans le tableau 2.

Couche	Module en MPa
1ère couche de l'enrobé	1000
2 ^{ème} couche de l'enrobé	2000
GNT	244
Sol-support	80

Tableau 2 : propriétés mécaniques de la chaussée existante

Matériaux	Module d'Young en MPa	Coefficient de poisson
EB	2500	0,35
GBB	4500	0,35
BBME	5500	0,35
EME	8500	0,35
GNA	360	0,35

Tableau 3 : Caractéristiques mécaniques des produits

Ensuite, le modèle multicouche a été employé pour le dimensionnement de la structure de renforcement et d'élargissement, ainsi, un calcul par le logiciel Alizé a été effectué pour différentes structures, en introduisant les caractéristiques mécaniques des matériaux figurant dans le tableau 3. Les déformations de traction à la base de la couche en GBB ou EME pour chaque structure sont données dans le tableau 4.

Structure (épaisseur en cm)	Déformation
Chassée existante +12cm GB + 6 EB	123.10 ⁻⁶
30GNA+8GB+12GB+6EB	103.10 ⁻⁶
Chassée existante +7EME+5BBME	125.10 ⁻⁶
30GNA+7EME+7EME+5BBME	100.10 ⁻⁶

Tableau 4 : déformations à la base de la couche de base.

4. SOLLICITATIONS ADMISSIBLES

Les valeurs des sollicitations admissibles dans les couches de chaussée sont déterminées à partir des caractéristiques

du comportement en fatigue des matériaux, du trafic cumulé et du risque de calcul. Un coefficient multiplicateur de "calage" est introduit pour corriger les écarts entre les prédictions tirées de la démarche de calcul et l'observation du comportement des chaussées.

a. Approche probabiliste et risque de calcul :

Dimensionner une structure de chaussée revient à vérifier que les valeurs de calcul des effets d'action restent inférieures aux résistances des matériaux. Or, ces valeurs sont rarement parfaitement connues et gardent toujours un caractère aléatoire. Ce qui conduit à raisonner en terme probabiliste. Vérifier une structure relève donc d'une analyse probabiliste incluant une probabilité de défaillance r qui doit nécessairement être acceptée. En d'autres termes, calculer une chaussée pour un risque r sur une période donnée, c'est la dimensionner pour que la probabilité de rupture pour N cycles soit au plus égale à r .

Les facteurs pris en considération pour tenir compte de ce caractère aléatoire des caractéristiques des matériaux et leur mise en œuvre sont la variation de l'épaisseur lors de l'exécution et la dispersion des résultats d'essais de fatigue.

On note par h_n l'épaisseur nominale et ε_0 la déformation qui lui correspond. En un point quelconque de la chaussée, l'épaisseur est donnée par :

$$h = h_n + \Delta h$$

Avec Δh varie de façon aléatoire, si Δh n'est pas trop grand, le logarithme de la déformation ε en varie linéairement avec la variation aléatoire de l'épaisseur, d'une pente c de l'ordre de $0,02 \text{ cm}^{-1}$ soit une formule du type :

$$\log(\varepsilon) = \log(\varepsilon_0) - c\Delta h$$

La courbe de la fatigue du matériau relie le nombre de cycles à la rupture au niveau de déformation :

$$\log N = -\frac{1}{b} [\log A - \log \varepsilon] + e$$

Où e est terme aléatoire de moyenne nulle qui est lié aux dispersions de qualité des matériaux. On aura donc :

$$\log N = -\frac{1}{b} [\log A - \log \varepsilon_0] - \frac{c}{b} \Delta h + e$$

$\log N$ est la somme d'une partie constante $\overline{\log N} = -\frac{1}{b} [\log A - \log \varepsilon_0]$ et une partie aléatoire $-\frac{c}{b} \Delta h + e$

Si on suppose en outre que :

- Δh suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type S_h
- e suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type S_N

Alors $\log N$ suit une loi normale de moyenne $\overline{\log N}$ et d'écart type :

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + \frac{c^2}{b^2} S_h^2}$$

Pour limiter le risque de rupture, il faudra adopter une valeur de la déformation admissible telle que $\log NE$ est augmenté d'une valeur $-u\delta$, où la valeur de u , étant négative, est donnée par la table de la loi normale en fonction du risque considéré, on a donc :

$$\log N = \log NE - u\delta = -\frac{1}{b} [\log A - \log \varepsilon_{ad}]$$

Ainsi, la déformation limite, qui correspond à un risque de rupture de r , à prendre en compte dans les calculs est à multiplier par :

$$k_r = 10^{-u\delta b}$$

b. Sollicitations admissibles : cas des chaussées souples et bitumineuses épaisses

Les chaussées souples et bitumineuses épaisses sont dimensionnées en vérifiant les deux critères :

- l'allongement ε_t à la base des couches bitumineuses reste inférieur à une valeur admissible,
- la déformation verticale ε_z à la surface des couches non liées et du sol support est inférieure à une valeur limite.

Pour les matériaux non liés, il sera vérifié que l'orniérage reste inférieur à la valeur de la déformation verticale admissible suivante:

- chaussées à moyen et fort trafic

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,012x(NE)^{-0,222}$$

- chaussées à faible trafic

$$\varepsilon_{z,ad} = 0,016x(NE)^{-0,222}$$

Pour les matériaux traités aux liant hydrocarbonés, la valeur de la déformation admissible $\varepsilon_{t,ad}$ est donnée par la relation :

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) \left(\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})} \right)^{0,5} \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_r k_c k_s$$

Avec :

$\varepsilon(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$ = amplitude de la déformation qui provoquerait la rupture en fatigue par flexion de l'éprouvette trapézoïdale, en matériau bitumineux, au bout d'un million de cycles de chargement (rupture définie conventionnellement par une baisse de rigidité d'un facteur de 2)

$E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$ [resp. $E(10^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$] = norme du module complexe du matériau bitumineux évalué à 10°C , 10 Hz [resp. 15°C , 10 Hz]

NE = nombre d'essieux standards équivalents

b = pente de la droite de fatigue du matériau bitumineux

k_r = coefficient qui ajuste la valeur de la déformation horizontale admissible au risque de calcul retenu, en fonction des facteurs de dispersion

k_c = coefficient de calage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé sur chaussée



k_s = coefficient minorant tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de Les déformations admissibles de l'EME et de la GBB ont été calculées pour chaque niveau de trafics de l'autoroute urbaine de Casablanca et sont En comparant les déformations calculées et les allongements admissibles, les structures de renforcement et

portance d'une couche de faible rigidité supportant les couches liées. regroupées dans le tableau 5 il est à noter que le coefficient de calage k_c est de 1,3 pour la GBB et 1 pour l'EME, k_s et k_r sont pris égaux à l'unité ($r=50\%$). d'élargissement à retenir sont présentées dans le tableau 6.

Trafic (10^6)	6,02	4,05	9,67	6,45	7,67	5,10
$\epsilon_{T,ad}$ EME (10^{-6})	128	139	117	127	122	133
$\epsilon_{T,ad}$ GBB (10^{-6})	120	130	109	118	114	124

Tableau 5 : déformations admissibles de l'EME et de la GBB en fonction du trafic

	Solution classique	Solution variante
Structure de renforcement	12cm GBB+6 cm EB	7cm EME+5 cm BBME
Structure l'élargissement	30 cm GNA+8cm GBB+ 12cm GBB+6cm EB	30 cm GNA+7cm EME+7cm EME+5cm BBME

Tableau 6 : structure retenue au niveau PK5+000/PK10+400 sens Casa-Rabat et PK12+400/PK20+500 sens Rabat-Casa

5. CONCLUSION

Pour les forts trafics, la méthode de dimensionnement utilisée combine les apports de la mécanique rationnelle, les résultats d'essais de laboratoire sur l'endommagement en fatigue des matériaux de chaussée et les connaissances tirées de l'observation du comportement de chaussées réelles. Elle permet de dimensionner une structure pour une probabilité de rupture donnée, en limitant les déformations permanentes des matériaux non liés et

l'apparition de fissures de fatigue au niveau des couches en matériaux liés. Par ailleurs, une sélection adaptée des propriétés des constituants est nécessaire, afin de limiter l'apparition de dégradations qui ne font pas l'objet de vérification par calcul, en particulier, le problème de l'orniérage par fluage qui doit être abordé en pratique au stade de l'étude de formulation.

Pour le cas de l'autoroute urbaine de Casablanca, le recours à la loi de MINER sur le cumul des dommages a permis aussi de vérifier l'opportunité du phasage retenu pour la réalisation des travaux.