

# Proposition d'une nouvelle approche d'optimisation du dimensionnement des structures de chaussées par programmation mathématique

Jamel NEJI

École nationale des ingénieurs de Tunis

Mondher NEIFAR

École supérieure des sciences et techniques de Tunis

Hichem SMAOUI

École nationale des ingénieurs de Tunis

## RÉSUMÉ

Une nouvelle approche du dimensionnement des structures de chaussées, qui repose sur un algorithme de minimisation intégrant les exigences mécaniques classiques et un critère coût de structure, est proposée. Un problème d'optimisation non linéaire avec contraintes est ainsi posé et traité. Dans cette modélisation, la démarche suivie pour l'optimisation est fondée sur une méthode itérative de minimisation (méthode de Han Powell). Le programme Alizé III développé par le LCPC est adopté pour la modélisation mécanique de la structure de chaussées alors que, pour la modélisation des paramètres extérieurs, la démarche retenue est analogue à celle de l'approche française. Certaines caractéristiques sont ainsi déterminées de manière à adapter les calculs aux besoins spécifiques de la Tunisie.

Un nouveau programme de calcul de structures de chaussées est ainsi proposé et validé. Deux exemples de dimensionnement sont présentés. Le premier est un calcul comparatif relatif à une structure inverse tirée du guide de dimensionnement des chaussées du SETRA. Le second exemple est une comparaison avec le catalogue tunisien de dimensionnement des chaussées. Il est proposé d'utiliser progressivement le code de calcul présenté à la place du catalogue actuellement en vigueur en Tunisie.

**DOMAINE :** Route.

## ABSTRACT

*PROPOSAL FOR A NEW APPROACH TO OPTIMIZING PAVEMENT STRUCTURAL DESIGN BY MEANS OF MATHEMATICAL PROGRAMMING*

*A new approach to pavement structural design, which relies upon a minimization algorithm capable of incorporating both the classical set of mechanical requirements and a structural cost criterion, is proposed herein. A non-linear optimization problem including constraints has been laid out and then solved. In this modeling set-up, the optimization strategy employed is based on an iterative minimization method (the Han Powell method). The Alizé III program developed at the LCPC laboratory has been adopted in order to mechanically model the pavement structure, whereas for the modeling of exogenous parameters, the approach selected is analogous to that used in the French solution procedure. Certain characteristics are determined in this manner for the purpose of orienting computations to meet Tunisia's specific needs.*

*A new pavement structure computation program has been implemented and validated in this article. Two design examples are presented: the first consists of a comparative computation relative to an inverted structure extracted from the SETRA organization's pavement design guide, while the second example provides a comparison with the Tunisian pavement design catalogue. The authors also suggest gradually introducing the computation code currently applied in Tunisia.*

**FIELD:** Roads.

## INTRODUCTION

Si, pour les structures en général, des procédures d'optimisation sont d'ores et déjà établies et plus ou moins mises en application, les efforts alloués au cas particulier des structures de chaussées devraient être, à notre avis, davantage développés.

Dans un problème de dimensionnement de structures de chaussées, la solution recherchée doit répondre à des exigences liées aux quatre composantes essentielles suivantes : la nature et la disponibilité des matériaux, le climat, la nature du sol support et le trafic. Dans l'approche usuelle (cou-

rante), le dimensionnement est effectué couche par couche. En effet, les logiciels de dimensionnement des chaussées comme Alizé III [Autret, 1982, LCPC-SETRA, 1987 et 2003] et Écoroute [Choupas, 1993, Jeuffroy et Lambert, 1997], permettent de déterminer, à l'aide d'un modèle, les contraintes, les déformations et les déplacements de la structure de chaussées à différents niveaux d'observation. Ils assistent ainsi l'ingénieur, certes, dans sa recherche d'une structure satisfaisante. Toutefois, si le dimensionnement ainsi trouvé à l'aide d'Alizé III n'est pas forcément optimal, Écoroute a essayé de remédier à cette insuffisance en ajoutant l'option économique à son module CALCO. Cette option permet de se fixer deux couches de la structure, et d'en rechercher les épaisseurs optimales permettant de minimiser le coût de ces deux couches, et par conséquent le coût global de la structure, tout en respectant les critères mécaniques de stabilité de cette dernière. Ce programme explore des structures voisines d'une structure dite « de base » déterminée au préalable et affiche la ou les structures économiques si elles existent. De plus, l'utilisation de ces logiciels dans un pays comme la Tunisie nécessite leur adaptation au contexte spécifique de ce pays.

Dans la pratique, l'ingénieur procède par une répétition orientée de l'analyse mécanique, en comparant à chaque fois la contrainte maximale susceptible d'engendrer la rupture de la structure à la limite admissible du matériau considéré pour le trafic souhaité. En fait, la structure ainsi obtenue est optimisée selon le principe de la méthode des contraintes complètes (Fully Stressed Design), où certains éléments de la structure travaillent à leurs limites admissibles. L'atteinte de la rupture dépend alors des quantités de matériaux composant la structure elle-même, qui sont en relation directe avec les épaisseurs des différentes couches. Les faiblesses que présente cette procédure classique de dimensionnement sont les suivantes :

- la solution techniquement admissible ne coïncide pas forcément avec l'optimum économique car les prix unitaires des différentes couches ne sont pas les mêmes ;
- la conception n'est pas systématique et demande une bonne expérience de la part de l'ingénieur concepteur ;
- les capacités de calcul qu'offrent les ordinateurs ne sont pas pleinement exploitées.

Le présent travail a pour but de contribuer à l'amélioration de cette méthode classique de dimensionnement en proposant une nouvelle approche reposant sur un algorithme d'optimisation. Les critères d'optimisation adoptés sont : le critère mécanique classique (la réponse effective inférieure à la réponse admissible du matériau dans la structure) et le critère coût minimal de la structure en considérant toutes les couches de la structure de chaussées sans limite de nombre, alors que Écoroute, par exemple, n'en considère que deux.

Un nouveau code de calcul de structures de chaussées est ainsi proposé. Ce code permet de déterminer la solution mécaniquement admissible et économiquement optimale. La conception est systématique avec un ordinateur qui joue son plein rôle dans le dimensionnement. Les premières réflexions des utilisateurs de ce programme laissent penser qu'il est à la fois convivial et facile d'utilisation.

Afin d'adapter ce programme aux besoins spécifiques de la Tunisie, certaines caractéristiques (telles que la température équivalente) ont été déterminées en se fondant sur l'approche française de dimensionnement des structures de chaussées.

Une comparaison avec le catalogue tunisien des structures de chaussées est présentée afin de tester la possibilité de remplacer ce dernier par le code de calcul présenté.

## **POSITION DU PROBLÈME**

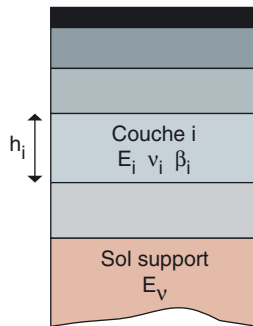
Le problème du dimensionnement optimal des structures de chaussées peut être formulé en tant que problème d'optimisation non linéaire avec contraintes [Hadj Kacem, 2002 ; Bah El Hadj, 1998].

Tout problème d'optimisation de ce type nécessite la définition de la fonction « objectif », qui sera l'objet de l'optimisation, et des contraintes que les variables de conception doivent satisfaire.

Dans le cas présent du dimensionnement des structures de chaussées, le coût de la structure représente un critère pertinent d'optimisation. Ainsi pour une structure de chaussées composée de « n » couches reposant sur un sol support (Fig. 1), la fonction « objectif » s'écrit :

$$f(H) = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot h_i$$

où,  $\beta_i$  est le prix unitaire au  $m^2$ , pour une épaisseur unitaire, de la couche  $i$ , et  $H$  est un vecteur de dimension  $n$  dont les composantes sont les épaisseurs  $h_i$  des différentes couches.



■ Fig. 1  
Schéma d'une structure de chaussées multicouche.

Les contraintes du problème sont, d'une part des limites de résistance à la fatigue et, d'autre part, des contraintes techniques de mise en œuvre (épaisseurs minimale et maximale de chaque couche). Ainsi, le problème peut se formuler comme suit :

Trouver le vecteur  $H$  de  $\mathbb{R}^n$  tel que :

$$\begin{cases} f(H) = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot h_i = \min f(X); \\ X \in \mathbb{R}^n \\ \xi_i(H) \leq \xi_i^{\text{adm}}, \forall i = 1, \dots, n \\ h_i^{\text{min}} \leq h_i \leq h_i^{\text{max}}, \forall i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

où

- $\xi_i$  : est la contrainte  $\sigma_i$  ou la déformation  $\varepsilon_i$  dans la couche  $i$  ;
- $\xi_i^{\text{adm}}$  : est la contrainte admissible  $\sigma_i^{\text{adm}}$  ou la déformation admissible  $\varepsilon_i^{\text{adm}}$  dans la couche  $i$  ;
- $h_i^{\text{min}}$  et  $h_i^{\text{max}}$  : sont respectivement les épaisseurs minimale et maximale de la couche  $i$  permises par les dispositions constructives.

Il s'agit donc d'un problème d'optimisation d'une fonction « objectif » linéaire avec des contraintes non linéaires et implicites fonctions des variables de conception.

## MODÉLISATION DU PROBLÈME

### Méthode d'optimisation

La démarche suivie est fondée sur la méthode de Han Powell [Han, 1976], méthode itérative de la famille des méthodes quadratiques séquentielles (SQP) qui permettent de résoudre les problèmes de minimisation avec contraintes par approximations successives. Ces méthodes sont classées parmi les meilleures en ce qui concerne la résolution des problèmes non linéaires dont la fonction « objectif » et les fonctions contraintes sont quelconques et deux fois continûment différentiables. Il est démontré que ces méthodes sont toujours convergentes avec une convergence super-linéaire [Ritter, 1973 ; Fukushima, 1973 ; Dennis et Moré, 1974 ; Han, 1976]. Cependant, ces méthodes peuvent converger vers un minimum qui n'est pas forcément global et ce dans le cas non convexe avec existence de minimums locaux multiples.

En général et d'après la pratique de l'optimisation des structures, les solutions optimales sont le plus souvent globales et, dans le cas contraire, le coût de l'optimum local est très proche de celui de l'optimum global. En effet, la méthode SQP a été classée comme la meilleure par Schittowski [Schittowski, 1980 ; Ragsdell, 1984] qui a pris en compte dans ses critères de classement la convergence globale en plus de l'efficacité et de la fiabilité.

Il existe d'ailleurs d'autres algorithmes capables d'aboutir systématiquement à l'optimum global [Hajela, 1990 ; Le Riche et Haftka, 1995 ; Liu et al., 2000 ; Soremekun et al., 2001]. Un nouveau programme utilisant ces algorithmes est en cours de développement.

Pour le problème d'optimisation (1), à l'itération 0, le vecteur inconnue H est initialisé au vecteur  $H^{\max}$  dont les composantes sont les épaisseurs maximales  $h_i^{\max}$  des différentes couches de la structure de chaussées considérée. Chaque itération (k) consiste à déterminer le vecteur  $H^{k+1}$ . Cette détermination est effectuée suivant une direction optimale  $d^k$  solution du problème d'optimisation quadratique avec contraintes suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left[ \frac{1}{2} (d^k)^T B^k d^k + [\text{gradf}(H^k)] \bullet d^k \right] \\ \left[ [-\text{grad}\xi(H^k)] d^k \right]_i - \xi_i^{\text{adm}} + \xi_i(H^k) \geq 0, \text{ pour } i = 1, \dots, n \\ d_i^k + h_i - h_i^{\max} \geq 0, \text{ pour } i = 1, \dots, n \\ -d_i^k + h_i^{\max} - h_i \geq 0, \text{ pour } i = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (2)$$

où  $B^k$  est une approximation du Hessien du Lagrangien. Ce dernier est le double gradient de la fonction de Lagrange définie pour le problème (1) par :

$$L(H, \lambda) = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot h_i + \sum_{i=1}^n \lambda_i [\xi_i(H) - \xi_i^{\text{adm}}] + \sum_{i=n+1}^{2n} \lambda_i (h_{i-n}^{\min} - h_{i-n}) + \sum_{i=2n+1}^{3n} \lambda_i (h_{i-2n} - h_{i-2n}^{\max}) \quad (3)$$

Le vecteur dual  $\lambda$  de  $\mathbb{R}^{3n}$  est déterminé à chaque itération. Le vecteur  $\lambda^{k+1}$  déterminé à l'itération (k) est le vecteur dual de  $d^k$  de la programmation quadratique.

À l'itération (0), la matrice  $B^k$  est initialisée à la matrice identité. À la fin de l'itération (k), cette matrice est mise à jour selon la formule modifiée de BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb et Shanno) suivante :

$$B^{k+1} = B^k - \frac{B^k p_k p_k^T B^k}{p_k^T B^k p_k} + \frac{r_k r_k^T}{p_k^T r_k} \quad (4)$$

où

$$p_k = H^{k+1} - H^k \quad (5)$$

$$r_k = \theta_k q_k + (1 - \theta_k) B_k p_k \quad (6)$$

avec

$$q_k = \text{grad}[L(H^{k+1}, \lambda^{k+1})] - \text{grad}[L(H^k, \lambda^{k+1})] \quad (7)$$

et

$$\theta_k = \begin{cases} 1 & \text{si } p_k^T q_k \geq 0, 2 p_k^T B_k p_k \\ \frac{0,8 p_k^T B_k p_k}{p_k^T B_k p_k - p_k^T q_k} & \text{si } p_k^T q_k < 0, 2 p_k^T B_k p_k \end{cases} \quad (8)$$

Le calcul du gradient du vecteur contrainte ou déformation  $\xi(H^k)$ , utilisé dans le programme quadratique, est effectué numériquement par l'approximation suivante :

$$\left[ \text{grad}[\xi(H^k)] \right]_i = \frac{\xi_i(h_1^k, \dots, h_i^k, \dots, h_n^k) - \xi_i(h_1^k, \dots, h_i^k - \Delta h_i, \dots, h_n^k)}{\Delta h_i} \quad (9)$$

avec  $\Delta h_i$  le pas d'épaisseur de la couche i.

Le programme Alizé III développé par le LCPC a été utilisé pour calculer les contraintes ou déformations  $\xi_i$ .

## Modélisation mécanique

La modélisation mécanique du problème de dimensionnement des structures de chaussées consiste à déterminer les contraintes et les déformations, pour un cas de chargement donné, dans les différentes couches de la structure.

Le programme Alizé III a été utilisé pour cette modélisation. Ce programme repose sur le modèle de Burmister qui suppose que la structure comprend plusieurs couches infinies en plan avec symétrie

de révolution autour de l'axe de la charge. Les matériaux composant la structure sont supposés avoir un comportement élastique, linéaire, homogène et isotrope.

## Modélisation des paramètres extérieurs

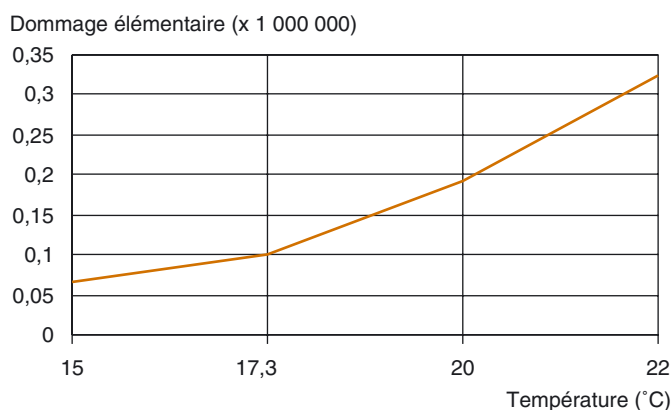
### Le trafic

La démarche est analogue à celle suivie dans l'approche française, que ce soit pour l'essieu équivalent (13 t) ou l'agressivité moyenne par rapport à l'essieu de référence.

### Le climat

Dans le dimensionnement des structures de chaussées, le climat intervient essentiellement par l'action de l'eau, du cycle gel-dégel et la prise en compte de la température équivalente pour les matériaux bitumineux. Le phénomène de gel-dégel étant insignifiant en Tunisie, seule la température équivalente a été déterminée [Hadj Kacem, 2002]. La méthode SETRA [SETRA-LCPC, 1994], fondée sur la détermination des dommages équivalents en partant de données locales, a été utilisée. La valeur de dommage équivalent trouvée est de  $0,15 \times 10^6$ , ce qui correspond à une température équivalente de 18 °C d'après la figure 2.

L'action de l'eau est prise en compte dans la détermination de la portance du sol support.



■ Fig. 2  
Dommage élémentaire en fonction de la température [SETRA-LCPC, 1994].

## Les matériaux de chaussées

### Les graves non traitées

Des études antérieures [Briki et Jemmali, 1994] ont montré que l'ensemble des granulats tunisiens peut se situer entre les catégories C et D selon la norme française P 18-101 [AFNOR, 1992]. Ces granulats peuvent être classés dans la catégorie 2 selon le guide technique de dimensionnement des chaussées [SETRA-LCPC, 1994].

### Les matériaux traités aux liants hydrauliques

Les caractéristiques retenues découlent de la même démarche française à condition d'avoir les caractéristiques mécaniques intrinsèques ( $E$ ,  $\nu$ ,  $\sigma_6$ ) préconisées par cette démarche.

### Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés

Les caractéristiques retenues sont déterminées en fonction de la température équivalente ( $\theta = 18$  °C). Les valeurs du module calculées sont résumées dans le tableau I.

**TABLEAU I**  
Modules des matériaux bitumineux à la température équivalente

	BB	Grave-bitume	BB mince	BB clouté	Grave-émulsion
$E_{\theta_{eq}}$ (MPa)	4 320	7 500	4 320	4 200	2 000

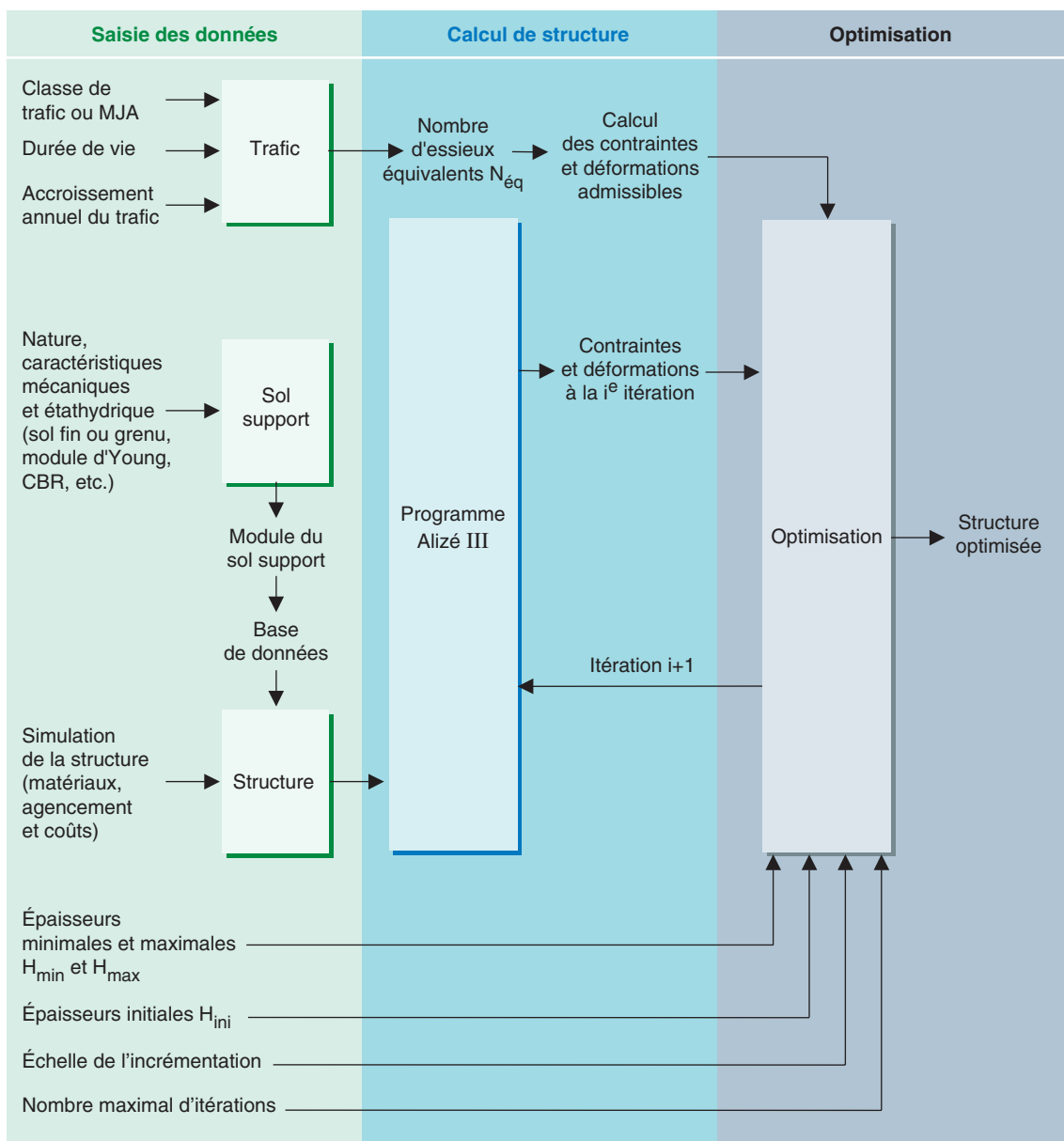
## Le sol support

Comme pour tous les sols, ses caractéristiques dépendent de l'état hydrique et des sollicitations appliquées.

## PRÉSENTATION DU PROGRAMME DÉVELOPPÉ

La figure 3 présente un organigramme du programme de calcul développé IJEN3. Cet organigramme met en relief les trois grandes étapes de l'utilisation du programme, à savoir :

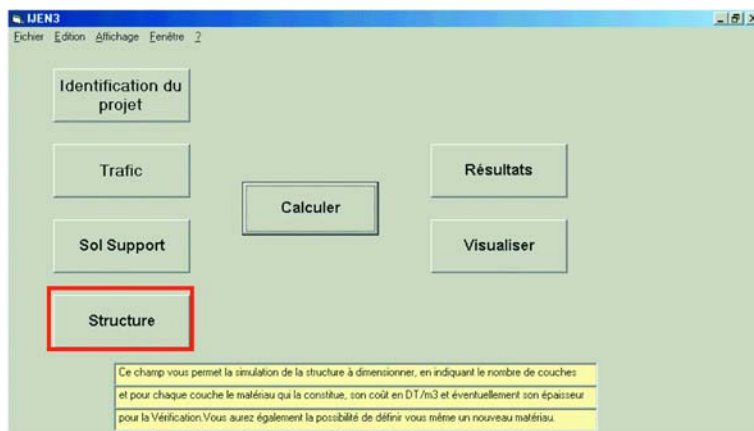
- la spécification des données par l'utilisateur (les paramètres du trafic, du sol support, des matériaux et le type de structure à optimiser) ;
- le calcul de la structure effectué par Alizé III ;
- la procédure d'optimisation. Cette procédure utilise la routine (NCONF) de la bibliothèque IMSL [IMSL, 1995].



■ Fig. 3  
Schéma de principe du programme.

Le programme ainsi développé assure à la fois la convivialité et la facilité d'utilisation. En effet, il présente une interface assez simple qui comporte sept onglets différents : quatre pour la saisie des données, un pour le lancement des calculs, et deux pour l'affichage des résultats. Les différents paramètres de calcul et d'exploitation des résultats sont introduits dans des fenêtres apparaissant par un simple clic sur les différents onglets. Un texte d'explication et d'aide apparaît systématiquement sur l'écran à chaque approche d'un onglet. La figure 4 montre une capture d'écran du programme.

Pour faciliter la saisie (des données), une base de données a été développée et introduite dans le programme. Cette base comporte des données spécifiques au contexte tunisien à savoir les paramètres de fatigue des matériaux, les caractéristiques mécaniques, les données climatiques et les caractéristiques des sols supports. Le programme offre l'option d'enregistrer toute caractéristique nouvelle correspondant à un nouveau cas de calcul de structure, ce qui permet d'enrichir la base de données de manière permanente.



■ Fig. 4  
Capture d'écran du programme IJEN3.

## VALIDATION DU PROGRAMME

Pour valider le programme d'optimisation des structures de chaussées ainsi développé, des simulations ont été réalisées dont deux exemples sont présentés ci-dessous. Le premier exemple est un calcul comparatif avec les résultats relatifs à une structure inverse reposant sur plate-forme traitée aux liants hydrauliques. Cet exemple est traité dans le guide technique « Conception et dimensionnement des structures de chaussée » [SETRA-LCPC, 1994]. Le second exemple est une comparaison avec le catalogue tunisien de dimensionnement des chaussées [DGPC, 1984].

### Exemple 1 : calcul d'une structure inverse sur plate-forme traité aux liants hydrauliques [SETRA-LCPC, 1994]

Les données du problème sont d'abord introduites et les résultats ainsi que les premières interprétations sont ensuite présentés. La structure est composée d'une couche de roulement en béton bitumineux, d'une couche de base en grave-bitume et d'une couche de fondation en grave reconstituée humidifiée (GRH). Les interfaces entre les différentes couches sont toutes collées.

#### Données du problème

Le trafic est de classe T0 avec un taux de croissance géométrique de 4 % par an, une durée de vie projetée sur quinze ans et un risque de calcul pour les matériaux bitumineux de 2 %, ce qui correspond à un nombre d'essieux équivalent de  $7 \times 10^6$ .



La plate-forme support est traitée aux liants hydrauliques et a pour module d'Young 200 MPa et pour coefficient de Poisson 0,35. Pour les matériaux bitumineux, la température équivalente retenue est de 15 °C. Les caractéristiques mécaniques de ces matériaux sont résumées dans le tableau II.

**TABLEAU II**  
Caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux

Matériau	E(10 °C, 10 Hz) (MPa)	E(15 °C, 10 Hz) (MPa)	$\varepsilon_g$ (m/m)	b	$\nu$	$\varepsilon_t^{adm}$ (m/m)
GB	12 300	9 300	$100 \times 10^{-6}$	-0,2	0,35	$74 \times 10^6$
BB	7 200	5 400	$100 \times 10^{-6}$	-0,2	0,35	$80 \times 10^6$

La grave reconstituée humidifiée constituant la couche de base a un module d'Young de 480 MPa et un coefficient de Poisson de 0,35. Sa déformation verticale admissible est de  $74 \times 10^{-6}$  m/m.

### Résultats

Dans le guide technique français, le calcul est réalisé en fixant l'épaisseur du béton bitumineux à 7 cm et celle de GRH à 12 cm. Le problème se ramène à la détermination de l'épaisseur de la couche de grave-bitume, et on obtient la structure suivante : 7BB/15GB/12GRH.

En suivant la même démarche avec le programme de calcul développé IJEN3, le même résultat a été obtenu. L'investigation a alors été poussée plus loin en laissant variables les épaisseurs des trois couches. La structure optimale obtenue avec notre programme est alors : 4BB/18GB/10GRH. Il est à noter que l'épaisseur de 4 cm de béton bitumineux a été fixée comme l'épaisseur minimale technologiquement possible. Il est évident que si, pour certaines considérations, cette épaisseur doit être augmentée, il est possible de le faire et, dans ce cas, la structure optimale serait différente.

Les prix au mètre carré des deux structures (7BB/15GB/12GRH et 4BB/18GB/10GRH) ont alors été calculés, et il s'est avéré que la seconde était 4 % moins chère que la première. Ce résultat est dû au fait que dans le contexte local, le prix de la grave-bitume est environ 15 % plus bas que le prix du béton bitumineux et que les prix des matériaux bitumineux dépassent largement les prix des matériaux non traités. Ces paramètres ne peuvent évidemment pas être pris en compte par le guide technique de conception et dimensionnement des structures de chaussées du SETRA, ce qui explique la différence constatée.

### Exemple 2 : calcul des structures bitumineuses selon les conditions de la fiche n° 6 du catalogue tunisien de dimensionnement des chaussées [DGPC, 1984]

Dans ce second exemple, l'objectif est de comparer les résultats d'IJEN3 avec ceux de la fiche n° 6 du catalogue tunisien de dimensionnement des chaussées. La structure étudiée est une structure bitumineuse tri-couche formée d'une couche de roulement en béton bitumineux de 5 cm d'épaisseur, d'une couche de base en grave-bitume et d'une couche de fondation en grave non traitée.

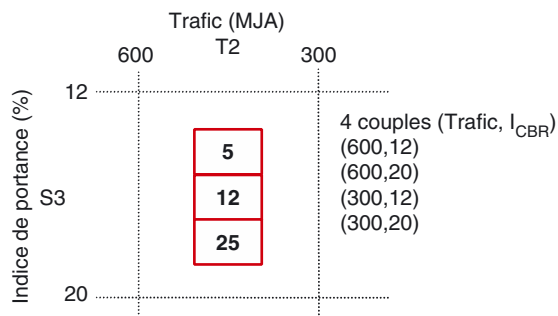
La fiche du catalogue permet de choisir une structure pour une classe de trafic et une classe de sol support données. La correspondance entre ces deux classes permet de définir un élément rectangulaire dont les quatre nœuds correspondent à quatre couples de trafic et d'indice de portance du sol support (Fig. 5).

Le calcul de structure pour les valeurs correspondant à ces quatre couples a alors été effectué.

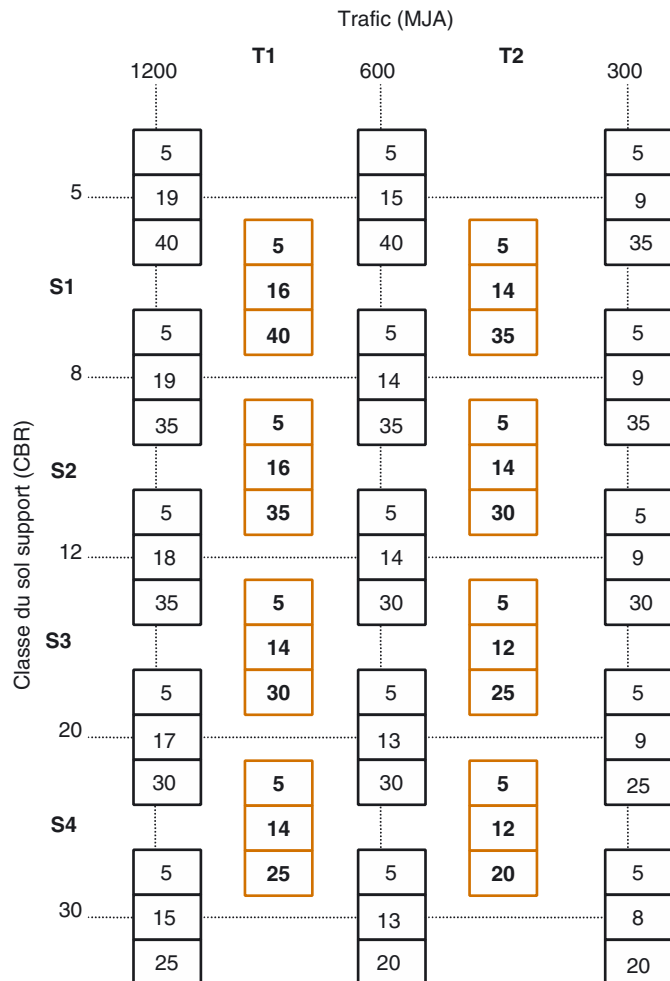
La validation de « IJEN3 » consiste à vérifier l'hypothèse suivante : « la solution proposée par la fiche de dimensionnement doit appartenir au domaine formé par les quatre solutions fournies par le programme IJEN3 ».

Cette hypothèse est vérifiée pour tous les cas de la fiche du catalogue (Fig. 6).





■ Fig. 5  
 Exemple de dimensionnement d'une structure bitumineuse selon le catalogue tunisien [DGPC, 1984].



■ Fig. 6  
 Situation des résultats obtenus par « IJEN3 » par rapport à ceux fournis par le catalogue tunisien de dimensionnement des chaussées.

## CONCLUSION

Le dimensionnement d'une structure de chaussées était fondé jusqu'à maintenant essentiellement sur une modélisation du problème mécanique. Le présent travail a permis d'introduire une deuxième composante dans le calcul des structures de chaussées : l'optimisation du coût de la structure.

Une modélisation du problème d'optimisation fondée sur la méthode de Han Powell a été ainsi présentée. Pour la modélisation du problème mécanique, le programme Alizé III développé par le LCPC a été utilisé. Les données requises pour le calcul des structures de chaussées ont été déterminées. Une adaptation de ces données au contexte tunisien a été également effectuée.

Un nouveau programme de calcul des structures de chaussées combinant tous ces aspects a été développé et présenté. Il a l'avantage d'automatiser ces calculs et de les rendre systématiques. Les exemples

de calcul traités ont permis de valider ce programme et de montrer les performances de cette nouvelle approche dans le dimensionnement des structures de chaussées.

Une comparaison avec le catalogue tunisien des structures de chaussées laisse penser qu'une substitution progressive de ce catalogue par le code de calcul proposé est possible sinon souhaitable.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFNOR, *Bâtiments et génie civil granulats, recueil des normes françaises*, 1992.
- AUTRET P., DE BOISSOUY A., MARCHANDS J.-P., *Pratique d'Alizé III, 5<sup>e</sup> Conférence internationale sur le dimensionnement routier*, DELF, 1982.
- BRIKI A., JEMMALI K., *Optimisation des études de formulation de béton bitumineux avec les matériaux provenant de la carrière de Djebel Ressas*, Projet de fin d'études, École nationale des ingénieurs de Tunis, juin 1994.
- BAH EL HADJ S., *Optimisation des structures de chaussées*, Mémoire de DEA, École nationale des ingénieurs de Tunis, 1998, 100 pages.
- CHOUHAS M., *Choroute-Logiciel de dimensionnement de chaussée*, *Revue générale des routes et des aérodromes*, 708, 1993, pp. 44-48.
- DGPC, *Catologue de Dimensionnement des chaussées neuves et renforcement*, Rapport N° 15.1, Étude de l'entretien routier, Ministère de l'équipement et de l'habitat, direction générale des Ponts et Chaussées, août 1984.
- DENNIS J.E, MORÉ J.J., A characterization of superlinear convergence an dits applications to quasi-Newton methods, *Mathematics of computation*, vol. 28, 126, 1974, pp. 549-560.
- FUKUSHIMA M., A successive quadratic programming algorithm with global and superlinear convergence properties, *Math. Prog.*, 4, 1973, pp. 144-154.
- HADJ KACEM N., *Élaboration d'un logiciel de dimensionnement de structures de chaussées*, Projet de fin d'études, École nationale des ingénieurs de Tunis, juin 2002, 78 pages.
- HAJELA P., Genetic Search. An Approach to the No convex Optimization Problem, *AIAA Journal*, vol. 28, 7, pp. 1205-1210.
- HAN S.P., Superlinearly convergent variable metric algorithms for general non-linear programming problems, *Math. Prog.*, 11, 1976, pp. 263-282.
- IMS, *NCONF/DNCONF (Single/Double precision)*, Microsoft Corporation, 1990-1995.
- JEUFFROY G., LAMBERT M. (1997), *Ecwin. Logiciel complet pour le dimensionnement des chaussées*, LCPC-SETRA, 1997.
- LE RICHE R., HAFTKA R.T., Improved Genetic Algorithm for Minimum Thickness Composite Laminate Design, *Composite Engineering*, 5(2), 1995, pp. 143-161.
- LCPC, SETRA, *Note pour l'utilisation d'Alizé III*, LCPC-SETRA, 1987.
- LCPC, SETRA, *ALIZÉ-LCPC Routes. Logiciel de dimensionnement mécanique des structures de chaussées pour environnement Windows (98, NT, 2000, XP)*, Itech-soft édition et distribution, 2003.
- LIU B., HAFTKA R.T., AKGÜN M., TODOROKI A., Permutation Genetic Algorithm For Stacking Sequence Design Of Composite Laminates, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 186, 2000, pp. 357-372.
- MINOUX M., *Programmation mathématique théorie et algorithmes*, tome 1, Dunod, 1983.
- RAGSDALL K.M., *The utility of nonlinear programming methods for engineering design*, *New direction in optimum structural design*, John Wiley and Sons Ltd, 1984, pp. 385-412.
- RITTER K., A superlinearly convergent method for minimization problems with linear inequality constraints, *Math. Prog.*, 4, 1973, pp. 44-71.
- SCHITTOWSKI K., *Nonlinear programming codes : Information, Test, Performance*, Lecture notes in *Economics and Mathematical Systems*, vol. 183, Springer-Verlag, Berlin, 1980, 18 pages.
- SETRA-LCPC, *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, Guide technique, décembre 1994.
- SOREMEKUN G., GÜRDAL Z., HAFTKA R.T., WATSON L.T., Composite laminate design optimization by genetic algorithm with generalized elitist selection, *Computers & Structures*, 79(2), 2001, pp. 131-143.