

Outil 2D d'analyse mécanique et paramétrique des chaussées fissurées

H. NASSER^a, A. CHABOT^a

a. LUNAM Université, IFSTTAR, CS4, 44344 Bouguenais Cedex

hanan.nasser@ifsttar.fr , armelle.chabot@ifsttar.fr

Résumé:

Ce papier présente un outil de calcul rapide et utile à l'ingénieur pour l'analyse des champs mécaniques dans les structures multicouches de chaussée fissurées. La chaussée est choisie équivalente à trois couches élastiques et homogènes reposant sur un sol. Le sol est modélisé au moyen d'une couche dite de cisaillement ajoutée à un massif de ressorts élastiques (Massif de Winkler) afin d'assurer le transfert des contraintes de cisaillement entre la chaussée et les ressorts. Le quadri-couche total (3 couches de chaussée plus 1 couche de cisaillement) est modélisé à l'aide d'un modèle simplifié (M4-5n) développé pour l'analyse du délaminage des matériaux composites. Le système de douze équations différentielles d'ordre 2 résultant, écrit complètement analytiquement, est résolu par différences finies (Newmark) dans le cas 2D des déformations planes. Sur une chaussée contenant une fissure verticale le long d'une de ses couches, les solutions semi-analytiques sont obtenues en moins d'une seconde. Cet outil autorise ainsi des études paramétriques telles que la distribution des champs mécaniques (en particulier les contraintes d'interface) en fonction de la position de la charge plus ou moins distante de la fissure verticale. Cette nouvelle modélisation montre son efficacité par rapport à l'emploi d'un code aux éléments finis classique.

Abstract:

This paper presents a fast engineering tool for the analysis of the mechanical fields in cracked pavements. The pavement system is reduced to three elastic and homogeneous layers resting on a soil. The soil is modeled by means of one layer, named shear layer, added to Winkler's springs in order to ensure the transfer of shear stresses between the pavement and springs. The whole four-layer system (3 pavement layers added to the shear layer) is modeled using a simplified model (M4-5n) developed for the analysis of the delamination in composite materials. For 2D plane strain case, the obtained system of twelve 2nd differential equations, written analytically, is solved by the finite difference method (Newmark). In the case of a pavement containing a vertical crack through one layer only, the half-analytical solutions are obtained in less than one second. This tool thus allows parametrical studies such as the distribution of mechanical field (especially interface stresses) based on the load position more or less distant from the vertical crack. This new modeling shows its effectiveness compared to the use of a conventional finite element code.

Mots clefs : Multicouche, semi-analytique, M4-5n, fissure, chaussée

1 Introduction

L'analyse des endommagements dans les structures multicouches est rendue difficile en raison de singularités situées aux interfaces entre couches de matériaux près des bords ou fissures verticales [1]. Jusqu'à présent, il n'existe pas d'outil pour l'ingénieur permettant de calculer et d'analyser les champs mécaniques responsables des décollements entre couches dans les structures de chaussées fissurées ou à dalles. Ces structures, soumises aux aléas du climat, travaillent en flexion sous le passage répété de charges lourdes (bus, camion, avions, etc.). Le besoin est donc, de pouvoir en disposer pour l'analyse des pathologies des chaussées anciennes, la proposition de solutions de renforcement appropriées et l'étude de nouvelles structures durables de l'urbain et du futur. Afin d'être largement utilisés par la profession, ces outils doivent enfin être simples, rapides à mettre en œuvre.

L'approche simplifiée proposée ici pour se faire, consiste à adapter le Modèle Multi-particulaire des Matériaux Multicouches (M4) à $5n$ équations d'équilibre (n : nombre total de couches), spécialement conçu pour analyser, dans les problèmes de flexion des multicouches, le délaminage des matériaux composites [2]. Cette approche présente l'avantage de conduire à des développements semi-analytiques autorisant des études paramétriques simples et rapides sans rencontrer de problème de singularité des contraintes d'interface [3].

Suite aux travaux précédents [4-6] et afin de simplifier au maximum la modélisation de la chaussée 3D réelle, celle-ci est choisie équivalente à 3 couches (une couche de roulement, de base et de fondation) [7] reposant sur un sol. Dans la modélisation finalement retenue ici, notée M4-5nW, le sol est supposé équivalent à la combinaison d'une couche fictive (couche de cisaillement) assurant le transfert des contraintes de cisaillements de la chaussée par sa couche de fondation au massif de ressorts (massif de Winkler) [8].

Afin de valider les développements semi-analytiques de l'outil, le cas de déformations planes (2D) est d'abord développé et exposé dans ce papier. Dans un premier paragraphe, le principe du modèle M4-5nW est présenté. Le second paragraphe étudie une structure de chaussée composite. Tout d'abord, l'étude paramétrique afin de déterminer et optimiser l'épaisseur de la couche équivalente ajoutée au massif de Winkler pour le sol, est réalisée. Ensuite, les avantages d'une telle modélisation pour l'étude paramétrique des cas de position de charge les plus défavorables par rapport à l'existence d'une fissure verticale dans une structure de chaussée composite sont exposés.

2 Développement du M4-5nW pour les chaussées

Dans ce paragraphe, le M4-5n, modèle multiparticulaire des matériaux multicouche (M4) à $5n$ (n : nombre total de couches) équations d'équilibre par couche est présenté pour son utilisation à une structure de trois couches de chaussée augmentée d'une couche de cisaillement pour le sol. La modélisation retenue pour le sol (couche de cisaillement combinée au massif de ressorts de Winkler, W) est abordée dans un second temps. Le tout constitue le M4-5nW.

2.1 Modèle Multi-particulaire des Matériaux Multicouches à $5n$ équations d'équilibre par couche (M4-5n)

Le M4-5n fait partie de la famille des Modélisations Multi-particulaires des Matériaux Multicouches (M4) développée pour l'analyse du délaminage des systèmes multicouches [2]. Ces modèles sont construits à partir de champs de contraintes 3D approchés, polynomiaux en z par couche, et de la

formulation d'Hellinger-Reissner [9]. Comme les "layerwise plate models" [10], les M4 font ainsi une approximation plus fine des champs suivant l'épaisseur du multicouche que les modèles de plaque d'ordre supérieur puisqu'ils proposent une cinématique par couche plutôt qu'une cinématique globale tout en réduisant le problème étudié d'une dimension. Le multicouche est ainsi représenté par un ensemble de plaques (objets 2D dans le plan x,y) couplées à des contraintes d'interface de cisaillement $\tau_{\rightarrow}^{i,i+1}(x,y)$ ($\rightarrow \in \{1,2\}$, x et y représentent les coordonnées du plan des couches) et d'arrachement $v^{i,i+1}(x,y)$ qui permettent d'assurer la continuité des contraintes entre les couches i et $i+1$ ($i \in \{1,n\}$). L'avantage de ces modèles est, à partir d'une description multi-particulaire 2D (1D), de pouvoir déterminer l'intensité des champs mécaniques 3D (2D) au droit des fissures au bord sans rencontrer de problèmes de singularité. Le M4-5n peut être vu comme une superposition de n plaques de Reissner.

Dans le cas 2D de déformations planes de chaussée fissurée examiné ici, le problème à résoudre est filaire et ne dépend que de la variable x . Le M4-5n est utilisé pour modéliser les 3 couches équivalentes de chaussée et celle assurant la liaison entre la chaussée et le sol (Figure 1).

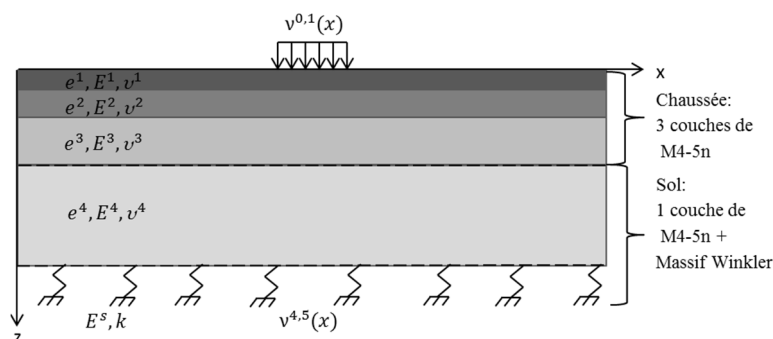


Figure 1 : Schéma de modélisation simplifiée de la structure de chaussée 2D par le M4-5nW

Les couches sont numérotées du haut en bas de la structure. On note E^i , e^i et ν^i ($i \in \{1, 4\}$) respectivement le module d'Young, l'épaisseur et le coefficient de poisson de chaque couche i . E^s est le module d'Young du sol et k est la raideur des ressorts. Par l'intermédiaire de l'effort d'arrachement $v^{0,1}(x)$ et de cisaillement nul ($\tau_1^{0,1}(x) = 0$) entre la première couche de la chaussée et l'extérieur, la charge à pression uniforme est supposée d'appliquer verticalement sur la chaussée.

Les équations de comportement et d'équilibre des couches et d'interfaces du M4-5n sont manipulées analytiquement dans l'espace des déplacements et des efforts généralisés afin de poser le problème à résoudre. Cette manipulation engendre un système de douze équations différentielles principales d'ordre 2 en x s'écrivant sous la forme suivante (1) :

$$AX''(x) + BX'(x) + CX(x) = DY^{0,1'}(x) + EY^{4,5'}(x) + FY^{0,1}(x) + GY^{4,5}(x) \quad (1)$$

où l'on note par « ' » les dérivées premières des champs inconnus et par « '' » les dérivées secondes des champs par rapport à cette variable, x . $X(x)$ représente le vecteur contenant les 12 inconnues cinématiques moyens par couche de Reissner-Mindlin, notés $U_1^i(x)$, $\square_1^i(x)$ et $U_3^i(x)$. Ces champs cinématiques, inconnus du problème à résoudre, définissent ainsi respectivement : les déplacements moyens dans le plan de la couche i ; leur rotation moyenne ; et les déplacements verticaux moyens pour chaque couche i ($i \in \{1,4\}$) du problème. $Y^{0,1}(x)$ et $Y^{4,5}(x)$ sont les vecteurs d'efforts d'interface entre la structure multicouche et son environnement extérieur (2) permettant l'écriture des conditions aux limites de chargement des véhicules s'exerçant au-dessus (exposant "0,1" entre l'extérieur et la première

couche) de la chaussée et au-dessous (exposant "4,5", entre la quatrième couche et l'extérieur) assurant la liaison entre la couche de cisaillement et le massif de Winkler.

$$X = \begin{bmatrix} X^1 \\ \vdots \\ X^n \end{bmatrix}_{12 \times 1} ; [X] = \begin{bmatrix} U_1^i \\ \phi_1^i \\ U_3^i \end{bmatrix} ; Y^{0,1} = \begin{bmatrix} \tau_1^{0,1} \\ \nu^{0,1} \end{bmatrix}_{2 \times 1} ; Y^{4,5} = \begin{bmatrix} \tau_1^{4,5} \\ \nu^{4,5} \end{bmatrix}_{2 \times 1} \quad (2)$$

Les matrices [A]_{12x12}, [B]_{12x12}, [C]_{12x12}, [D]_{12x2}, [E]_{12x2}, [F]_{12x2} et [G]_{12x2} du système (1) ne dépendent que des paramètres géométriques et matériaux du problème élastique équivalent. A l'aide du logiciel Mathematica, elles sont écrites analytiquement afin de diminuer le nombre d'opérations à effectuer et maximiser les temps de calcul lors de la résolution numérique. A titre d'exemple, nous donnons ici le format de remplissage de la matrice [A] (3). Les coefficients A_{jk} sont proportionnels aux quotients $\frac{E^i}{e^i}$.

$$A = \begin{pmatrix} \frac{e^1 E^1}{1 - \nu^1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{e^1 E^1}{5(1 - \nu^1)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^1 A_{33} & 0 & 0 & e^2 A_{36} & 0 & 0 & -e^3 A_{39} & 0 & 0 & -e^4 A_{312} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{e^2 E^2}{1 - \nu^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{e^2 E^2}{5(1 - \nu^2)} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^1 A_{36} & 0 & 0 & e^2 A_{66} & 0 & 0 & -e^3 A_{69} & 0 & 0 & -e^4 A_{612} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{e^3 E^3}{1 - \nu^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{e^3 E^3}{5(1 - \nu^3)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -e^1 A_{39} & 0 & 0 & -e^2 A_{69} & 0 & 0 & e^3 A_{99} & 0 & 0 & e^4 A_{912} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{e^4 E^4}{1 - \nu^4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{e^4 E^4}{5(1 - \nu^4)} & 0 \\ 0 & 0 & -e^1 A_{312} & 0 & 0 & -e^2 A_{612} & 0 & 0 & e^3 A_{912} & 0 & 0 & e^4 A_{1212} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Comme dans les travaux précédents, la résolution numérique du système (1) consiste tout d'abord à adimensionnaliser les différentes variables par rapport aux efforts et longueurs du problème, afin d'éviter les problèmes de mauvais conditionnement numérique. Ensuite, le milieu multicouche étudié est discrétisé selon x en N points (nœuds). La méthode de Newmark [5] est utilisée pour réduire l'ordre des équations différentielles. Chaque couche M4-5n ayant ses propres équations d'équilibre, loi de comportement et conditions aux limites, cette méthode permet l'introduction aisée d'une fissure verticale le long d'une couche. Entre deux nœuds consécutifs, les lignes et les colonnes de la couche concernées sont remplacées par celles correspondant aux conditions aux limites des bords libres. En 2D, quel que soit le cas de position de charge par rapport à la fissure, pour le multicouche ainsi modélisé par le M4-5n, on choisit de diviser le milieu filaire en quatre zones suivantes (Figure 2) :

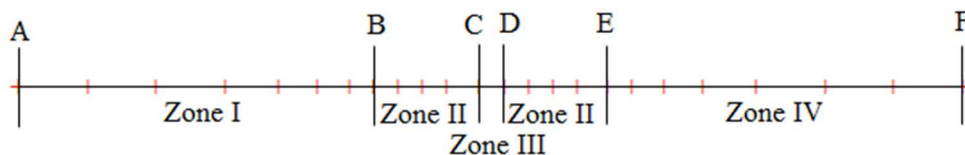


Figure 2 : Discrétisation pour le M4-5n et découpage en zone d'une structure de chaussée 2D fissurée

- La zone I, à NI nœuds, est située à gauche de la charge avec un maillage de préférence décroissant (décroissant) de gauche à droite ;
- La zone II, à NII nœuds, contient la zone de chargement, sa discrétisation est régulière ;

- La zone III, à 2 nœuds seulement, correspond à la zone de la fissure (conditions limites M4-5n de bords libres entre deux nœuds consécutifs) ;
- La zone IV, à NIV nœuds, est localisée à droite de la charge avec un maillage de préférence progressif (croissant), de gauche à droite.

Ainsi, après plusieurs manipulations, il est possible finalement de réduire l'ordre du système d'équations différentielles (1) pour obtenir le système final (4) à résoudre classiquement.

$$\mathbb{A}\mathbb{X}(x) = \mathbb{B}\mathbb{Y}^{0,1}(x) + \mathbb{C}\mathbb{Y}^{4,5}(x) \quad (4)$$

La matrice $\mathbb{A}(x)$ est de dimension $12N \times 12N$. Les deux tenseurs $\mathbb{B}(x)$ et $\mathbb{C}(x)$, de dimension $12N \times 2N$, représentent les tenseurs résultants des forces de chargements et autres contions aux limites s'exerçant respectivement au-dessus et au-dessous du multicouche par l'intermédiaire des $\mathbb{Y}^{0,1}(x)$ et $\mathbb{Y}^{4,5}(x)$

2.2 Modélisation du sol du M4-5nW

La modélisation du sol par un massif de ressorts (massif de Winkler) bien que très simple à utiliser et rapide rend nul les efforts de cisaillement entre le sol et la structure, alors qu'en réalité ils ne le sont pas [6]. Pour améliorer la modélisation et ainsi avoir de meilleures approximations des champs mécaniques près du sol tout en gardant cette simplicité de modélisation, on ajoute une couche de M4-5n au massif de ressorts assurant ainsi le transfert des contraintes de cisaillements de la chaussée au massif de Winkler (Cf. Figure 1). k , la raideur des ressorts, s'extrapole alors à quatre couches selon la formule d'Odemark (5) [11] où h^* , épaisseur équivalente du multicouche, est calculée à partir de la "Méthode d'épaisseur équivalente" (MET) donnée par Odemark (5). f est un facteur de correction égal à 0.9 pour un bicouche, 0.8 pour un multicouche, 1.0 pour la première interface de multicouche et 1.1 pour la première interface si le rayon de la charge est plus grande que l'épaisseur de la couche i .

$$k = \frac{E^S}{h^*} \text{ avec } h^* = \sum_{i=1}^n f e^i \sqrt[3]{\frac{E^i}{E^S}} \quad (5)$$

Marchand et al. [12] ont constaté que cette formule peut être utilisée seulement si l'épaisseur des couches est supérieure à la moitié du rayon de la charge ou si le rapport $\frac{E^i}{E^{i+1}}$ est supérieur à 2.

L'hypothèse de continuité des déplacements verticaux entre le quadricouche et le massif de Winkler (indexé par 5), implique ainsi les conditions aux limites liant les efforts d'interface et les ressorts (6).

$$\begin{cases} \tau_1^{4,5}(x) = 0 \\ v^{4,5}(x) = -k U_3^4(x) \end{cases} \quad (6)$$

Dans la mise au point de l'outil de modélisation simplifié M4-5nW, il faut enfin déterminer l'épaisseur de la "couche de cisaillement" équivalente. Celle-ci est définie, pour une structure de chaussée donnée, par deux règles. La première est de respecter la validité géométrique de couche mince d'un modèle de plaque ($e^i \ll L$). L'épaisseur de la couche de cisaillement (e^4) est supposée ne pas être supérieure à dix fois la longueur de la structure étudiée ($e^4 \leq L/10$). Deuxièmement, un rapport entre deux couches consécutives de M4-5n dans leur ordre d'empilement doit être inférieur à 4 ($\frac{e^{i+1}}{e^i} \leq 4$) pour que les résultats de calcul soient suffisamment précis dans la discrétisation M4 des champs selon les épaisseurs des couches considérées [4].

3. Etude 2D d'une chaussée composite

La chaussée composite étudiée ici est donnée par le catalogue français des chaussées [7]. Ce type de structure est construit et utilisée pour des voies du réseau non structurant soumises à un trafic lourd de type TC7 (compris entre 17,5 et 43,5 millions de Poids lourds sur la durée de vie de la chaussée). Cette chaussée repose sur un sol de type PF3 (plateforme support avec un module de $E^s=120\text{MPa}$). Elle est composée de trois couches dont on connaît bien les propriétés mécaniques et géométriques. La première couche, appelée couche de surface, est constituée de 0.08m de béton bitumineux semi-grenu (BBSG, $E^1=5400\text{MPa}$ équivalent à 15°C et 10Hz , $\nu^1=0.35$). La deuxième couche, nommée couche de base, est formée de 0.15m de grave-bitume de classe 3 (GB3, $E^2=9300\text{MPa}$ équivalent à 15°C et 10Hz , $\nu^2=0.35$). La troisième couche, dite couche de fondation, est composée de 0.23m de grave-ciment de classe 3 (GC3, $E^3=23000\text{MPa}$, $\nu^3=0.25$). A terme, par retrait du matériau, cette troisième couche est supposée fissurer verticalement le long de son épaisseur. On suppose que la couche de cisaillement a un module d'Young égal à celui des ressorts ($E^4=E^s=120\text{MPa}$, $\nu^4=\nu^s=0.35$).

Dans le cas 2D déformation plane, une charge unitaire de 1MPa est choisie arbitrairement uniforme et répartie sur une largeur de 0.15m (Figure 1). Les conditions limites appliquées aux bords latéraux de la structure correspondent à son confinement par des hypothèses de bords bloqués (déplacements horizontaux et rotations nuls). Pour choisir les dimensions finies de la structure à partir desquelles la charge n'exerce plus d'effort, une étude paramétrique est réalisée sur un exemple de chaussée non fissurée grâce à l'outil M4-5nW développé et programmé sous Scilab. Les résultats de calcul (axe des z vers le haut) sont validés par comparaison à ceux du code des éléments finis César-LCPC (Figure 3)

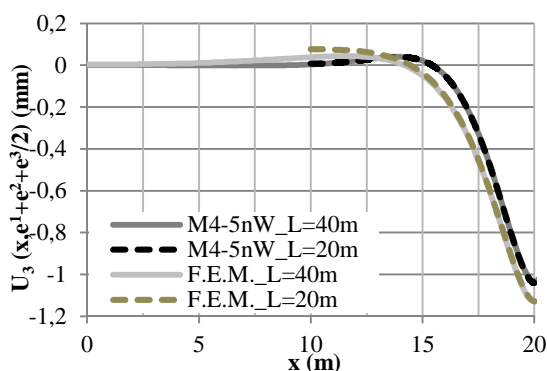


Figure 3 : Comparaison du déplacement vertical moyen de la couche 3 pour les différents modèles étudiés

Le maillage 2D EF est réalisé avec des éléments quadrangles de degré 2 (Q8). Une couche de 6m d'épaisseur est admise usuellement suffisante pour représenter le sol par EF [13]. Dans le cas du M4-5nW et cet exemple non fissurée, la Zone III n'existe pas (Figure 2). L'épaisseur M4-5nW de la quatrième couche est choisie arbitrairement à $4e^3$. Pour les deux outils de calculs utilisés, il n'y a pas d'optimisation de maillage et on les considère réguliers de largeur de 0.001m selon l'axe des x.

Ainsi après différentes simulations, une longueur de structure de 20m pour le calcul M4-5nW semble nécessaire pour s'assurer que la déflexion maximale sous la charge converge et que les déplacements verticaux aux bords de la chaussée deviennent nuls (Figure 3). Dans le cas de la modélisation EF, une longueur de 40m assure des déplacements nuls aux bords de la chaussée (Figure 3), bien que la déflexion maximale sous la charge converge pour une longueur de 20m. Nous avons considéré ainsi par la suite qu'une chaussée de 20m de longueur suffit pour faire la comparaison entre modèles et valider les résultats obtenus par simulation M4-5nW.

L'épaisseur e^4 de la couche de cisaillement est à déterminer et fait l'objet du paragraphe suivant.

3.1 Détermination de l'épaisseur de la couche de cisaillement du M45nW - cas d'une chaussée mixte 2D sans fissure

Dans le cas de la chaussée composite, de longueur de 20m simulée, les conditions à respecter pour que le modèle M4-5nW (cf. §2.2) indiquent ainsi une épaisseur maximale de la couche de cisaillement de 0,92 m ($e_{\max}^4=4e^3$). L'influence de cette épaisseur sur le comportement de la structure est réalisée pour quatre valeurs différentes ($e^4 = e^3, 2e^3, 3e^3$ et $4e^3$) et sur quatre champs : les déplacements moyens horizontaux ($U_1^i(x)$) et verticaux ($U_3^i(x)$) de chaque couche i et les contraintes de cisaillement ($\tau_1^{i,i+1}(x) = \sigma_{xz}(x, \sum_{i=1}^i e^i)$) et d'arrachement ($v^{i,i+1}(x) = \sigma_{zz}(x, \sum_{i=1}^i e^i)$) à l'interface $i, i+1$.

A titre d'exemple, pour la chaussée composite non fissurée, la figure 4 illustre les déflexions en haut de la chaussée et les contraintes de cisaillement d'interface entre la chaussée et la couche de cisaillement pour différentes valeurs de e^4 . Ces valeurs sont comparées aux résultats obtenus par EF. Pour les deux simulations, les maillages sont les mêmes que dans le cas précédents.

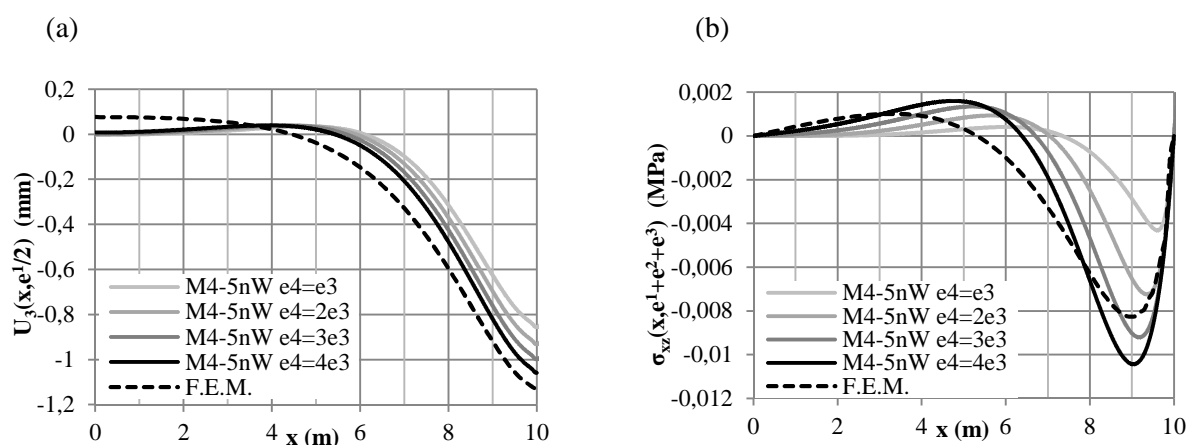


Figure 4 : Influence des valeurs de e^4 sur les champs du M4-5nW comparées aux ceux du E.F. (chaussée composite non fissurée $L=20m$) : (a) Déflexions en haut de la chaussée ; (b) Contraintes de cisaillement d'interface

Cette étude conduit aux conclusions suivantes:

- L'épaisseur e^4 de la couche de cisaillement n'a pas d'influence sur les déplacements horizontaux ($U_1^i(x)$) de toutes les couches ni sur les efforts de cisaillement et d'arrachement pour les deux premières interfaces ($\tau_1^{1,2}(x), \tau_1^{2,3}(x), v^{1,2}(x), v^{2,3}(x)$).
- Elle affecte le déplacement vertical de toutes les couches ($U_3^i(x)$) et seulement les efforts de la troisième interface, entre la chaussée et la couche de cisaillement du sol. Les valeurs de $U_3^i(x)$, $\tau_1^{3,4}(x)$ et de $v^{3,4}(x)$ augmentent avec l'augmentation de l'épaisseur e^4 .

Pour les cisaillements d'interface du M4-5nW, l'aire sous la courbe donne une valeur égale à celle obtenue dans le calcul EF avec une épaisseur $e^4=4e^3$.

3.2 Application M4-5nW au cas d'une chaussée mixte 2D fissurée

Par la suite, dans le cas de la chaussée composite étudiée, nous fixons l'épaisseur de la couche de cisaillement e^4 à cette valeur ($e_{\max}^4 = 0.92m$). Par ailleurs, la troisième couche de la chaussée, dû au retrait du matériau traité aux liants hydrauliques, génère une fissure verticale qui : soit remonte dans la 2^{ème} couche (phénomène de "reflective cracking") ; soit contribue à un décollement de l'interface entre

les couches 2 et 3. Pour étudier ce cas, une fissure verticale de 0.001m de largeur est introduite le long de la couche 3. Par la suite, on suppose que la charge est positionnée à gauche de la fissure.

Dans ce cas, afin d'obtenir des intensités de contraintes d'interface M4-5n précises sous la charge, au bord de la fissure et optimiser les temps de calcul, un maillage irrégulier est choisi sur les zones I et IV (cf figure 2). In fine ce sont ces champs d'interface que l'on étudie pour comprendre les mécanismes de rupture d'interface de la structure ainsi fissurée initialement.

3.2.1. Validation du M4-5nW par rapport aux EF

Dans le cas d'une charge située au centre de la chaussée et sur le bord gauche d'une fissure verticale (positionnée entre les points $x= 10.075\text{m}$ et $x=10.076\text{m}$), une étude paramétrique de convergence des intensités des contraintes de cisaillement et d'arrachement d'interface M4-5nW est faite. On constate alors qu'à ce bord, on obtient alors des intensités finies à 0.01Pa près pour un nombre de nœuds M4-5nW suffisant de 60 dans les zones 1 et IV et de 80 sous la charge (zone II), la zone III est décalée en bord de charge et ne contient que les 2 nœuds de la fissure (figure 2).

La figure 5, illustre ainsi la comparaison des contraintes de cisaillement (a) et d'arrachement (b) à l'interface entre les couches 3 et 4 du M4-5nW par rapport aux simulations faites par EF de ces contraintes (maillage avec des éléments Q8).

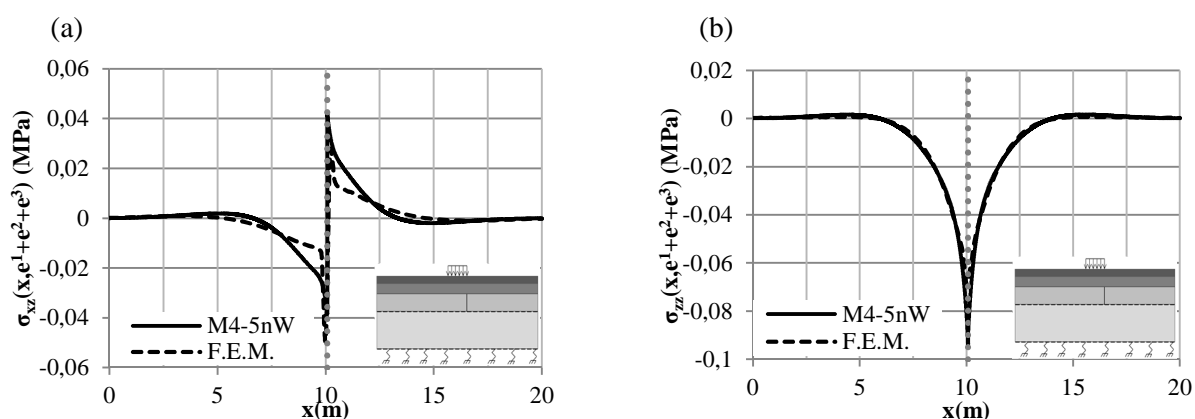


Figure 5 : Comparaison entre modèles : (a) contraintes de cisaillement à l'interface entre les couches 2 et 3 ; (b) contraintes d'arrachement à l'interface entre les couches 2 et 3

On note que les simulations des contraintes de cisaillement et d'arrachement d'interface sont concordantes pour les deux modèles utilisés hors leur intensité en bord de fissure comme attendu.

Sur le tableau 1 suivant, on reporte ainsi les temps de calcul CPU obtenus pour les deux modélisations utilisées ici dans le cadre des déformations planes. On remarque que, pour le même maillage, le temps obtenu pour le M4-5nW est très intéressant comparé aux éléments finis (6 fois plus rapide) et répond à l'objectif de construire un outil de calcul rapide en vue de l'utiliser pour des études paramétriques. A noter que pour le M4-5nW et la résolution numérique choisit du système (4), ce temps de calcul est intéressant pour le maillage progressif utilisé par rapport à un maillage régulier de 0.001m de largeur (2165 s CPU) puisqu'on est passé de 20001 nœuds à 198 nœuds dans ce cas.

Tableau 1 : Comparaison des temps de calcul CPU des deux modèles pour la chaussée quadri-couche fissurée

	M4-5nW	F.E.M.
Temps CPU (s)	0.36	2.16

Ces résultats montrent clairement l'intérêt du M4-5nW ainsi construit. Les calculs analytiques et la résolution numérique du système d'équations sont ainsi également validés.

3.2.2. Evaluation des contraintes d'interface M4-5nW d'une chaussée mixte soumise à un chargement roulant

Afin de connaître le cas le plus défavorable en terme de possibilité de générer du décollement d'interface lors du phénomène de fissuration réfléctive, les intensités des contraintes d'interface M4-5nW étant finies aux bords de fissures, nous comparons finalement, avec l'outil ainsi développé, les effets d'une fissure par rapport à sa position à la charge. A titre d'illustration, nous superposons sur la figure 6 les contraintes d'interface 2,3 du M4-5nW pour trois cas de calcul de chaussée (l'axe des z est orienté vers le haut pour la présentation de ces résultats) : non fissurée (cas a) ; avec une charge centrée sur une fissure de la 3^{ème} couche (cas b1) ; avec une charge située à gauche de la fissure (cas b2). Dans ces trois cas de calcul, la charge est centrée sur la longueur de la structure simulée, le même nombre de nœuds que précédemment est conservé pour les différentes zones. Dans le cas d'une charge centrée sur la fissure, on a 40 nœuds situés de part et d'autre de la fissure dans la zone II (figure 2).

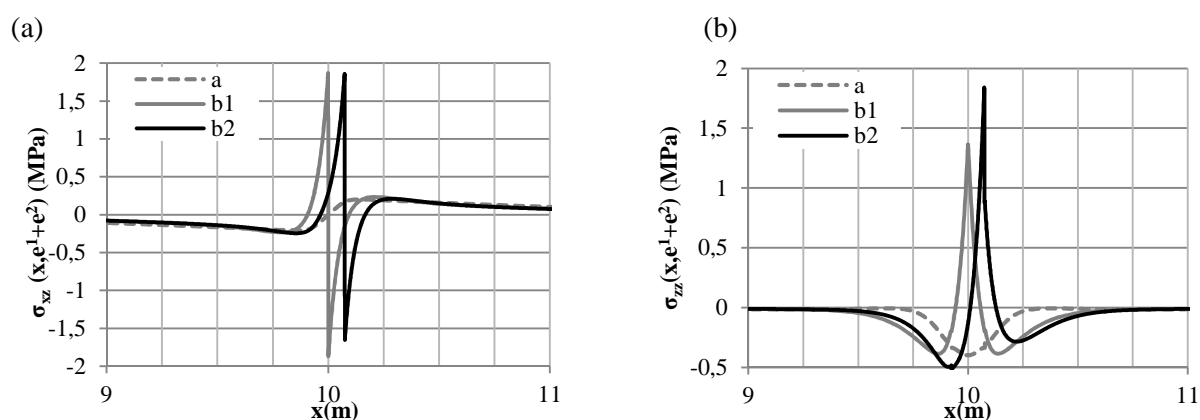


Figure 6 : Comparaison de contrainte d'interface M4-5nW entre les couches 2 et 3 pour les trois cas de calcul a, b1 et b2 (a) cisaillement ; (b) : arrachement

Sur la figure 6, on constate que les intensités des contraintes à cette interface (2,3) sont plus élevées lorsqu'il existe une fissure. Pour la contrainte d'arrachement 2,3, la charge située au bord de la fissure est le cas le plus défavorable (figure 6b). L'interface est en traction de part et d'autre de la fissure et peut générer, si celle-ci n'a pas de résistance assez élevée et/ou lors d'un trafic répété, un décollement. Avec le nouvel outil M4-5nW ainsi développé, cette courte analyse conforte ainsi le constat que la position de la charge par rapport à la fissure joue un rôle important dans l'analyse du comportement 2D de la chaussée. Le risque d'endommagement d'une chaussée où la charge est située au bord d'une fissure verticale est beaucoup plus élevé que pour d'autres positions de chargement. Il suffit d'étudier ce cas dans toute analyse 2D de chaussée mono fissurée verticalement le long d'une couche.

4. Conclusions et perspectives

Dans ce papier, nous proposons ainsi de modéliser les structures de chaussées comportant des fissures initiales verticales de long d'une de leur couche par un outil de modélisation simplifié. Cet outil s'appuie sur un modèle alternatif de structures multicouches dévoué à une analyse simplifiée des problèmes de décollement, le M4-5n. La structure de chaussée est choisie équivalente à l'empilement de trois couches élastiques reposant sur un massif sol. Le sol est supposé être équivalent à une couche de cisaillement ajoutée à un massif de Winkler (W) pour assurer le transfert des contraintes de cisaillement entre la chaussée et le sol. Le tout ainsi simulé constitue le M4-5nW.

En 2D, l'écriture analytique ainsi que la résolution numérique du système d'équations est validé en comparant les résultats obtenus avec ceux d'un code en éléments finis, avec un gain de temps CPU très prometteur. Ce gain de temps est dû au M4-5n qui réduit d'une dimension le problème étudié et permet de déterminer l'intensité des champs mécaniques au droit des fissures sans rencontrer de problèmes de singularité. Il est aussi dû au maillage choisi ainsi qu'à l'écriture simplifiée des matrices nécessaires à la résolution du problème. Bien que le nombre d'inconnus à résoudre soit en revanche assez grand, la résolution semi analytique des équations de ce modèle (par la méthode des différences finies) permet de réaliser des études paramétriques faciles et rapides. Cet outil répond ainsi au cahier des charges initial de construction d'un outil de modélisation de type bureau d'études notamment pour l'analyse des champs mécaniques dans les chaussées fissurées.

La prise en compte du gradient thermique dans la chaussée est en outre également possible dans le M4-5nW ainsi développé. Le calcul du taux de restitution d'énergie générée lors de la fissuration constitue aussi un point de comparaison possible avec d'autres types de modélisation [3].

La prochaine étape à franchir, reste à réaliser le développement du M4-5nW en 3D. Des décollements partiels d'interface pourront alors être introduits afin d'investiguer et de comparer les résultats M4-5nW avec ceux d'expérimentations effectuées sur des structures en vraie grandeur.

Références

- [1] ML. Williams, The stress around a fault or crack in dissimilar media. *Bull Scismol Soc Am*, **49**:199–204, 1959
- [2] A. Chabot, A. Ehrlacher, Modèles Multiparticulaires Des Matériaux Multicouches M4_5n et M4_(2n+1)M pour L'Analyse Des Effets De Bord, Thèse, Comptes rendus aux 11ème Journées Nationales sur les Composites (JNC11), 18-20 novembre, Arcachan, 3: 1389-1397, 1998
- [3] A. Chabot, M. Hun, F. Hammoum, Mechanical analysis of a mixed mode debonding test for "composite" pavements. *Construction and Building Materials*, 40:1076–1087, 2013
- [4] Q.D. Tran, Modèle simplifié pour les chaussées fissurées multicouches. Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004
- [5] A. Chabot, Q. D. Tran, A. Ehrlacher, A simplified modeling for cracked pavements - Modèle simplifié pour le calcul des chaussées. *BLPC*, ISSN 1269-1496, (258-259) : 105-120, 2005
- [6] F. Berthemet, A. Chabot, Apports du massif de Winkler dans la construction d'un outil de calcul de structure multicouche fissurée reposant sur un sol. 21ème CFM, 26-30 août Bordeaux, 2013
- [7] SETRA-LCPC, Catalogue des structures types de chaussées neuves, Guide technique, 1998
- [8] H.M. Westergaad, Stresses in concrete pavements computed theoretical analysis, *Public Roads* 7 (2):25-35, 1926
- [9] E. Reissner, On a variational theorem in elasticity, *J. Math. Phys.*, 29: 90-95, 1950
- [10] E. Carrera, A. Ciuffreda, Bending of composites and sandwich plates subjected to localized lateral loadings: a comparison of various theories, *Composite Structures*, 68 (2):185–202, 2005
- [11] N. Odemark, Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements According to the Theory of Elasticity. Report 77, National Swedish Road and Traffic Research Institute, Linköping, Sweden, 1949
- [12] J.P. Marchand, M. Dauzats, R. Kobisch, Design of pavements on small programmable calculators. *BLPC*, Mécanique des chaussées, Issue 125: 53–67, 1983
- [13] LPC, Etudes routières Déformabilité de surfaces des chaussées Exécution et exploitation des mesures, Méthode d'essai LPC N°39, 1997