

## **Apport du Falling Weight Deflectometer pour l'analyse dynamique et l'évaluation structurelle des chaussées souples**

**ZOA AMBASSA<sup>1,2\*</sup> et Jean Chills AMBA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Laboratoire 3S-R, Université de Grenoble-Alpes, CNRS, BP 53 - 38041 Grenoble Cedex 9, France*

<sup>2</sup> *Laboratoire Energie, Matériaux, Modélisation et Méthodes (E3M), Faculté de Génie Industriel, Université de Douala, BP 2701 Douala, Cameroun*

---

\* Correspondance, courriel : [daniel.zoa77@yahoo.fr](mailto:daniel.zoa77@yahoo.fr)

### **Résumé**

Ce papier s'intéresse à l'analyse dynamique de chaussée souple (représentant la grande partie des chaussées revêtues au Cameroun) sous chargement dynamique de type FWD. A partir d'un modèle numérique 2D, axisymétrique, sous le code de calcul aux éléments finis CAST3M<sup>®</sup> du comportement de cette chaussée sous impulsion d'une charge dynamique du FWD, nous avons obtenus, la courbe de déflexion incrémentale en surface de chaussée. C'est cette courbe de déflexion qui est utilisée dans les rétro-calculs pour l'évaluation structurelle de la chaussée. D'autres paramètres incrémentaux majeurs ont été également obtenus.

**Mots-clés :** *FWD, chaussée souple, modèle numérique, CAST3M, analyse dynamique, rétro-calcul.*

### **Abstract**

**Falling Weight Deflectometer contribution to dynamic analysis and Assessment of structural flexible pavements**

This paper focuses on the flexible pavement dynamic analysis (representing the pavements in Cameroon) under dynamic loading type FWD. From a numerical model 2D-axisymmetric, as CAST3M<sup>®</sup> Finite Element code of behavior of this pavement under impulse dynamic load of FWD, we have obtained the incremental deflection curve in road surface. It is this deflection curve that is used in the backcalculation for the structural evaluation of the roadway properties. Other major incremental parameters were also obtained.

**Keywords :** *FWD, flexible pavement, numerical model, CAST3M, dynamic analysis, backcalculation.*

### **1. Introduction**

Dans les pays en développement, l'entretien routier représente généralement un budget colossal et nécessite souvent des investigations techniques et scientifiques approfondies. La compréhension et la maîtrise du phénomène de dégradation des chaussées, sa prévision, son diagnostic et sa prévention reste néanmoins « mal connu » comparé à d'autres domaines sensibles comme l'automobile et l'électronique sans parler de la médecine (dans le secteur Sciences Pour l'ingénieur) où la science a beaucoup fait progresser l'ingénierie et

la technologie. Dans cet article, nous nous intéressons au secteur de l'ingénierie routière impactant des ressources financières publiques très importantes et cependant avec des moyens d'investigation et développement très limités. Cet article contribue à faire progresser le diagnostic routier en vue de l'étude et la prévision de solutions de réparation durables. Le déflectomètre à masse tombante, connu mondialement sous le nom de «Falling Weight Deflectometer», encore plus connu sous le sigle FWD, est à l'heure actuelle, l'outil de diagnostic des chaussées le plus sophistiqué utilisé à travers le monde. Depuis sa création, le FWD a fait l'objet de nombreux développements et constitue un outil majeur de diagnostic car il permet, avec un matériel facilement transportable d'obtenir, des déflexions de chaussée sous l'action d'un chargement dynamique calibré, tel que celui-ci soit proche de l'impulsion donnée au passage d'un essieu de poids lourd [1 - 3] sur la chaussée. Des procédures et outils d'analyse inverse par minimisation de l'écart entre la déflexion calculée et celle mesurée conduisent à l'identification des modules d'élasticité des différentes couches de chaussée permettant ainsi d'associer un niveau d'endommagement à un moyen donné et ensuite de permettre de déterminer l'épaisseur de la couche de renforcement ou rechargement de chaussée. Après analyse d'un très grand nombre d'études liées à ce sujet d'une part, d'un outil très utilisé à travers le monde d'autre part, nous pensons que cet outil est sous exploité au Cameroun, car les analyses existants jusqu'à présent demeurent des analyses statiques (exploitation du maximum de déflexion seulement fournit par la poutre de Benkelman par exemple). Or dans la chaussée, le signal de chargement qui est fonction de la vitesse du véhicule est de type dynamique. L'objet de cette étude est de simuler l'essai FWD sur une chaussée souple à l'aide du code de calcul aux éléments finis CAST3M<sup>®</sup> [4] et d'étudier l'apport de l'exploitation des signaux dynamiques dans le diagnostic routier, autoroutier ou aéroportuaire.

## 2. Méthodologie

### 2-1. Appareillage et principe du Déflectomètre à masse tombante (FWD)

Le FWD est conçu pour mesurer un bassin de déflexion à la différence que la charge est tombante et appliquée sur une plaque de 300 mm de diamètre. Il se compose de trois parties distinctes regroupées dans une remorque tractée de 850 kg environ (transportant les éléments de mise en charge et les capteurs de déplacement) et d'un système de pilotage automatique, d'acquisition et de traitement des données. Le principe de l'essai est le suivant : suivant le type de structure de chaussée à tester, la masse est libérée d'une hauteur variant de 50 à 400 mm, provoquant une force variant de 7 à 120 kN. La charge est transmise à la chaussée par l'intermédiaire d'un ressort dont la constante de raideur permet de déterminer la durée du chargement. La charge standard utilisée pour l'analyse structurelle des chaussées souples est comprise habituellement entre 40 et 50 kN. Les neuf capteurs de déplacement appelés géophones (dont un au centre de la plaque) mesurent les valeurs de la déformée horizontale sur 1,8 mètres environ du point d'application de la charge (*Figure 1*). Un système d'acquisition automatique de données situé dans le véhicule tracteur permet de contrôler l'exécution des essais et d'enregistrer les données. Pour les structures routières, les paramètres de chargement sont réglés de manière à obtenir une impulsion d'une durée comprise entre 25 et 30 ms (34 Hz), correspondant à la durée de charge d'un poids lourd circulant à une vitesse moyenne d'environ 70 km / h. L'essai au FWD permet alors de renseigner sur la capacité et la condition structurelle de la chaussée au moyen d'un retro-calcul (propriétés mécaniques de chaque couche, capacité portante à supporter correctement le trafic futur et éventuellement les épaisseurs de renforcement de la chaussée). Le niveau de déflexion obtenu est global et dépend aussi bien de l'état de l'interface que de la capacité portante des différentes couches de chaussée. L'état collé ou glissant de l'interface entre couches de chaussée peut également être vérifié pour une chaussée neuve [5].



**Figure 1** : *Vue d'ensemble de la remorque FWD et de la poutre de mesure*

*A : Système de chargement (masse de 50 à 300 kg) ;*

*B : Plaque de diamètre de 300 mm sur laquelle est appliquée la charge ;*

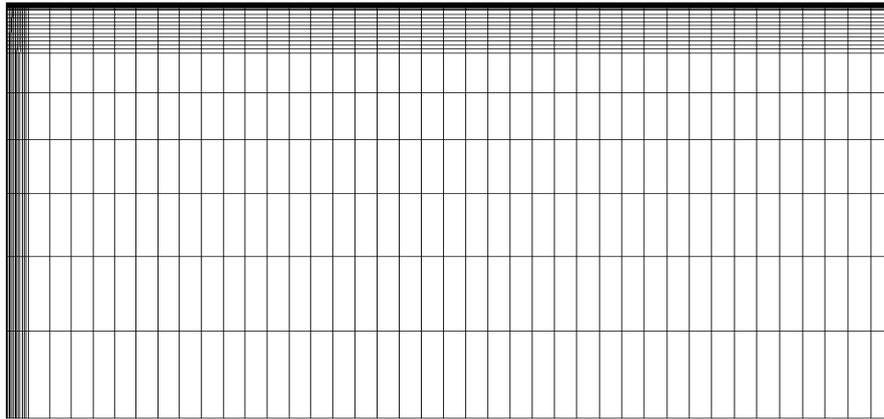
*C : Géophones supplémentaires ;*

*D : Poutre sur laquelle sont fixés les 9 géophones enregistrant la déformée longitudinale sur 1,8 mètres environ depuis le point d'application.*

## **2-2. Modélisation 2D axisymétrique de la structure de chaussée**

### **2-2-1. Présentation du modèle numérique**

Le choix d'une modélisation bidimensionnelle axisymétrique pour le comportement des structures de chaussées souples est justifié par la symétrie du problème et le fait que la modélisation tridimensionnelle implique un temps de calcul conséquent. Afin de respecter au mieux les conditions dues à un massif de sol semi-infini de Boussinesq, un maillage très étendu a été adopté tout en essayant de rester dans un nombre de degré de liberté raisonnable. Lors d'un calcul éléments finis, en plus du type d'éléments utilisés et des conditions aux limites, le niveau de précision des résultats dépend principalement de la finesse du maillage. Ainsi, un maillage plus fin a été choisi aux voisinages de la zone de chargement et en couche de surface; lieux où d'importants gradients de contraintes et de déformations sont attendus. Le maillage devient plus grossier avec l'éloignement de ces zones. Ne pouvant modéliser une structure de chaussée de longueur infinie que de manière finie dans une approche par éléments finis, le phénomène de réflexion des ondes sur les frontières en calcul dynamique est alors un problème important. Pour traiter ce problème, des frontières artificielles (appelées bandes absorbantes) sont utilisées sur les bords (verticaux et inférieurs) du modèle pour décrire l'influence du milieu extérieur et limiter l'influence des frontières et éviter les ondes réfléchies parasites [3, 5, 6]. La modélisation en mode axisymétrique implique le blocage des déplacements selon la direction radiale de la frontière située sur l'axe de symétrie. La **Figure 2**, présente le maillage (de 6 mètres de large) de la structure de chaussée tricouche analysée, comportant 1352 éléments quadrangles QUA8 et 4213 nœuds.



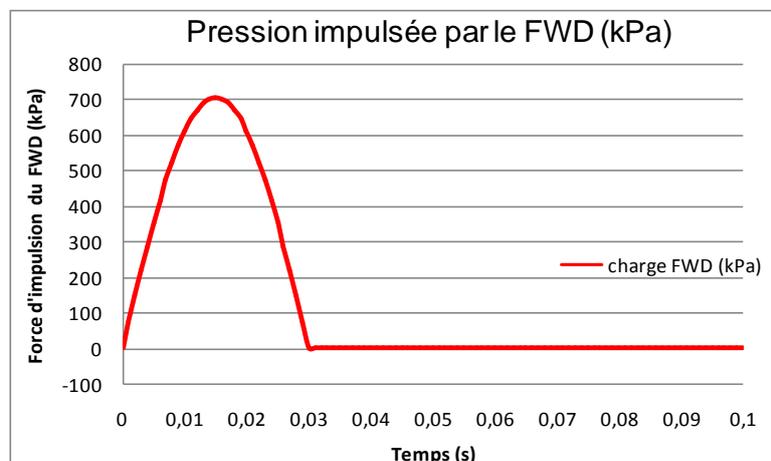
**Figure 2 :** *Vue 2D axisymétrique du maillage de la structure de chaussée analysée*

Le maillage 2D de chaussée souple analysée en mode axisymétrique est réalisé sous Cast3M [4] avec des éléments finis quadrangles QUA8, la pression impulsée dans la chaussée est de 707 kPa (correspondant à une force de 50 kN). Les caractéristiques mécaniques et géométriques de cette chaussée souple analysée sont résumées dans le **Tableau 1**, ci-après. Le coefficient de Poisson est pris égal à 0,35 pour l'ensemble des couches de chaussée qui ont chacune un comportement élastique linéaire, homogène et isotrope. Les interfaces entre les couches de chaussée sont parfaitement collées.

**Tableau 1 :** *Caractéristiques mécaniques et géométriques de la chaussée*

Couche de chaussée	Épaisseur (cm)	Module d' Young (MPa)	Masse volumique kg / m <sup>3</sup>
Couche de surface en BBSG	6	5400	2450
Couche de base en GNT	35	200	2200
Sol support (PF1)	Semi-infini	50	1900

Cette communication porte essentiellement sur la modélisation des essais FWD réalisés sur des structures de chaussées souples. C'est pourquoi les conditions de simulation doivent approcher la réalité du FWD. Compte tenu de la dissymétrie de son enveloppe, légèrement différente d'un demi-sinus [1 - 3, 7, 8], nous considérons que la charge utilisée dans le modèle est la charge réelle produite par la masse tombante du FWD. La **Figure 3** présente l'allure de la force sinus impulsée par le FWD. Le temps de chargement de la force impulsée ici est de 30 ms.



**Figure 3 :** *Allure de la force incrémentale impulsée en surface de chaussée*

**2-2-2. Fondements théoriques d'un problème dynamique de chaussée**

La déformée d'une structure soumise à des efforts statiques est calculée en écrivant l'équilibre entre les efforts internes et les efforts externes.

$$Ku = F_{\text{extérieure}} \tag{1}$$

Le champ de déplacement ainsi que les efforts calculés doivent vérifier les conditions aux limites (encastremets, appuis, bords libres, etc.). Lorsque les forces varient en fonction du temps les effets d'inertie peuvent modifier la réponse de ladite structure. Le spectre de réponse en accélération, en vitesse ou en déplacement met en évidence le contenu fréquentiel du mouvement : il fournit alors la réponse maximale d'oscillateurs linéaires, élastiques soumis à la vibration. Cette réponse se calcule simplement pour un oscillateur de masse M, de raideur K et d'amortisseur C, dont le déplacement par rapport à son support soumis à une excitation représentée par son accélérogramme a (t), est noté u (t). Le principe fondamental de la dynamique s'écrit pour cet oscillateur :

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + Ku(t) = F_{\text{extérieure}}(t) \tag{2}$$

A l'Équation d'équilibre statique, s'ajoutent les forces d'inertie (M  $\ddot{u}(t)$ ), les forces visqueuses (C  $\dot{u}(t)$ ) ainsi que le chargement dynamique. Cette Équation du mouvement ne peut être résolue complètement qu'en imposant des conditions initiales de type déplacement initial (u(0) = u<sub>0</sub>) et vitesse initiale ( $\dot{u}(0) = v_0$ ). où : M, C et K sont respectivement des matrices de masse, d'amortissement et de rigidité; u(t),  $\dot{u}(t)$ ,  $\ddot{u}(t)$  sont respectivement les vecteurs de déplacement, de vitesse et d'accélération ; F est la force impulsée. Dans le cadre de cette communication, les contraintes et déformations sont calculées en utilisant le schéma de Newmark des différences centrées (CFD : Central Finite Difference) en raison des faibles erreurs qu'il engendre, du caractère explicite de la résolution (ce qui implique une réduction considérable du temps de calcul par rapport aux schémas implicites), et surtout parce que parmi tous les schémas de la famille de Newmark, il est le plus adapté pour ce type de chargement à masse tombante et la résolution des problèmes de propagation d'ondes. Le schéma de Newmark des différences centrées permet de déterminer les déplacements et les vitesses de l'Équation d'équilibre dynamique du système (2) à chaque pas de temps en se basant sur la théorie de Taylor selon les Formules suivantes : Le développement en séries de Taylor du déplacement u(t) et de la vitesse  $\dot{u}(t)$  donne :

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_t + \frac{\Delta t^3}{6} \dddot{u}_t + \dots \tag{3}$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t \ddot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{u}_{t+\Delta t} + \dots \tag{4}$$

Les fonctions (3) et (4) ont été exprimées par Newmark sous la forme ci-après :

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_t + \beta \Delta t^3 \ddot{u}_t \tag{5}$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \Delta t \ddot{u}_t + \gamma \Delta t^2 \ddot{u}_{t+\Delta t} \tag{6}$$

L'hypothèse de la linéarité de l'accélération à l'intérieur de deux pas de temps s'écrit alors :

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \left( \frac{\ddot{u}_{t+\Delta t} - \ddot{u}_t}{\Delta t} \right) \quad (7)$$

La substitution de l'Équation 7 en 5 et 6 conduit alors à la forme standard des Équations de Newmark.

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \left( \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_t + \beta \ddot{u}_{t+\Delta t} \right) \Delta t^2 \quad (8)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + ((1 - \gamma) \ddot{u}_t + \gamma \ddot{u}_{t+\Delta t}) \Delta t \quad (9)$$

Avec  $\Delta t$  l'incrément de temps,  $\beta$  et  $\gamma$ , les paramètres de Newmark dont le choix des valeurs détermine la nature du schéma d'intégration. Le schéma des différences centrées est le cas particulier où  $\beta = 0$  et  $\gamma = \frac{1}{2}$

L'utilisation de l'hypothèse de la linéarité de l'accélération à l'intérieur du pas de temps (Équation 7) permet de retrouver le schéma de résolution des différences centrées :

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t \dot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_t \quad (10)$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_t + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_{t+\Delta t} \quad (11)$$

$$\left[ M + \frac{\Delta t}{2} C \right] \ddot{u}_{t+\Delta t} = F_{t+\Delta t} - C \left[ \dot{u}_t + \frac{\Delta t}{2} \ddot{u}_t \right] - K \left[ u_t + \Delta t \dot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_t \right] \quad (12)$$

La matrice  $\left[ M + \frac{\Delta t}{2} C \right]$  est symétrique et définie positive, l'accélération à l'instant  $t + \Delta t$  est déterminée aisément par inversion. Les hypothèses suivantes seront retenues :

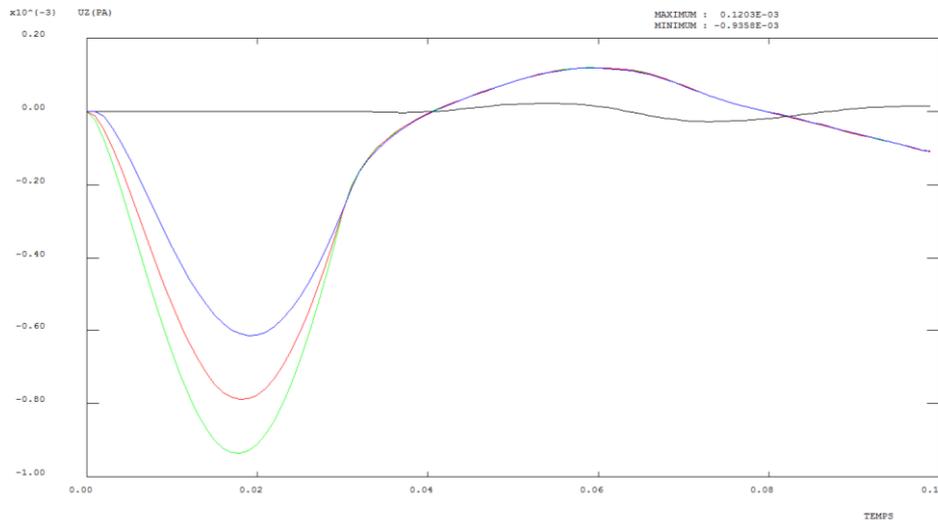
- les interfaces assurent la continuité des contraintes et des déformations ;
- chaque couche a des caractéristiques mécaniques homogènes isotropes ;
- la relation entre les contraintes et les déformations suit la loi de Hooke ;
- les déformations sont faibles.

Les valeurs choisies pour  $\beta$  et  $\gamma$  définissent les propriétés du schéma d'intégration. Pour assurer le caractère explicite du schéma de newmark, nous devons avoir  $\beta = 0$  dans l'Équation 8. Pour assurer la stabilité du régime, avec  $\beta = 0$ , nous devons avoir  $\gamma \geq 0,5$ . Cependant, le régime devient dissipatif pour  $\gamma > 0,5$ .

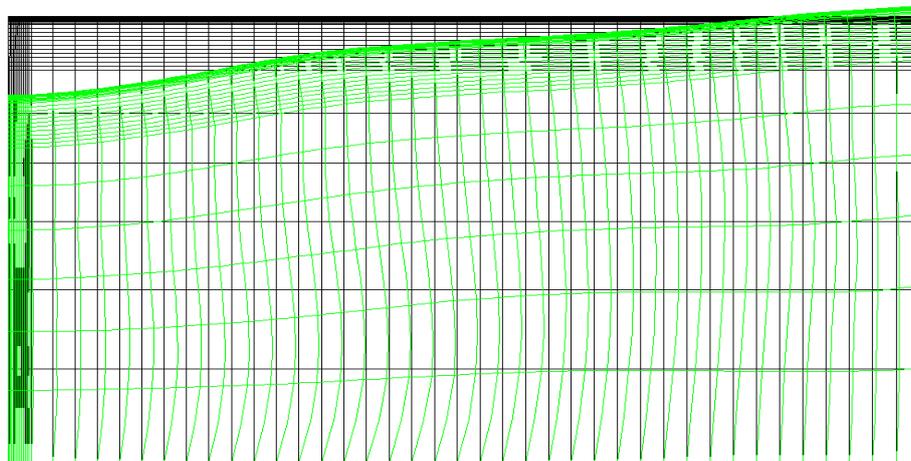
### 3. Résultats et discussion

La Figure 4, ci-dessous présente les signaux de déflexion incrémentale de la chaussée dégradée. Au regard de ces courbes, on remarque que la déflexion maximale vaut 95,58 / 100<sup>3</sup> mm. Celle-ci, est obtenue au temps

de chargement  $t = 18$  ms. Pour obtenir l'allure de la courbe de déflexion maximale en surface de chaussée, un calcul incrémental est à nouveau effectué et les champs de déplacement, de contrainte et de déformation sont extraits dans la phase de post-processeur à  $t = 18$  ms. La **Figure 5**, présente la déformée incrémentale superposée sur le maillage initial. L'allure des lignes du maillage déformé, montre bien le caractère dynamique du calcul.



**Figure 4 :** Signaux de déflexion (en mètre) incrémentale à différents points de la chaussée dégradée sous impulsion de la charge dynamique du FWD (déflexion maximale 93,58 / 100<sup>è</sup> mm)

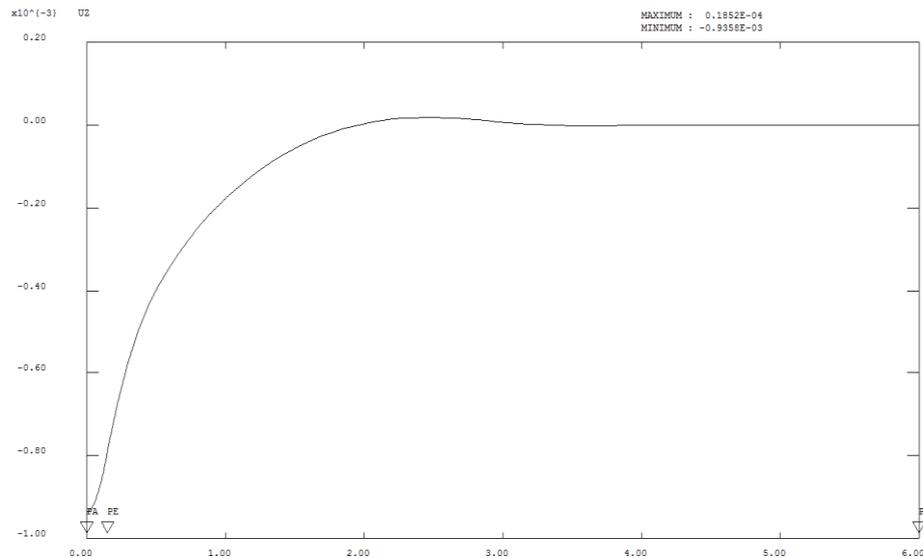


**Figure 5 :** Vue 2D de la déformée incrémentale de la chaussée dégradée sous impulsion de la charge dynamique du FWD

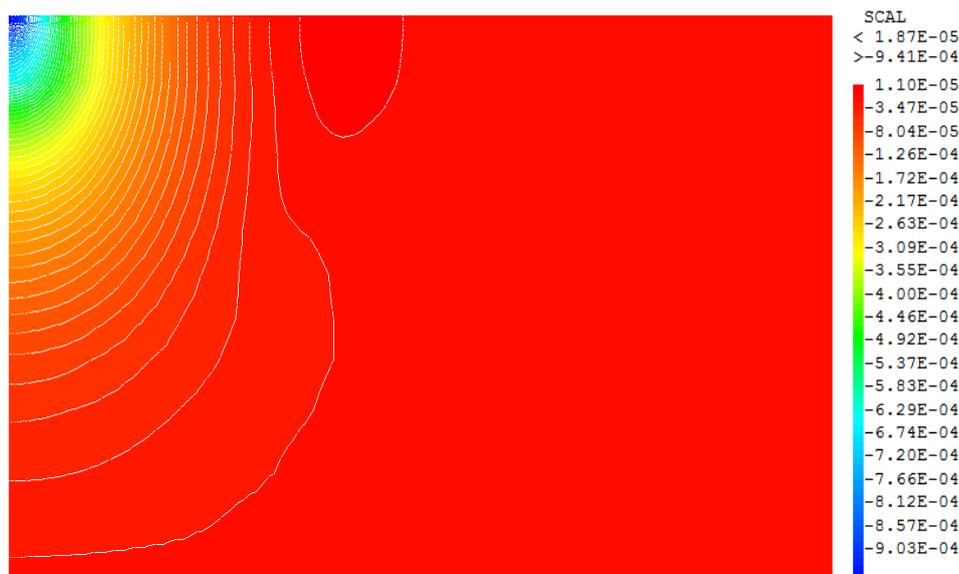
La courbe de déflexion, la cartographie des déflexions, la cartographie des déformations horizontales et verticales, ainsi que la contrainte de Von Mixès, fonction de la géométrie du modèle de chaussée sont représentées respectivement sur les **Figures 6 à 11** ci-dessous, à l'instant de chargement  $t = 18$  ms. Tous les paramètres mis en évidence sur les **Figures** ci-après sont plus élevés au centre du point d'impact de la charge dynamique de 50 kN, qui matérialise l'axe de symétrie du modèle 2D utilisé. A partir de la courbe de déflexion, qui est l'information majeure recherchée en diagnostic de chaussée, un calcul inverse est effectué en utilisant la méthode analytique d'Odemark-Boussinesq ou le module rétro-calcul du logiciel alizé afin de

déterminer les modules des différentes couches de chaussée dégradée. Après cette étape, un calcul de la durée de vie résiduelle est effectué, ensuite un nouveau calcul mécanique [9] par la méthode classique longtemps développée et publiée sous différentes formes par Zoa Ambassa [10 - 18] et ainsi effectuer un calcul itératif [2, 19] de l'épaisseur de la couche de renforcement en respectant le critère prépondérant d'orniérage des matériaux non liés,  $\varepsilon_z \leq k \cdot \left(\frac{1}{Nf}\right)^m$  ou de fatigue des matériaux bitumineux,

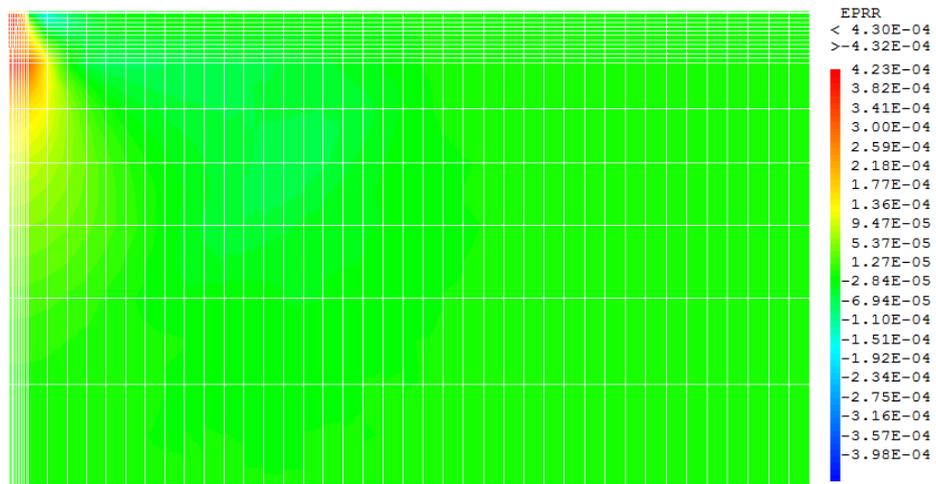
$$\varepsilon_{t,ad} \leq \varepsilon_{6(10^\circ C, 25 Hz)} \cdot \left(\frac{E_{(10^\circ C, 10 Hz)}}{E_{(25^\circ C, 10 Hz)}}\right)^{0,5} \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s$$



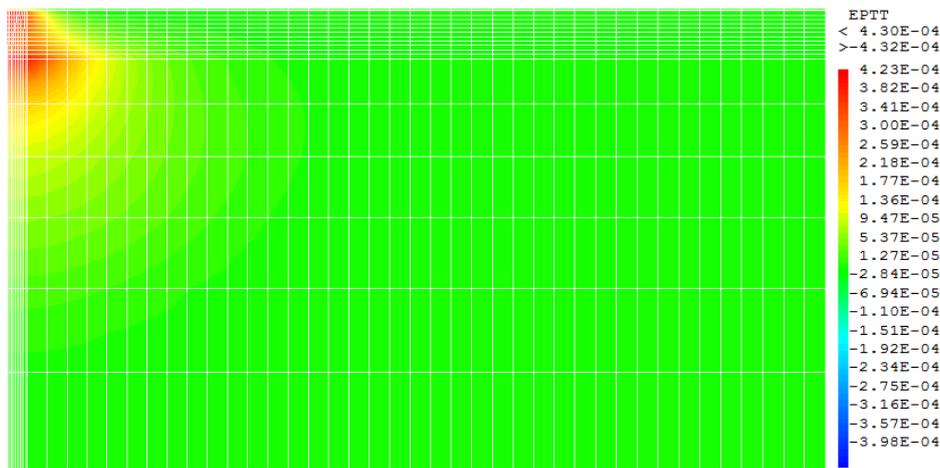
**Figure 6 :** Courbe de la déflexion incrémentale (à  $t = 18$  ms) de la chaussée dégradée sous impulsion de la charge dynamique du FWD (en abscisse, largeur du modèle de chaussée : 6 m et en ordonnée la déflexion en mètre) (déflexion maximale 93,58 / 100<sup>mm</sup>)



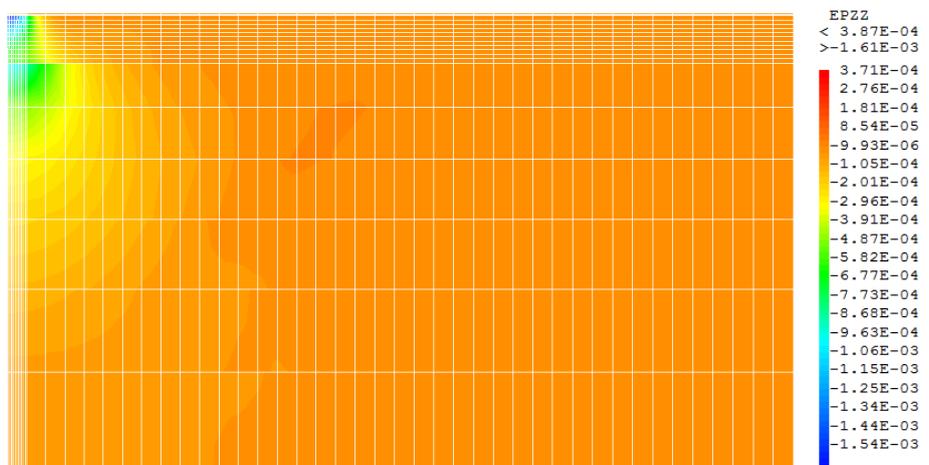
**Figure 7 :** Cartographie de la déflexion (en mètre) incrémentale (à  $t = 18$  ms) de la chaussée sous impulsion de la charge dynamique du FWD



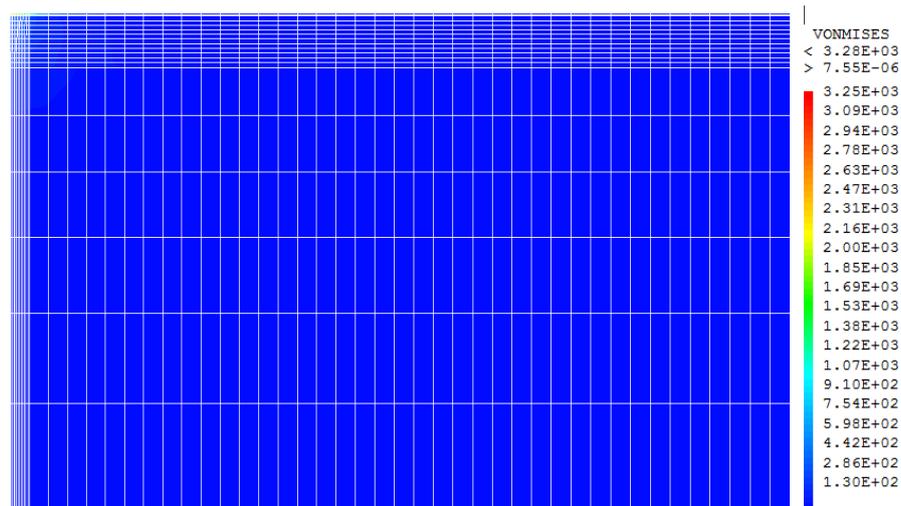
**Figure 8 :** *Cartographie de la déformation (en mètre) incrémentale (à  $t = 18$  ms) radiale de la chaussée sous impulsion de la charge dynamique du FWD*



**Figure 9 :** *Cartographie de la déformation (en mètre) incrémentale (à  $t = 18$  ms) horizontale transversale de la chaussée sous impulsion de la charge dynamique du FWD*



**Figure 10 :** *Cartographie de la déformation incrémentale (à  $t = 18$  ms) verticale de la chaussée sous impulsion de la charge dynamique du FWD*



**Figure 11 :** Cartographie de la contrainte incrémentale (à  $t = 18$  ms) de Von Mixès (en kPa) de la chaussée sous impulsion de la charge dynamique du FWD

#### 4. Conclusion

Dans cet article, il a été question d'analyser l'apport du FWD pour l'expertise des chaussées souples qui représentent une grande partie des chaussées revêtues camerounaises. Il a été démontré qu'à n'importe quel moment de la vie d'une chaussée, il est important d'évaluer son état structural à partir des moyens non destructifs tel le FWD. De l'information principale obtenue, qui est la courbe de déflexion, on procède par calcul inverse (*backcalculation*) pour déterminer les modules des couches, le niveau de collage des interfaces et déterminer la durée de vie de la structure par la méthode classique, ensuite définir les épaisseurs des couches de renforcement en respectant les déformations admissibles. Ainsi, pour chaque nouvelle sollicitation du trafic poids lourd, agissant en surface de chaussée, on doit en tant qu'expert, déterminer un supplément de dommage en tenant compte non seulement des conditions environnementales sur les propriétés des matériaux à cet endroit, mais également des dommages déjà subis par ladite structure. L'intérêt d'une telle méthode réside dans le suivi de l'évolution du comportement des chaussées à tout instant (évaluation de son état structural, estimation de sa durée de vie résiduelle). Cette évaluation permettrait d'introduire la notion de cycle de vie d'une structure de chaussée pour des analyses économiques prenant en compte les investissements, les coûts d'exploitation et les coûts d'entretien.

#### Références

- [1] - M. BROUTIN, "Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers", Doctor of Philosophy, ENPC, Paris, France, (2010) 370 p.
- [2] - DGAC-STBA-STAC, "Auscultation des chaussées souples aéronautiques au HWD", Guide technique, Paris, (février 2014) 86 p.
- [3] - EL A. AYADI, "Apport de l'analyse dynamique pour le diagnostic des chaussées", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, (2010) 160 p.
- [4] - CAST3M<sup>®</sup>, "Cast3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission", see web site: <http://www-cast3m.cea.fr/>, (2015).

- [5] - M. DIAKHATE, "Fatigue et comportement des couches d'accrochages dans les structures de chaussée", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, (2007) 241 p.
- [6] - D. ZOA AMBASSA, "Cours d'Application des éléments finis/Modélisation numérique des ouvrages, 4<sup>e</sup> année, élèves ingénieurs géotechniciens", Polytech Grenoble, France, (2014) 57 p.
- [7] - M. L. NGUYEN, "Capacité portance évaluée par le FWD", Journée technique du LAVOC, EPFL, Lausanne, Suisse, (22 novembre 2011) 31 p.
- [8] - B. PICOUX, A. EL AYADI, C. PETIT, "Dynamic response of flexible pavement submitted by impulsive loading", *International Journal Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29 (2009) 845 - 854.
- [9] - D. M. BURMISTER, "The theory of stresses and displacements in layered systems and applications of the design of airport runways", *Proceedings of the highways Research board*, 23 (1943) 126 - 148.
- [10] - A. ZOA, F. ALLOU, C. PETIT, R. MEDJO, "Modélisation viscoélastique de l'endommagement des chaussées bitumineuses sous chargement multi-essieux", *Actes des 29<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Tlemcen, Algérie, 3, (29-31 Mai 2011) 120 - 129.
- [11] - A. ZOA, F. ALLOU, C. PETIT, R. MEDJO EKO, "Modélisation viscoélastique de l'endommagement des chaussées bitumineuses sous essieux multiples", *International Journal DSpace@UABT*. See website : <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/522>, (2011).
- [12] - A. ZOA, F. C. ALLOU, PETIT, R. MEDJO EKO, "Analyse de la sensibilité du modèle de fatigue multilinéaire pour la prédiction de la durée de vie des chaussées bitumineuses sous chargement multi-essieux", *Actes des 30<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Chambéry, Savoie, France, (06-08 Juin 2012) 872 - 881.
- [13] - A. ZOA, F. ALLOU, C. PETIT, R. MEDJO EKO, "Top-down and Bottom-up Fatigue Cracking of Bituminous Pavement Subjected to Tangential Moving Loads", In Scarpas, A., Kringos, N., Al-Qadi, I., and Loizos, A., editors, *7<sup>th</sup> RILEM International Conference on Cracking in Pavement, volume 2 of RILEM Bookseries, 675-685*. Springer, The Netherlands, on 20-22 June 2012. Doi :10.1007/978-94-007-4566-7-6.
- [14] - A. ZOA, F. ALLOU, C. PETIT, R. MEDJO EKO, "Fatigue Life Prediction of an Asphalt Pavement Subjected to Multiple Axle Loadings with Viscoelastic FEM", *International Journal Construction and Building Materials*, 43 (2013) 443 - 452.
- [15] - ZOA AMBASSA, "Vers la modélisation du comportement à la fatigue des chaussées bitumineuses routières sous chargement réel", Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, (2013) 267 p.
- [16] - ZOA AMBASSA D<sup>©</sup>, "Méthodes Avancées de Dimensionnement des Chaussées Bitumineuses Routières sous Chargements Complexes", Editions Universitaires Européennes, ISBN 978-613-1-58334-6 ; (Octobre 2013) 328p. Voir le site web : <https://www.morebooks.de/store/fr/book/m%C3%A9thodes-avanc%C3%A9es-de-dimensionnement-des-chauss%C3%A9es/isbn/978-613-1-58334-6>
- [17] - A. ZOA, F. ALLOU, C. PETIT, R. MEDJO, "Évaluation de l'Aggressivité du Trafic sur des Chaussées Bitumineuses en Giratoire", *International Journal BLPC*, 280 - 281, (Novembre 2013) 171 - 188.
- [18] - A. ZOA, R. MEDJO EKO, F. ALLOU, C. PETIT, "Outils et méthodes pour la conception et le dimensionnement rationnel des chaussées sous chargement complexe", *Actes des 6<sup>e</sup> Journées Africaines de la Géotechnique*, Ouagadougou, Burkina Faso, (10-12 juin 2014).
- [19] - LCPC-SETRA, "Conception et dimensionnement des structures de chaussée", Guide technique, Paris, (décembre 1994).