

Chaussées souples à assise en matériaux latéritiques : Modélisation de la déflexion par la méthode des éléments finis

Donald HOUEMAVO^{1,2}, Tariq OUAHBI¹, Yvette TANKPINOU KIKI³, Said TAIBI¹

¹ Université Le Havre Normandie, Normandie Univ, LOMC, UMR 6294 CNRS, 76600 Le Havre, France

² Université d'Abomey-Calavi, LEMA, Abomey-Calavi, Benin

³ Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques, LaPIT, Lokossa,

RESUME

Le choix des épaisseurs des couches de chaussée constitue un défi majeur pour les ingénieurs routiers, étant donné leurs impacts directs sur les coûts de construction des routes revêtues. Cette étude vise à comparer les résultats obtenus dans les mêmes hypothèses de comportement des matériaux (isotrope et élastique linéaire) avec les logiciels Alizé_Lcpc et Abaqus. L'approche adoptée comprend la modélisation d'une chaussée souple, en considérant deux épaisseurs de la couche de roulement, une couche de base composée d'une grave latéritique améliorée au ciment et une couche de fondation en grave latéritique reposant sur une plateforme support en sable. Les résultats obtenus à l'issue des simulations aux éléments finis tridimensionnels permettent de modéliser avec précision l'essieu jumelé. Ils montrent que les déflexions maximales sont obtenues au centre des disques et sont légèrement supérieures aux déflexions aux centres du jumelage fournies par Alizé.

Mots-clés Déflexion, chaussées souples, Modélisation éléments finis, matériaux latéritiques, Abaqus

I. INTRODUCTION

Le Bénin, pays d'Afrique de l'ouest, est résolument engagé dans une démarche de développement économique, grâce à un réseau routier revêtu estimé à plus de 3200 km en 2021 (figure 1). Chaque année, d'énormes efforts sont déployés pour maintenir ce réseau routier dans un état de service acceptable. Pour la période 2021-2026, il est prévu la reconstruction en 2*2 voies du tronçon Cotonou-Allada-Bohicon-Dassa d'une longueur de 207 km (RNIE 2) puis l'aménagement, le bitumage, la réhabilitation ou le renforcement de 1 112 km de route (BéninRévélé, 2021).

Le dimensionnement d'une structure de chaussée nécessite d'évaluer le niveau de sollicitations et de confronter ces sollicitations aux paramètres limites des différents matériaux. En France et au Bénin, le logiciel Alizé_Lcpc est largement utilisé à cet effet. Cependant, ce logiciel ne permet pas d'analyser l'évolution de la déflexion en fonction du nombre de cycle de chargement afin d'apprécier la fatigue et la durée de vie de la structure routière. Pour cela, il est crucial de caler un modèle d'éléments finis capable d'évaluer cette évolution de la déflexion en fonction du nombre de

cycles de la charge. Plusieurs études récentes ont exploré l'impact du trafic sur l'orniérage des chaussées, utilisant le modèle 3D d'Abaqus. Leonardi G. a choisi une formulation de durcissement dans le temps comme loi de fluage du mélange d'asphalte pour analyser l'effet du processus d'atterrissage des avions sur l'orniérage d'une chaussée d'aéroport (Leonardi, 2015). Wang Y. et al. ont développé un modèle de chaussée pour examiner l'application de la charge de la roue sur la chaussée. Ils ont évalué l'influence de divers paramètres du camion tels que le jeu de roues, le jeu d'essieux, la vitesse de déplacement du véhicule et la pression des pneus sur l'orniérage (Wang et al., 2017). Ahmed Alkaissi Z. et al. ont étudié l'effet des propriétés des matériaux locaux de la couche de base et de la couche de fondation sur l'orniérage d'une chaussée souple sous l'effet d'une charge de trafic répétée (Ahmed Alkaissi & Mawla Al-Badran, 2018). Asim M. et al. ont évalué la profondeur de l'ornière dans différentes conditions de température, de charge et de propriétés de matériaux sur une section de chaussée souple (Asim et al., 2021). Liu Z. et al. ont proposé une méthode de correction des paramètres structurels des chaussées en asphalte semi-rigide. Leur approche intègre des simulations numériques, des essais en laboratoire et des essais de chaussée accélérés (APT). Dans leur étude, ils ont réalisé des analyses dynamiques du module et des essais de fluage en compression statique uniaxiale afin d'explorer l'effet de la température et de la fatigue sur ces paramètres. Ces données ont été essentielles pour la construction d'un modèle reflétant les paramètres réels de la chaussée (Liu et al., 2022).

La durabilité d'une route est tributaire de la prise en compte du chargement réel ainsi que de l'aptitude au vieillissement des matériaux constituant sa structure lors du dimensionnement, mais aussi de la qualité des travaux de construction. La couche d'assise permet à la chaussée souple de résister mécaniquement aux charges induites par le trafic. Les graves latéritiques sont largement utilisées dans les travaux de génie civil, plus particulièrement en construction routière dans la plupart des pays de la zone intertropicale (Issiakou, 2017). Ce sont des sols complexes, résiduels ou détritiques provenant de l'altération des roches préexistantes de différente nature. Certaines classes de sols latéritiques sont utilisées en corps de chaussées (couches de base et couches de fondation), en appliquant des règles qui ont été définies par pays, à partir de règles générales d'aptitude des sols au compactage (Bohi, 2010).

Les réserves de sols latéritiques disponibles au Bénin en 2018 sont estimées à 10 410 949 m³ (Gbaguidi et al., 2018). En fonction des localités, les gisements latéritiques présentent des caractéristiques physiques et mécaniques spécifiques. Ces caractéristiques ne répondent toujours pas aux exigences des routes à trafic élevé. Le traitement aux liants hydrauliques est depuis longtemps une solution idéale pour les améliorer. En effet, les matériaux latéritiques peuvent être rendus aptes à être utilisés en couche de base par un traitement à la chaux ou au ciment. Avec un dosage faible, ils sont dits améliorés et ont un comportement souple. Avec un dosage plus élevé, ils sont dits stabilisés et présentent une rigidité appréciable et une faible déformabilité (CEBTP, 1984). Récemment, l'AIPCR-AGEPAR a précisé la valeur seuil de 3% pour distinguer l'amélioration du traitement (AIPCR & AGEPAR, 2019).

A titre d'exemple, l'aménagement et le bitumage en 2009 de la route de Bopa-Bénin (figure 2), a nécessité 300 000 m³ de mouvement de terre pour les terrassements généraux. La réalisation de la couche de fondation a demandé 150 000 m³, tandis que la couche base en grave latéritique stabilisée avec 4% de ciment, traitée au pulvimixer, a nécessité 70 000 m³ de latérite et 6 500 tonnes de ciment

(SBF-BTP, 2009). En 2022, il est constaté un orniérage important, qui est l'une des principales dégradations structurelles observées sur les chaussées (figure 3). Au Bénin, les effets thermiques avec des températures pouvant avoisiner 50°C et les charges excessives sur le réseau routier sont les principales causes de pathologie.

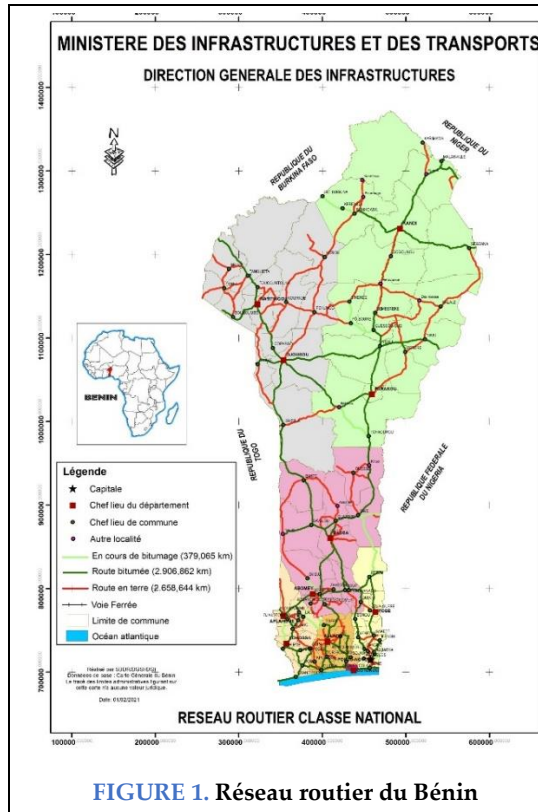


FIGURE 2. Bitumage de l'axe Bopa, Bénin (SBF-BTP, 2009)



FIGURE 3. Dégradation observée sur l'axe Bopa, Bénin (2022)

L'objectif final de notre travail est d'étudier l'évolution de la perte de rigidité des chaussées en fonction du nombre de passage ou cycles de chargement pour différentes structures de chaussées (souples, semi-rigides, bitumineuses épaisses...) utilisées sur le réseau routier au Bénin. L'estimation du réseau de chaussées souples est de l'ordre de 53%. Il s'agira de considérer plusieurs lois de comportement pour les différentes couches de la chaussée ; la couche de roulement et le corps de chaussée avec une couche de base éventuellement améliorées pour intégrer les effets de température et de surcharges, à l'origine des pathologies.

Dans cette première étude, une comparaison des résultats obtenus à l'aide des logiciels Alizé-Lcpc et Abaqus, qui reposent sur des approches de calcul différentes sera réalisée avec les mêmes hypothèses sur le comportement des matériaux isotropes et élastique linéaire. Par la suite, seul le logiciel Abaqus sera utilisé pour traiter l'aspect cyclique.

II. HYPOTHESES DE CALCUL

Dans un premier temps, il s'agit de déterminer la déflexion de la structure de chaussée à partir du logiciel Alizé-Lcpc qui met en œuvre la solution semi-analytique développée par Donald M. Burmister. La solution de calcul des déplacements et sollicitations internes est celle des structures

multicouches semi-infinies à comportement élastique, linéaire et isotrope, créés par une charge verticale, statique et uniforme, appliquée sur un disque circulaire à la surface du modèle (Burmister, 1943). A cet effet, seules les épaisseurs des couches supérieures sont introduites, l'épaisseur de la couche inférieure (épaisseur plateforme support) est considérée semi-finie. Les autres dimensions en plan (longueur et largeur) sont considérées aussi infinies. Les caractéristiques (Module de Young E et Coefficient de poisson ν) des matériaux, indiquées dans le tableau 1, sont introduites dans le logiciel. Le chargement est celui d'un essieu jumelé chargé à 130 kN, représentant l'essieu de référence pour le dimensionnement des chaussées dans plusieurs pays. La structure étant une structure souple, les interfaces entre toutes les couches sont de type collé.

Dans un second temps, une détermination de la déflexion de la structure de chaussée est réalisée avec le logiciel Abaqus qui est un logiciel d'élément finis. Pour cette simulation, les dimensions de toutes les couches et les caractéristiques (Module de Young E et Coefficient de poisson ν) des matériaux sont renseignées (tableau 1). Le chargement est le même comme celui décrit pour Alizé-Lcpc. L'analyse par éléments finis s'est adaptée à l'application de problèmes de chaussée complexes car elle permet la prise en compte du chargement réel. La géométrie du modèle d'éléments finis tridimensionnels (3D) a été construit en Abaqus (6.14-5). La géométrie, le maillage, les conditions aux limites et les interactions sont décrits au point B.

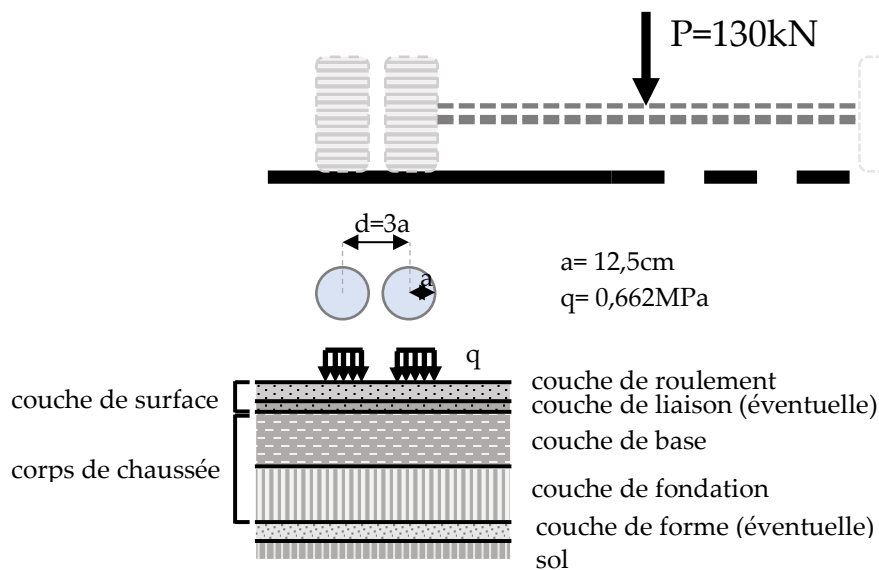


FIGURE 4. Massif de sol multicouche et charge de référence (LCPC, 2010)

A. Propriétés des matériaux constitutifs de la chaussée étudiée

La plateforme est de classe de portance des sols S4 (CEBTP, 1984). Les épaisseurs optimisées de la structure de chaussée pour le trafic T3 issues du guide pratique de dimensionnement des chaussées souples en pays tropicaux sont adoptées. Le tableau 1 synthétise les propriétés des matériaux ainsi que le modèle de la structure. Le Béton Bitumineux à 30°C a pour module de Young $E=1300\text{MPa}$.

TABLEAU 1. Modèle de structure

Couches		Matériaux	Epaisseurs (cm)	Coefficient de Poisson	Module de Young (MPa)
Couche de roulement		Béton Bitumineux (BB)	h_i	0,35	1300
Assise	Couche de base	Grave Latéritique Améliorée au Ciment (GLAC)	20	0,25	1395
	Couche de Fondation	Grave Latéritique (GL)	15	0,35	320
Plate – forme (PF) / Sol support		Sable	660	0,35	95

B. Détails du modèle étudié par éléments finis

1. Géométrie du modèle et conditions aux limites

La longueur, la largeur et l'épaisseur de toutes les couches sont définies sur la figure 5. Il faut considérer à minima ces dimensions, pour se rapprocher de l'hypothèse de milieu semi-infini dans la méthode analytique. Les conditions aux limites n'ont pas une influence significative sur la prédiction de la réponse du modèle, la surface inférieure du sol support est supposée encastree et les côtés des couches sont supposés libres, ce qui signifie que les nœuds au fond de la plateforme ne peuvent pas se déplacer horizontalement ni verticalement (Van Cauwelaert, 1984). Aucune contrainte géostatique est ici considérée.

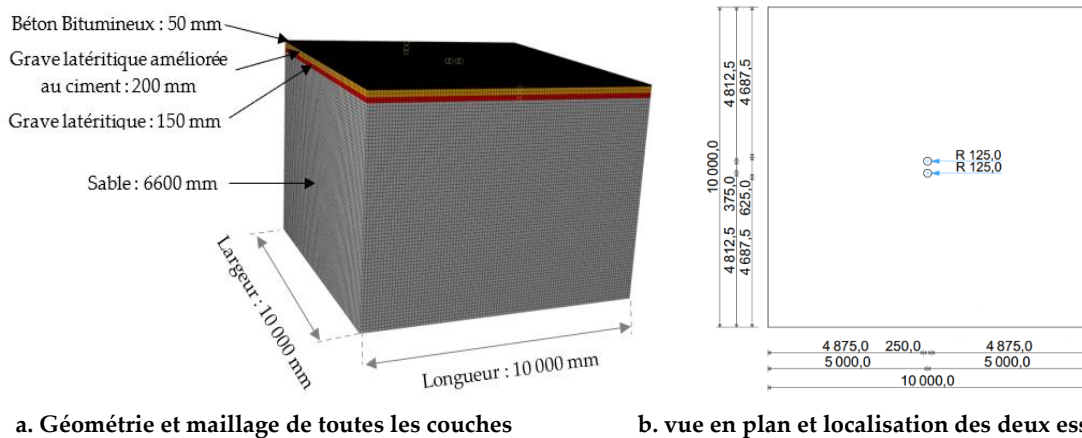


FIGURE 5. Géométrie, maillage de toutes les couches et chargement de la chaussée

2. Types d'éléments finis et maillage

Toutes les parties sont modélisées à l'aide de l'élément de brique tridimensionnel continuum à 8 nœuds (C3D8R) avec intégration numérique d'ordre réduit disponible dans Abaqus (6.14-5). Cet élément a la capacité de représenter les grandes déformations, les non-linéarités géométriques et matérielles. Toutes les couches sont simulées avec la même forme pour préserver la continuité des nœuds entre les couches consécutives. La figure 5 a. montre le modèle de maillage de toutes les couches.

3. Interaction entre les couches

Les interfaces entre les couches de la structure sont toutes collées car la structure considérée est souple. La méthode de discrétisation utilisée dans le logiciel est « surface à surface » et de type Tie.

4. Charge appliquée

La charge de la roue jumelée appliquée dans Abaqus est de 65 kN représentant un demi-essieu jumelé et est répartie uniformément sur deux disques de rayon 125 mm et de surface totale 98174,77 mm². La pression de contact uniforme résultante est de 0,662 MPa, ce chargement est celui d'un essieu standard français (figure 5 b).

III. RESULTATS

A. Résultat de simulation de la déflexion avec Alizé Lcpc

Les résultats obtenus avec Alizé indique une déflexion initiale et un rayon de courbure spécifiques pour chacune des épaisseurs de la couche roulement. Pour la couche de roulement 50 mm, la déflexion initiale est de 49,6 mm/100 avec un rayon de courbure 258,3 m. Pour la couche de roulement 100 mm déflexion initiale est de 44,1 mm/100 avec un rayon de courbure de 287,3 m. Le tableau 2 renseigne sur ces valeurs.

TABLEAU 2. Calcul de la déflexion avec Alizé pour la couche de roulement d'épaisseur 100 mm

Couche de roulement (mm)	Zcalcul (m)	EpsT (μdef)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μdef)	SigmaZ (MPa)	Déflexion (mm/100)	Rayon de courbure (m)
50	0,000	34,1	0,184	63,4	0,658	49,6	258,3
	0,050	43,8	0,261	227,3	0,612		
	0,050	43,8	0,229	324,7	0,612		
	0,250	-203,1	-0,305	169,7	0,104		
	0,250	-203,1	-0,035	375,8	0,104		
	0,400	-234,6	-0,078	312,6	0,051		
	0,400	-234,6	-0,004	549,2	0,051		
100	0,000	9,3	0,115	103,7	0,659	44,1	287,3
	0,100	-28,9	0,133	261,0	0,484		
	0,100	-28,9	0,091	307,1	0,484		
	0,300	-169,5	-0,259	134,7	0,077		
	0,300	-169,5	-0,033	293,5	0,077		
	0,450	-189,2	-0,064	257,2	0,041		
	0,450	-189,2	-0,003	448,6	0,041		

B. Résultat de simulation avec Abaqus

Sous l'effet du chargement uniformément réparti sous les deux disques, représentant la surface de contact des essieux, le champ de déplacement associé se développe de manière quasi sphérique jusqu'à environ 3 m de profondeur. Toutefois, l'effet de chaque essui est perceptible en surface (figure 6).

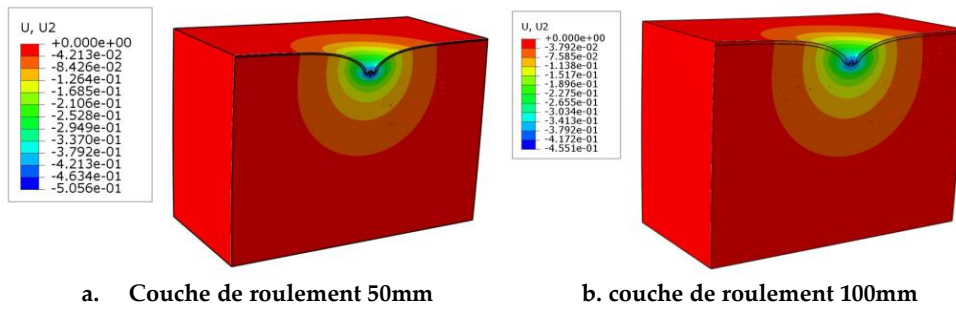


FIGURE 6. Visualisation du champ de déplacement (mm) dans le corps de chaussée avec Abaqus

L'examen plus détaillé de la surface montre un déplacement maximal de 0,506 mm obtenu avec la couche de roulement 50 mm et 0,455 mm pour celui de la couche de roulement 100 mm sous chaque essieu (figure 7a.). Le déplacement entre les essieux est moins important, respectivement 0,435 mm pour la couche de roulement 50 mm et 0,392 mm pour la couche de roulement 100 mm (figure 7b.).

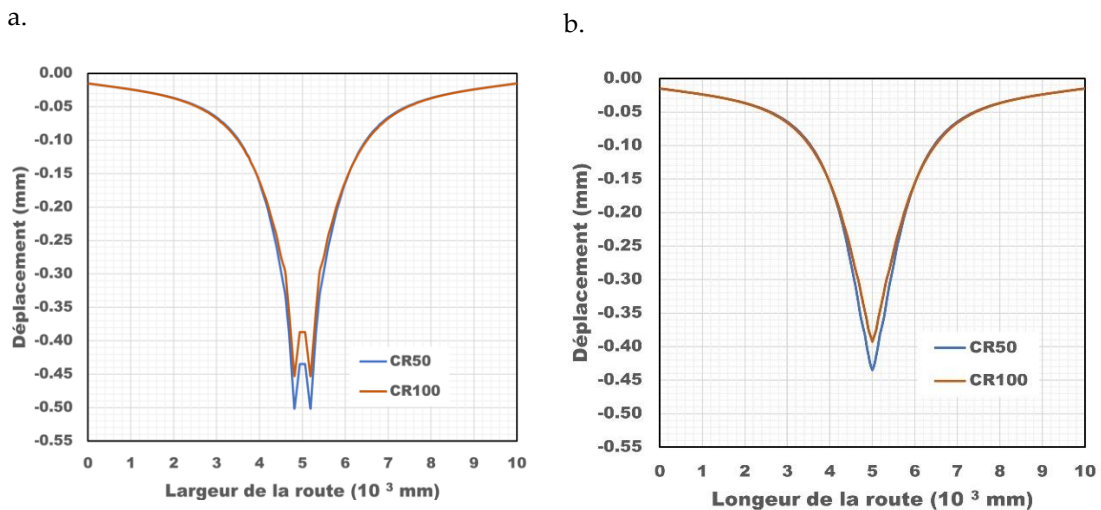


FIGURE 7. Profil transversal du déplacement vertical en surface (largeur : perpendiculaire à l'axe de la route et longueur : parallèle à l'axe de la route) avec Abaqus

La déformation verticale en surface indique une dilatation autour des essieux et une forte contraction sous les essieux. La valeur maximale en contraction pour la couche de roulement de 50 mm est de $4,356 \cdot 10^{-04}$ et de $3,567 \cdot 10^{-04}$ pour la couche de roulement de 100 mm (figure 8).

L'effet du chargement uniformément réparti se développe de manière sphérique. La variation de contrainte verticale maximale en surface générée sous chaque essieu est de 0,617 MPa pour la couche de roulement 50 mm et de 0,527 MPa pour la couche de roulement 100 mm (figure 9).

La variation de contrainte verticale maximale en surface entre essieu est plus faible, 0,105 MPa pour la couche de roulement 50mm et de 0,114 MPa pour la couche de roulement 100 mm (figure 9).

L'analyse de la variation de contrainte verticale au centre de disque et en profondeur montre que les courbes obtenues avec les deux outils se concordent parfaitement. Les courbes obtenues avec le logiciel Abaqus renseignent sur la diffusion de contrainte verticale générée par la charge avec la profondeur, notamment dans la plate-forme support (figure 10).

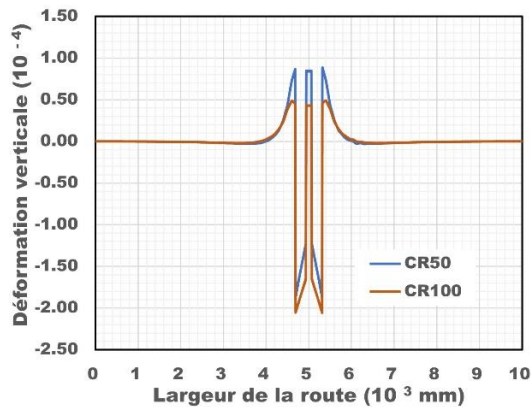


FIGURE 8. Profil transversal de la déformation verticale en surface avec Abaqus

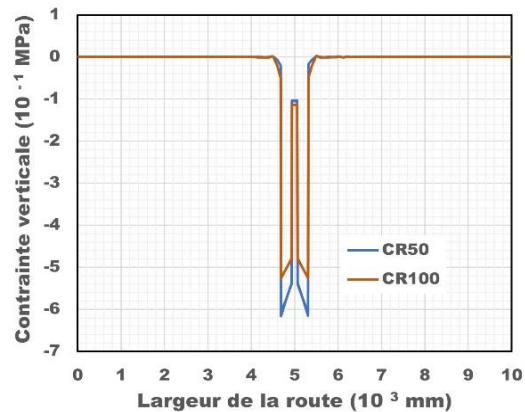


FIGURE 9. Profil transversal de la contrainte verticale en surface avec Abaqus

A l'interface entre la couche de roulement et la couche de base, la contrainte verticale est de 0,612 MPa ; entre la couche de base et la couche de fondation, elle est de 0,104 MPa et entre la couche de fondation et la plate-forme support, elle est de 0,051 MPa pour la couche de roulement 50 mm (figure 10a). Pour une couche de roulement 100 mm, les valeurs respectives sont de 0,659 MPa, 0,077 MPa et de 0,041 MPa (figure 10b). Compte tenu du maillage dans Abaqus les valeurs de la contrainte verticale générée par la charge en surface ne correspondent pas aux valeurs d'entrée par conséquent d'Alizé. Le logiciel Alizé ne permet pas d'obtenir la diffusion de la variation de contrainte verticale dans la plate-forme support. Les valeurs de contrainte verticale sous l'effet de la charge tendent vers zéro à partir d'une profondeur de 3 m (figure 10).

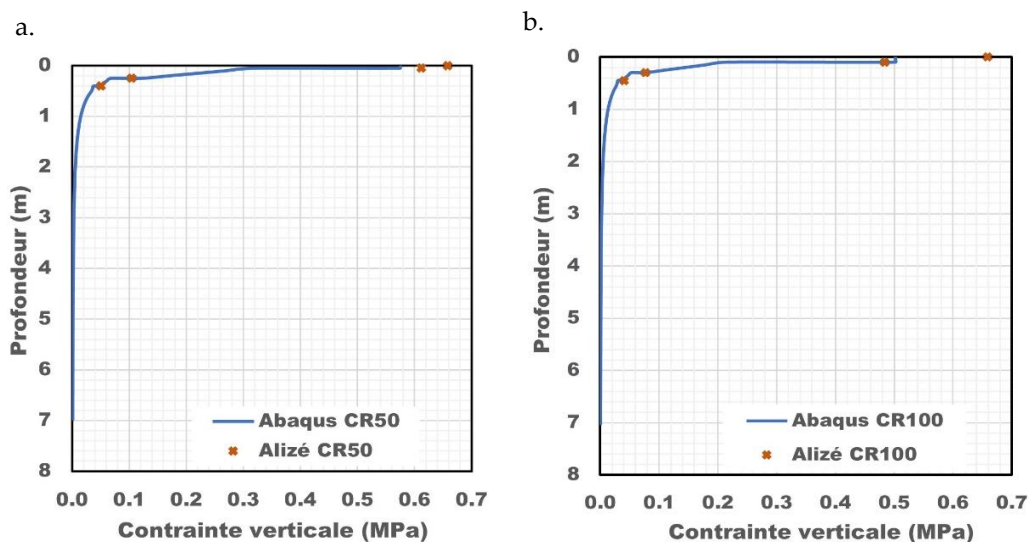


FIGURE 10. Diffusion de l'effet de la surcharge en fonction de la profondeur

C. Comparaison des déflexions et du rayon de courbure entre les deux méthodes

Le tableau 3 résume les résultats des déflexions des simulations du modèle de la structure obtenues avec les deux logiciels. Il en ressort que l'écart entre les valeurs de déflexion des deux outils est de

l'ordre d'un centième de millimètre (1/100 mm). Ce qui a une influence d'environ 20 m d'écart sur les valeurs du rayon de courbure. Les différences relatives sur les valeurs de déflexion sont de 2,02% pour la couche de roulement 50 mm et de 3,17% pour la couche de roulement 100 mm. Par contre les différences relatives entre les rayons de courbure sont de 7,90% pour la couche de roulement 50 mm et de 8,04% pour la couche de roulement 100 mm. La variation de l'épaisseur de la structure de chaussée a permis de constater que lorsque l'épaisseur de la couche augmente, la déflexion diminue approximativement du même ordre de grandeur.

TABLEAU 3. Récapitulatif des valeurs de déflexion maximale et du rayon de courbure

Structure		Alizé au centre du jumelage	Abaqus au centre du jumelage	Abaqus sous un essieu
Déflexion (mm/100)	Couche de roulement 50mm	49,6	43,5	50,6
	Couche de roulement 100mm	44,1	39,2	45,5
Rayon de courbure (m)	Couche de roulement 50mm	258,3	297,7	237,9
	Couche de roulement 100mm	287,3	331,4	264,2

IV. CONCLUSION

Les structures des chaussées souples avec une couche de roulement en Béton Bitumineux (BB) et une couche de base améliorée, qui sont majoritairement utilisées au Bénin, présentent des pathologies sous l'effet d'un fort trafic $T_i > T_3$.

Ce travail a permis de comparer les valeurs de déflexion et de rayon de courbure obtenues avec les logiciels Alizé et Abaqus, en considérant les mêmes hypothèses relatives au comportement des matériaux. Deux épaisseurs de la couche de roulement en matériaux bitumineux ont été pris en compte dans cette analyse. L'écart entre les grandeurs reste faible quelle que soit la configuration.

Par ailleurs, pour se rapprocher de l'hypothèse semi-infini considéré dans Alizé, il faut prendre une géométrie du massif a minima de 10 m x 10 m, ce qui s'éloigne de la géométrie d'une route.

Les résultats fournis par Abaqus permettent d'établir des profils transversaux des déplacements de surface et en profondeur. L'effet de la surcharge, qui augmente la contrainte verticale dans le sol, se diffuse avec la profondeur. Ces résultats mettent en évidence l'intérêt d'utiliser le logiciel Abaqus qui offre plus de possibilités pour le dimensionnement. Il permettra de considérer les caractéristiques dégradées des matériaux en fonction du nombre de cycle de chargement.

REFERENCES

- Ahmed Alkaissi, Z., & Mawla Al-Badran, Y. (2018). Finite element modeling of rutting for flexible pavement. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 2018(03), 01-13.
<https://doi.org/10.31272/jeasd.2018.3.1>

- AIPCR, & AGEPAR. (2019). Revue du guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. *Groupe d'étude régional actualisation des règles techniques de conception des chaussées dans les pays tropicaux*.
- Asim, M., Ahmad, M., Alam, M., Ullah, S., Iqbal, M. J., & Ali, S. (2021). Prediction of rutting in flexible pavements using finite element method. *Civil Engineering Journal*, 7(8), 1310-1326. <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091727>
- BéninRévélé. (2021). Programme d'Actions du Gouvernement (2021 – 2026). *Présidence de la République du Bénin*. www.beninrevele.bj
- Bohi, Z. P. B. (2010). Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : Cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire). 144.
- Burmister, M. D. (1943). The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways.
- CEBTP. (1984). Guide pratique—Dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. *République Française - Ministère des relations extérieures coopération et développement*.
- Gbaguidi, V., Kiki, Y., Zevounou, C., Vedogbeton, N., & Zankpe, M. (2018). Identification of the strata of lateritic soils and alterites in Benin. *International Journal of Advanced Research*, 6(9), 282-293. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/7673>
- Issiakou, M. S. (2017). Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger.
- LCPC. (2010). Manuel d'utilisation du logiciel ALIZÉ-LCPC version 1.3. www.itech-soft.com
- Leonardi, G. (2015). Finite element analysis for airfield asphalt pavements rutting prediction. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 63(2), 397-403. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2015-0045>
- Liu, Z., Gu, X., Ren, H., Wang, X., & Dong, Q. (2022). Three-dimensional finite element analysis for structural parameters of asphalt pavement: A combined laboratory and field accelerated testing approach. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01221. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01221>
- SBF-BTP. (2009). Aménagement et bitumage d'une route au Bénin. *SBF Société Bouzguenda Frères groupe sbf Tunisie*. <http://www.sbf.com.tn/project/amenagement-bitumage-route-benin/>
- Van Cauwelaert, F. (1984). Contraintes et déplacements dans un massif semi-infini isotrope ou à isotropie transverse soumis à des charges rectangulaires souples et rigides en surface solution générale en coordonnées cartésiennes. *Revue Française de Géotechnique*, 28, 7-25. <https://doi.org/10.1051/geotech/1984028007>
- Wang, Y., Lu, Y. J., Si, C. D., & Sun, T. C. (2017). Finite element analysis for rutting prediction of asphalt concrete pavement under moving wheel load. *International Journal of Simulation Modelling*, 16(2), 229-240. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM16\(2\)4.374](https://doi.org/10.2507/IJSIMM16(2)4.374)