

APPLICATION DES ESSAIS NON DESTRUCTIFS PAR HWD SUR LES PISTES AÉROPORTUAIRES RENFORCÉES

APPLICATION OF HWD NON DESTRUCTIVE TESTS ON REINFORCED AIRPORT PAVEMENTS

Mouloud ABDESSEMED, Said KENAI

Département de Génie Civil, Université de Blida1, Route Soumaa, Blida, Algérie

RÉSUMÉ – Les géosynthétiques, par leurs caractéristiques mécaniques, améliorent la performance des infrastructures linéaires (chaussées routières et pistes d'aviation), puisqu'elles leur redonnent une portance plus grande et prolongent leur durée de vie en réduisant la propagation des fissures et des dégradations en surface et dans les couches du corps de chaussée. Dans cet article, on présente une étude expérimentale, par essai non destructif, menée sur une piste aéroportuaire, renforcée par géogrille. On compare les résultats d'une évaluation du comportement de cette piste par la mesure des déflexions et des contraintes par essais HWD, avant et après son renforcement. Il s'avère que la géogrille, en tant qu'élément séparateur, réduit les déformations et les contraintes dans la piste.

Mots clés : Piste, essai, expérimental, HWD, renforcement, géogrille, numérique, comportement.

ABSTRACT – The geosynthetics, by their mechanical features, improve the performance of linear infrastructures (roads pavements and airport runway), and give them a bigger resistance, while prolonging their life span, by reducing the propagation of the cracks and deteriorations to their surface and in their layers. In this paper, an experimental survey is presented, based on non destructive testing of an airport track, reinforced by geogrids. The results of an assessment of the behavior of this track by measurement of deformations and stresses in different sections of runways are presented as well as by HWD test, before and after the reinforcement. The study concluded that the geogrids, as separating element, reduced the deformations and stresses in the track.

Key-Words: Airport, test, experimental, HWD, reinforcement, geogrid, numerical, behavior.

1. Introduction

Les infrastructures de base jouent un rôle très important dans l'économie d'un pays, par le transport des passagers et des marchandises. C'est pourquoi, les pouvoirs publics lancent des programmes de sauvegarde du patrimoine routier et aéroportuaire existant. L'application des programmes de réhabilitation et/ou renforcement, ne peuvent se faire, que sur la base d'un choix adéquat de techniques ou méthodes de réparation et/ou renforcement. On trouve dans la pratique plusieurs techniques, telles que le béton à module élevé, le béton modifié, les géosynthétiques. Il a été montré que les caractéristiques mécaniques des familles géosynthétiques (géotextiles, géogrilles, etc..) améliorent la performance des infrastructures linéaires souples, comme les routes, les aérodromes, puisqu'elles peuvent redonner une portance plus grande, avec prolongement de leur durée de vie et réduction des propagations des fissures à leur surface et dans les couches du corps de chaussée.

Plusieurs techniques de renforcement furent appliquées dans les pistes souples exploitées par les charges mobiles (routes) ou aéronefs (aérodromes) durant les vingt dernières années ; en plus de la technique traditionnelle basée sur l'application du béton bitumineux en couche de roulement, l'application des bitumes avec ajout de produits ou les bitumes modifiés à modules élevés (BMME) peuvent améliorer considérablement les caractéristiques mécaniques des chaussées. Cependant, pour le renforcement et la mise à niveau des chaussées souples vétustes, dégradées, fissurées ou même en état de perte de leurs caractéristiques mécaniques, l'application des géosynthétiques semble devenir une solution alternative plus performante (Ferrotti et al., 2011).

Les géogrilles, sont les matières géosynthétiques, les plus répandues en application dans les corps de chaussées souples. Selon la grille (matière constituante), la forme de la maille, les dimensions, la rigidité et leur emplacement dans le corps de la structure de chaussée, les géogrilles sont capables d'augmenter la résistance à la fatigue, réduire les dégradations dans le temps, absorber la propagation des fissures et redonner la portance à la structure (Abdessemmed et al., 2015). Des recherches récentes ont mis en évidence l'influence de ces paramètres à travers des travaux de laboratoire et des

campagnes in situ par des essais non destructifs, tels que l'essai par la masse tombante appelé couramment HWD, surtout dans le domaine des pistes souples. En effet, la place de la géogrille dans la structure de la chaussée souple est un des sujets les plus largement débattus ces trois dernières décennies (Siriwardane et al., 2010) en raison des effets importants qu'elle produit lors de son insertion dans le corps de chaussée et particulièrement de route.

Dans cet article, on montrera les résultats d'une étude expérimentale, par essai non destructif, menée sur une piste d'aérodrome se trouvant au sud est du territoire Algérien (Aérodrome de Ouargla). Cette piste a été renforcée par une nappe géogrille, insérée entre la couche de roulement (béton bitumineux) et la grave bitume. On présentera les résultats d'une évaluation du comportement de cette piste par la mesure des déflexions et des contraintes par essais non destructifs (HWD), avant et après son renforcement. Une confrontation entre les résultats trouvés et ceux, déterminés par la méthode numérique basée sur les éléments finis, sera faite. Cette étude a montré que l'essai dynamique, non destructif par HWD, permet d'évaluer les contraintes et déformations à la surface de la piste. Il permet aussi de voir l'influence de la géogrille, en tant qu'élément séparateur, sur le comportement de la piste aéroportuaire en question.

2. Essais d'analyse du déflectomètre à masse tombante

2.1 Préambule

L'essai par déflectomètre à masse tombante, conçu pour les pistes aéroportuaires (Heavy Weight Deflectometer) a connu une large application durant les quarante dernières années. Les principaux développements du déflectomètre à masse tombante ont été effectués durant les années 1970-80, après une période de progrès importants en milieu routier, notamment avec la théorie des systèmes multicouches de Burmister en 1943, où ils ont permis le développement des premiers programmes de rétro-analyse pour l'interprétation des essais HWD (Hou, 1977). Au milieu des années 1980, l'analyse dynamique des essais HWD a été rendue possible grâce aux développements de Roësset et Shao en 1985, ainsi que de Chen en 1987. Cette analyse a été naturellement proposée puisque l'appareil FWD applique une charge dynamique à la surface de la chaussée (Grenier, 2007).

2.2 Déflectomètre à masse tombante

C'est un appareil d'essai non destructif conçu pour reproduire, à l'aide d'un impact sur un disque en contact avec la surface de la chaussée, la charge correspondant à un demi-essieu d'un camion se déplaçant à environ 80 km/h et à mesurer, au même moment, les déflexions générées à la surface. Les charges de FWD (conçu pour les pistes routières) sont habituellement comprises entre 20 et 75 kN. Cet appareil sert à :

- Effectuer la comparaison relative des chaussées sur la base d'indices de déflexion,
- Déterminer la capacité structurale des chaussées,
- Déterminer les modules d'élasticité des couches de matériaux par rétro-analyse,
- Calculer les déformations et les contraintes dans la chaussée,
- Evaluer l'intégrité structurale des chaussées rigides (transfert de charge aux fissures et joints, détection des vides sous les dalles,
- Déterminer la capacité structurale des chaussées non revêtues,
- Effectuer le contrôle de qualité durant la construction de la chaussée.

Des Heavy Weight Deflectometer (HWD) sont utilisés pour effectuer de tels essais de déflexion sur les pistes aéroportuaires où les charges requises peuvent atteindre 250 kN (Fig.1). Fondamentalement, il s'agit du même appareil que le FWD, mais possédant des masses additionnelles. De plus, des déflectomètres portables, Light Weight Deflectometer (LWD) ou Portable Falling Weight Deflectometer (PFWD), permettent de réaliser de tels essais sur les couches de sol et de fondation de chaussée (Hildebrand et Baltzer, 2003). Il s'agit d'une version simplifiée du FWD dont la masse, de 10 à 20 kg, est manipulée directement par l'opérateur.

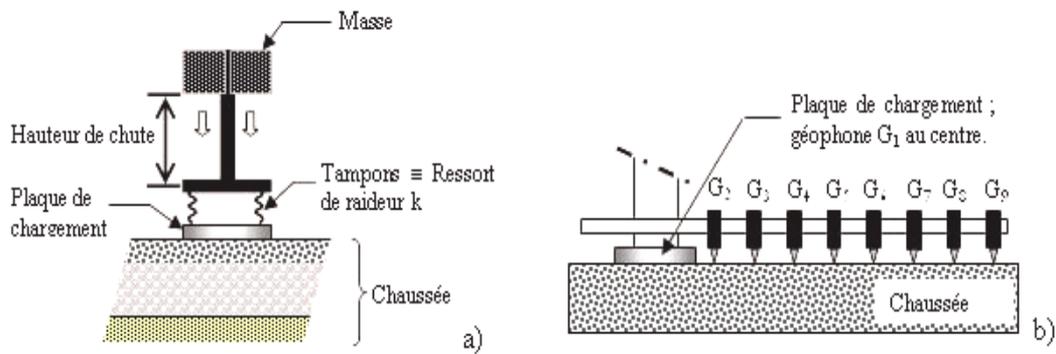


Figure 1. Principe de l'essai non destructif par HWD.

3. Étude de cas

3.1 Description et état physique de l'infrastructure

3.1.1 Caractéristiques géométriques et géotechniques

Le cas d'étude considéré concerne la piste principale (02/20) de l'aérodrome d'Ouargla, se trouvant à 800 km sud-est de la capitale Alger. Cet aérodrome a été mis en service en 1951 et il est composé de deux pistes de (3000 m × 45 m) chacune. Cette infrastructure a subi plusieurs travaux de renforcement et de modernisation.

Caractéristiques géométriques :

- Longueur chaussée : 3000 m
- Orientation : 02/20
- Largeur chaussée : 45 m
- Largeur accotements : (7.5 +7.5) m
- Avion critique : Boeing 737-800

Caractéristiques géotechniques :

- Corps de chaussée : souple/asphalte
- Couche de roulement : béton bitumineux (épaisseur 4 cm)
- Couche de base : épaisseur 20 cm
- Couche de fondation : épaisseur 25 cm
- CBR : 12

3.1.2 États des dégradations et diagnostic

Les dégradations sont visibles sur la totalité de la piste d'envol et ses annexes. Elles sont constituées de fissures longitudinales et transversales (Fig.2) de longueurs variant de 5 m à 32 m situées sur les bandes centrales de la piste principale aux points kilométriques (pk 1+150 et pk 2+380). Ces fissures sont probablement dues à des gradients de températures avoisinant 35 à 42 degrés en périodes chaudes (LTPS, 2011).



Figure 2. Fissures de joints sens longitudinal et transversal.

En plus du nombre élevé de mouvements d'avions, de l'ordre de 650 rotations, effectués annuellement par les aéronefs B737.800, B737.600, Airbus 321 et Hercule C130, l'effet de la température a une grande influence sur le comportement des chaussées réalisées en matériaux hydrocarbonés. En effet, le phénomène retrait/dilatation induit l'ouverture des fissures impliquant d'importantes forces de traction. Pour remédier à ce phénomène, plusieurs solutions sont avancées, telles que : le renforcement traditionnel de la piste, par scarification de la couche de roulement existante en béton bitumineux (BB) et son remplacement par un rechargement d'une épaisseur de 6 cm. La deuxième solution, qui semble une solution alternative, consiste à poser la géogrille, comme tissu séparateur, dans le corps de chaussée, entre la couche BB et grave bitume (GB).

3.2 Renforcement de la piste

Pour arrêter (voire stopper) la propagation des fissures dans le corps de chaussée de la piste, la solution "géogrille" a été adoptée. C'est grâce aux avantages qu'elle représente que cette solution alternative a été préconisée par le bureau d'études chargé de la conception, en proposant d'intercaler la géogrille entre le béton bitumineux et la grave bitume. Les étapes de renforcement de cette infrastructure sont :

- scarification de 4 cm de la couche de roulement existante en béton bitumineux,
- colmatage des fissures apparentes après décapage de la couche dégradée,
- application d'une couche d'accrochage en asphalte,
- mise en place de la géogrille sur la partie centrale de la piste (3000 m x45 m) (Fig.3),
- passage de camions (Fig.3) à pneus larges sur la nappe étalée afin de chasser les volumes d'air,
- application soigneuse des couches de béton bitumineux jusqu'à l'épaisseur préconisée,
- travaux de finition.



Figure 3. Mise en place de la géogrille sur la piste.

4. Expérimentation par test HWD

4.1 Principe de mesure

Pour la détermination de la portance des chaussées aéroportuaires, le Heavy Weight Deflectometer (HWD) est devenu aujourd'hui l'appareil de référence international. Il est composé d'une masse tombante qui engendre à la surface de la chaussée, par l'intermédiaire d'une plaque rigide et d'un système d'amortissement, un chargement de type impulsif, destiné à simuler le passage d'une roue d'avion (Fig.4). Les déflexions engendrées sont mesurées pendant la période de chargement, au moyen de géophones disposés sous et aux abords de la plaque (Broutin, 2010). Les essais de déflexions ont été réalisés sur une longueur de 22,5 m, tout le long de la piste principale, suivant un plan de répartition, où les profils au nombre de six se trouvent à 3,5 m, 6 m et 15 m de part et d'autre de l'axe de la piste d'atterrissage.

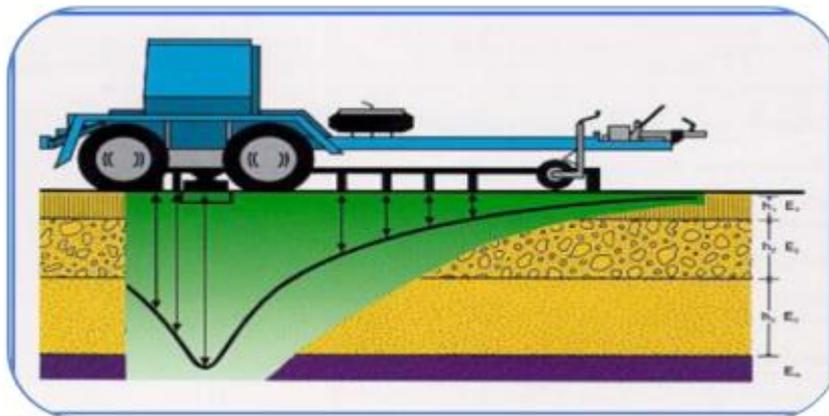


Figure 4. Principe de mesure par HWD.

4.2 Résultats d'essai

L'objet de cet essai est de suivre l'évolution de la portance de la chaussée par la mesure des contraintes et des déformations, d'une part, et comparer les valeurs des déflexions, avant et après le renforcement de la piste par géogrille, d'autre part. L'influence de l'insertion de la géogrille en tant que composite séparateur sur l'état du corps de chaussée est examinée. Les valeurs les plus défavorables sont présentées par les digrammes des figures 5 et 6. Les courbes D1 à D9, représentent les valeurs trouvées à différentes abscisses des positions des géophones.

En effet, l'appareil HWD consiste à reproduire les sollicitations dues au passage d'un véhicule lourd ou avion et à mesurer la réaction de la chaussée en mesurant le bassin de déflexion à l'aide de neuf géophones, avec une longueur de tige mobile de l'ordre de 2,25 m, qui peuvent être positionnés aux endroits désirés (abscisses de l'axe horizontale).

En analysant les graphes ci après, on peut constater une uniformité relative des déflexions sur l'ensemble de la piste. Les valeurs moyennes (maximales) de mesure de ces déflexions sont de l'ordre de 732 μm avant renforcement et 685 μm après renforcement (cas défavorable 15 m à gauche de l'axe de la chaussée), soit une réduction de 6.45%. La géogrille a réduit les déformations au niveau de la couche de roulement.

Concernant les contraintes, le pic (à 9 m de l'axe à gauche) se situe à 2850 kPa (avant renforcement) et 2685 kPa (après renforcement), soit une réduction de 5.80%. La réduction des valeurs des contraintes de traction mène vers un dimensionnement plus économique de la couche de roulement de la chaussée.

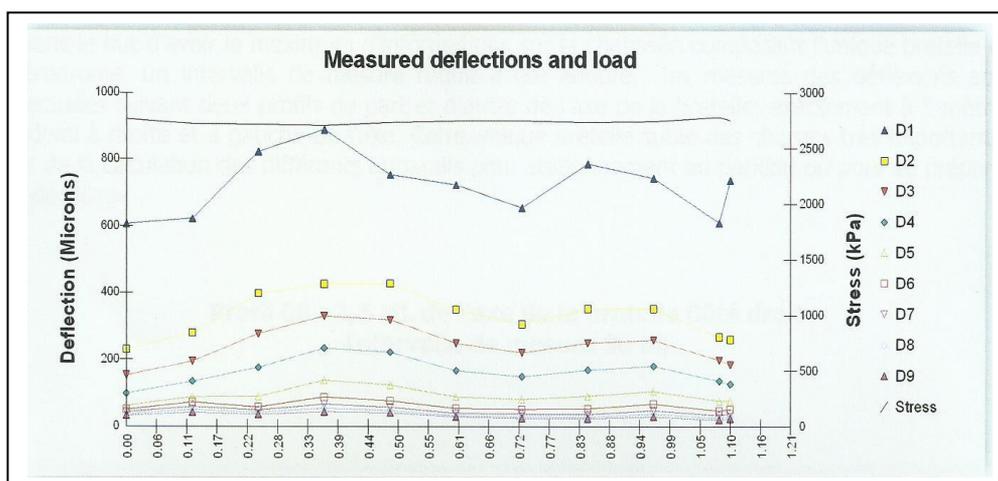


Figure 5. Courbe Contrainte-déformation avant renforcement (profil à 15 m gauche).

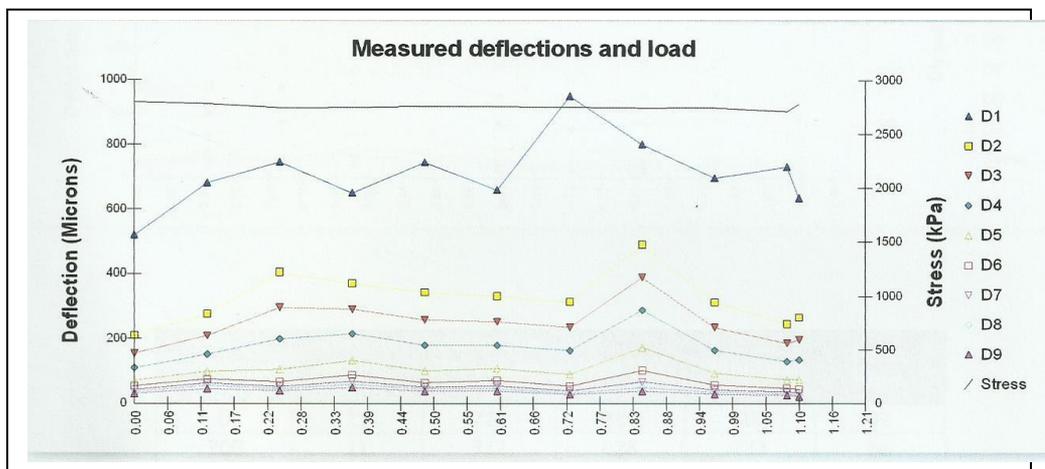


Figure 6. Courbe Contrainte-déformation après renforcement (profil à 6 m droit).

5. Analyse numérique par éléments finis

5.1 Données du calcul

On procédera à la présentation des données du problème, avant et après application de la nappe de géogrille pour le renforcement de la piste souple. Le modèle élément fini choisi, avec application du logiciel Abaqus 6.1, sera capable de décrire les caractéristiques géométriques et mécaniques de chaque couche du corps de chaussée, ainsi que le renforcement préconisé.

Les couches du corps de chaussée sont considérées comme une continuation de solide, qui est subdivisé en sous domaines, et sont discrétisées en plusieurs éléments de dimensions finies (Muhammad et al., 2003). L'analyse numérique fournira une solution approximative de la structure modelée (avant et après renforcement) (Tab.1) avec prise en compte des conditions aux limites et l'effet du chargement. Pour le calcul de la matrice de rigidité des éléments élémentaires et la matrice globale de la structure, trois facteurs primordiaux ont été introduits : la géométrie de l'élément, les caractéristiques mécaniques et le comportement physique de chaque élément.

Les caractéristiques et les lois de comportements des matériaux utilisés sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des matériaux (avant et après renforcement)

Matériau utilisé	Epaisseur E (mm)		Module E (MPa)	Densité (kN/m ³)	Module G (MPa)	Coefficient Poisson
	avant	après				
Couche BB (0/14)	40	35	5400	24	1176	0,35
Reprofilage GB(0/20)	200	200	260	24,7	-	0,38
Couche de fondation	250	250	120	18	-	0,48
Sol support	1000	1000	50	GB	-	0,40
CBR	12	-	-	-	-	-
Nappe géogrille	-	1	629,3	11	-	0,3

Cette analyse fournira les contraintes et les déformations aux nœuds critiques avec l'emplacement choisi de la géogrille (Fig.7).

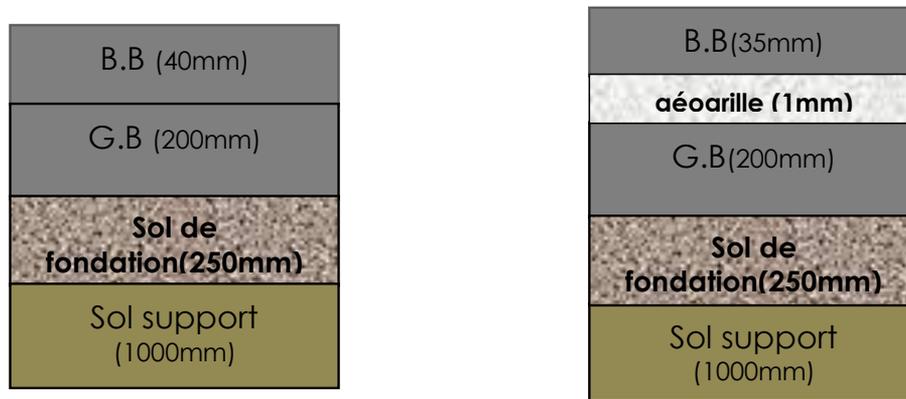


Figure 7. Corps de chaussée (avant et après renforcement par géogrille).

Les éléments introduits dans la modélisation pour les sous-couches qui composent la chaussée et la nappe géogrille, sont donnés dans le tableau 1. Il s'agit de l'élément C3DBR à huit nœuds, avec un comportement élastique linéaire, pour les couches du béton bitumineux (BB), de grave bitume (GB) et du sol de fondation et sol support, avec un modèle par élément finis choisi (Fig.8). La nappe géogrille a été modélisée par l'élément 4-nœuds quadrilatéral-membrane (M3D4R) à 4 nœuds (Rahman et al., 2011).

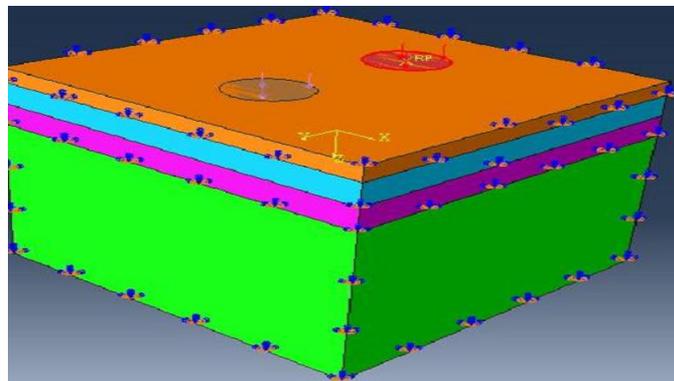


Figure 8. Modèle de calcul choisi.

Comme il s'agit d'une analyse statique du corps de chaussée, on considère que chaque couche a un comportement linéaire. La structure de la chaussée élastique est caractérisée par son module élastique E et le coefficient de Poisson ν . Les roues critiques (contact avec la chaussée, lors de l'atterrissage) de l'avion de référence sont prises en compte en surface circulaire de contact avec la couche de roulement. Le chargement a été appliqué au centre de chaque surface circulaire (Fig.9). Les charges pneumatiques prise pour l'avion critique sont :

- Module d'Young : $E = 400 \text{ kPa}$
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0,33$
- Vitesse : $v = 300 \text{ km/h}$
- Charges verticales : $F_z = 25 \text{ tonnes}$
- Pressions de gonflage nominales : $P = 15,5 \text{ bars}$
- Angles de dérapage ($\beta = 16^\circ$) pour la simulation en roulement classique
- Coefficient de frottement constant : $\mu_c = 0,48$

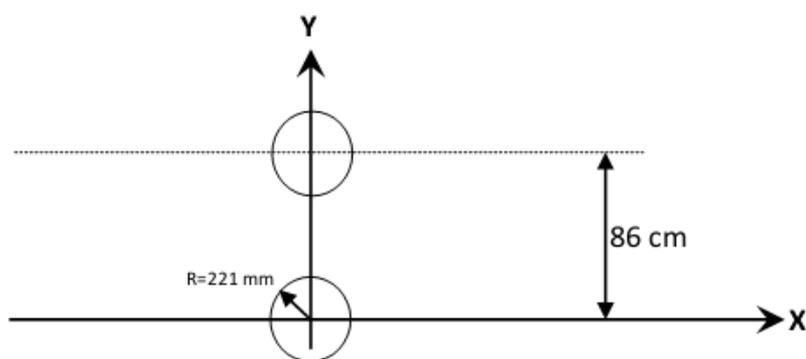


Figure 9. Empreintes circulaires des roues de l'avion critique (Abdessemed et al., 2015)

Tableau 1. Types d'éléments pour la modélisation.

Matériaux	TYPE d'élément	Référence
Couche/roulement	8 nœuds, linéaire	C3D8R
Couche/base	8 nœuds, linéaire	C3D8R
Sol de fondation	8 nœuds, linéaire	C3D8R
Sol support	8 nœuds, linéaire 3D	C3D8R
Géogridde	4-nœuds, quadrilatéral membrane	M3D4R

5.2 Résultats de l'analyse numérique

Les résultats de l'analyse numérique porte sur le corps de chaussée de la piste et les différentes couches de la géogridde, en fonction du choix des conditions aux limites et du chargement vertical résultant des deux roues de l'avion critique (empreintes circulaires) selon l'axe $z'-z$ (Fig.9).

Les valeurs obtenues indiquent que la géogridde réduit la déformation verticale en la plaçant entre la couche de roulement et la grave bitume (GB) (Fig.10). En effet, les diagrammes montrent pour les états de contraintes (selon l'axe verticale $z-z$), la valeur maximale de traction est localisée au niveau de la couche de roulement et qui est respectivement de 89,95 kPa, après renforcement, et 95,40 kPa, avant renforcement, soit un gain de 5.80%. Le renforcement par géogridde semble soulager le corps de chaussée et réduit la contrainte de traction.

Pour les déformations aux différentes couches, avant et après renforcement par géogridde, les valeurs les plus défavorables sont présentées. La déformation maximale (en traction) est obtenue avec une valeur de 315 μm qui est réduite à 302,5 μm après renforcement, soit un gain de 4%. Les fissures susceptibles de se développer à la surface de la chaussée vers le bas (fissures de traction) sont réduites (voire stoppées par la présence de la nappe). Le rôle, donc de cette géogridde (séparatrice) est de retarder la propagation des fissures et par conséquent réduire les déformations négatives à la base du corps de chaussée.

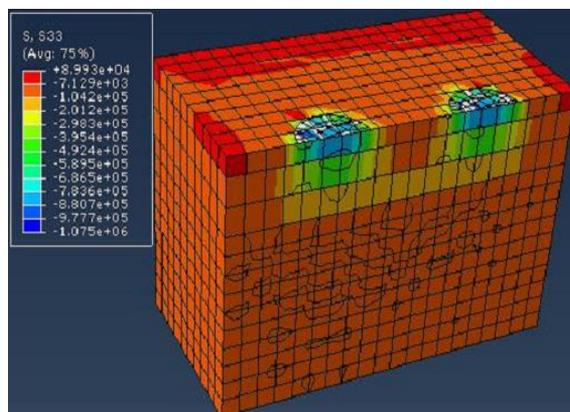


Figure 10. État des contraintes au corps de chaussée.

5.3 Discussions et commentaires

Afin de caler le modèle numérique choisi, nous proposons leur confrontation avec ceux obtenus par l'essai non destructif (masse tombante HDW). Une simulation pseudo élastique de la masse tombante du HDW, pour les gros porteurs Boeing 737/600, Boeing 737/800 ou Airbus 330, donne une équivalence de charge successivement (deux fois répétée) égale à 700 kg pour une chute de hauteur 400 mm (Kebaili et al., 2010). Les écarts enregistrés entre les valeurs moyennes des contraintes et des déformations mesurées et calculées, sont de 0,6 % et 15 % en valeurs absolues, ce qui nécessite des améliorations. Ces écarts assez ouverts, peuvent éventuellement être dus aux choix des modèles de calcul et/ou des caractéristiques mécaniques des couches formant le corps de chaussées ou bien la simulation du poids de la masse tombante, vis-à-vis à l'avion de référence (Abdessemed et al., 2015).

6. Conclusions

Le suivi du comportement de la piste aéroportuaire renforcée par géogrid se trouvant à l'aérodrome d'Ouragla a été mené par tests non destructifs par HDW. Les résultats de cette évaluation dynamique, par la mesure des déformations et des contraintes, à la couche de roulement (BB) et en profondeur de la piste, ont montré que la géogrid en plus de son rôle de séparateur, peut jouer le rôle de renforcement.

En effet, les résultats trouvés comparés à ceux déterminés par la méthode numérique par éléments finis, ont confirmé la réduction des réductions des déformations et des contraintes à la surface de la piste, de l'ordre de 5 % (expérimentalement) et de 4 % (numériquement). Les conclusions à tirer de cette étude sont :

- Les tests par HDW peuvent se faire pour évaluer le comportement statique et dynamique d'une chaussée aéroportuaire en déterminant les contraintes et déformations à n'importe quel point de la piste.
- La géogrid, en tant que composite séparateur, contribue à l'amélioration des contraintes et déformations et par conséquent à réduire le dimensionnement (l'épaisseur de la couche de roulement (BB) est passée de 40 mm à 35 mm dans notre cas) et retarder la propagation des fissures descendantes.
- Il est possible de modéliser une chaussée aéroportuaire renforcée par géogrids par la méthode des éléments finis, avec le choix d'un modèle mathématique adéquat et d'en tirer les renseignements nécessaires.
- La modélisation par éléments finis nous a permis de caler les résultats expérimentaux avec des dispersions ne dépassant pas les 15 %. Cet écart, peut être causé, par le non prise du comportement réel des couches du corps de chaussée, telles que la GB et couches de fondation.

7. Références bibliographiques

- Abdessemed M., Kenai S., Bali A. (2015). Experimental and numerical analysis of the behavior of an airport pavement reinforced by geogrids, *Journal: Construction and Building Materials* 94, 547–554.
- Broutin M. (2010). Évaluation des chaussées souples aéroportuaires à l'aide du déflectomètre à masse tombante (HWD), *Thèse de Doctorat, Ecole des Ponts, Paris Tech, LCPC, Paris, France*.
- Burmister D.M. (1943). The theory of the stress and displacements in layered systems and applications of design of airport runway ». Proceeding of the Highway Research Board, Vol 23, pp. 126-148.
- Chen S.S. (1987), The Response of Multi-layered Systems to Dynamic Surface Loads. Thèse de doctorat, Université de Californie, Berkeley.
- Ferrotti G., Canestrari F. et al. (2011), A strategic laboratory approach for the performance investigation of geogrids in flexible pavements, *Journal of Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 5, pp 2343–2348*.
- Grenier S. (2007), Analyse dynamique du déflectomètre à masse tombante, *Thèse de doctorat (Phd), Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada*.
- Hildebrand G. and Baltzer S. (2003), Static Plate Bearing Tests, Falling Weight Deflectometer (FWD) and Mini-FWD, *External Note 16, Issue Number 16, Publisher: Danish Road Institute, ISSN: 1395-5530*.
- Hou T.Y. (1977), Evaluation of Layered Material Properties from Measured Surface Deflections. Thèse de doctorat, Université d'Utah, pp143.
- Kebaili N., Belhdj B.C (2010), Diagnostic au déflectomètre HWD des chaussées aéronautiques, *Séminaire national de la route et la sûreté de la circulation 29 & 30 Novembre 2010, Université d'Ouargla- Algérie*.
- Laboratoire des travaux publics du Sud (LTPSud) (2011), *Rapport de synthèse finale de la première tranche du suivi de comportement de la géogrille de la piste principale de l'aérodrome d'Ouargla, Ouargla, Algérie*.
- Muhammad N.S. Hadi, B.C. Bodhinayake (2003), Non-linear finite element analysis of flexible pavements, *Journal Elsevier, Advances in Engineering Software* 34 (2003) 657–662.
- Rahman M.T., Mahmud K., Ahsan S. (2011), Stress Strain characteristics of flexible pavement using Finite Element Analysis, *International Journal of Civil and Structural Engineering, Volume2, N°1*.
- Roësset J.M, Shao K. (1985). Dynamic interpretation of dilatometer and FWD test, In Transportation Research Record 1022, 1985, pp 7-16.
- Siriwardane H. and al. (2010). Analysis of Flexible Pavements Reinforced with Geogrids, *Journal Geotechnic Geology and Engineering* V.28, pp 287–297.