

CONTRIBUTION A LA PREDICTION DES EFFONDREMENTS DES PISTES D'AERODROMES CONSTRUITES SUR DES SOLS SALINS

M. CHIKHAOUI

Laboratoire Environnement, Eau, Géomécanique et Ouvrages (LEEGO), Faculté de Technologie, Département: génie civil Université Ferhat Abbas Sétif, UFAS, Algérie

Ammar NECHNECH

Laboratoire Environnement, Eau, Géomécanique et Ouvrages (LEEGO), Faculté de génie civil, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, USTHB, Algérie

Smail HADDADI & Khadidja AIT-MOKHTAR

Laboratoire Environnement, Eau, Géomécanique et Ouvrages (LEEGO), Faculté de génie civil, Université des sciences et de la technologie houari Boumediene, USTHB, Algérie

mch_gcq16@yahoo.ca

RÉSUMÉ

La problématique des sols salins destinés à recevoir des pistes d'aérodromes est restée relativement inexplorée jusqu'à ces dernières années. En conséquence peu d'analyses sont menées afin de caractériser l'impact de l'activité aéroportuaire et aéronautique sur ces sols.

La caractérisation des problèmes réels des sols salins, ainsi que l'étude du comportement de leurs effondrements sous l'effet couplé : mécanique, thermique et hydrique, demeure mal connu en géotechnique aéroportuaire (tels que les instabilités et effondrements des pistes), environnementale (isolation des déchets ménagères et mêmes nucléaires) et dans l'étude de divers risques (sécheresse, instabilité de cavités souterraines).

Afin de tenir compte de l'effet du couplage hydro - thermomécanique dans la prédiction de l'effondrement des sols salins, la proposition des solutions d'améliorations de ces sols tels que; le renforcement par des géosynthétiques, le drainage etc., s'avère nécessaire pour le bon dimensionnement des pistes d'aérodromes en vue d'éviter d'éventuelles catastrophes.

Mots clés : Sols salins, sebka, environnement, prédiction, aéroports, pistes d'atterrissages, couplage hydro - thermomécaniques, catastrophe.

1. INTRODUCTION

Le développement d'un pays se mesure entre-autre par la multiplication des différentes voies de communications et plus particulièrement le transport aérien, qui constitue un moyen de déplacement régulier, le plus rapide, le plus sûr et le plus confortable. L'activité aéronautique a été marquée ces dernières années par un accroissement fulgurant.

Afin de vaincre l'isolement de certaines villes lointaines et par conséquent les faire participer au processus de développement économique, politique et social, l'Algérie a pris l'initiative de construire de nouveaux aérodromes et de renforcer certains. La réalisation

d'un nouvel aéroport ES-SENIA à Oran de première classe (A), était indispensable dans la contribution du vaste projet qui prévoit la réalisation et le réaménagement d'aéroports.

2. CONTEXTE DU PROJET

L'aéroport d'ES-SENIA à Oran est situé à proximité de la grande Sebkhia d'Oran. Son extension nécessite la réalisation d'une deuxième piste d'atterrissage. La présence de la Sebkhia induit un environnement géotechnique assez complexe. Cette complexité vient, une part, du fait de la présence de cavités de différents diamètres dûs à la dissolution du gypse en présence des eaux souterraines salées et d'autre part, de la topographie du terrain (terrain plat), favorisant la stagnation des eaux et la formation de cavités.

3. RECONNAISSANCE GEOLOGIQUE

Les multidisciplinaires (sédimentologie, tectonique, hydrogéologie, géomorphologie, chimie et biologie), ont permis la détermination des conditions de création et de modalités de fonctionnement de la sebkhia d'Oran (Ouest algérien) du Miocène à l'Actuel.

Deux facteurs importants ont régi l'édification de cette dépression; tectonique et climat qui auraient conditionné ultérieurement le réseau hydrographique et la végétation en place.

Les analyses sédimentologiques ont révélé que le milieu primitivement lacustre aurait évolué progressivement en sebkhia, traduisant le passage d'un climat subhumide à semi-aride.

La dynamique de la sebkhia d'Oran (figure 1), a été reconstituée à partir des éléments et structures géomorphologiques. Elle s'aligne sur un axe de drainage débouchant sur Dayet Morsly au Nord pour continuer jusqu'à la mer au niveau du port d'Oran [14], [15] et [16].



Figure 1 – Vue aérienne de la grande SEBKHA et localisation de l'aéroport ES-SENIA d'Oran.

Sous l'action de l'eau chargée en gaz carbonique qui dissout le calcaire, la craie ou le gypse, de nombreuses cavités naturelles sont créées. On observe aussi des poches de dissolution remplies de limon dans la craie, dues à l'irrégularité du contact craie/limon. La circulation de l'eau peut aussi élargir les fractures en profondeur entraînant les limons qui les remplissent et créant ainsi des fontis en surface grâce aux infiltrations. Ce phénomène se retrouve principalement au niveau des vallées sèches.

Rappelons que, le calcaire est principalement formé de carbonate de calcium : la calcite $\text{CaCO}_3(\text{s})$. L'un des mécanismes d'érosion des sols et de formation des cavités en milieu calcaire, est la dissolution de la calcite par l'eau de pluie.

Le calcaire, légèrement soluble dans l'eau pure, l'est beaucoup plus si l'acidité de la solution augmente. D'autre part l'acidité de l'eau dans ce type de milieu naturel dépend largement de la teneur en dioxyde de carbone CO_2 dissous. Pour comprendre le mécanisme de formation des cavités, il faut étudier les échanges de matière en CO_2 à l'interface eau - atmosphère puis ceux en ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} à l'interface eau – roche [5].

4. EMPLACEMENT DE L'AERODROME

Le site de l'aérodrome s'inscrit dans la plaine du Figuier, à vocation partiellement agricole, située à environ 6km au Sud de la localité d'ORAN et au Nord de la grande Sebkhah d'Oran.

Néanmoins, Il convient de signaler que le nouvel axe de la seconde piste, orientée également 07/25, est situé au milieu, environ 300m entre les deux (02) axes de la piste principale actuelle et celui du taxiway.

L'aérodrome d'ES-SENIA a été construit au cours des années 1913/1914. La plate forme de l'aéroport actuel fut retenue par la marine française pour abriter ses appareils de reconnaissance (dirigeables). L'aérodrome a été utilisé dès le début de la seconde guerre mondiale par les troupes de l'armée américaine.

5. INFRASTRUCTURES EXISTANTES

L'aérodrome d'Oran a été composé des infrastructures suivantes :

Une piste principale de : 3260.98m (y compris les P.O.R) x 45m, orientée 07/25.
Une voie de circulation parallèle à la piste principale (taxiway) de : 2900m x 23m.
Quatre voies de circulation : VC13, VC14, VC15 et la VC16.
Un parking de : 1040m x 140m.

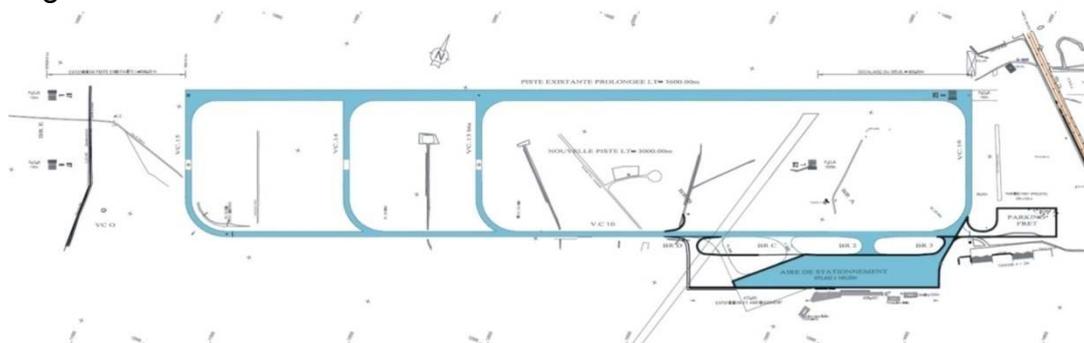


Figure 2 – Plan des infrastructures existantes [13].

6. INFRASTRUCTURES PROJETEES

Les Infrastructures projetées sont les suivants :

- Réalisation d'une nouvelle piste d'une longueur de 3839.6 ml.
- Deux (02) POR de 100 ml chacun.
- Prolongement de 600 ml, coté seuil 07, de la piste existante
- Réalisation de voies de circulation VCO pour relier la nouvelle piste projetée.
- Réalisation des voies de sortie BRA, BRB, BRE.
- Extension du parking avion existant (200ml x140ml)
- Réalisation d'un parking Fret (200ml x 124 ml)

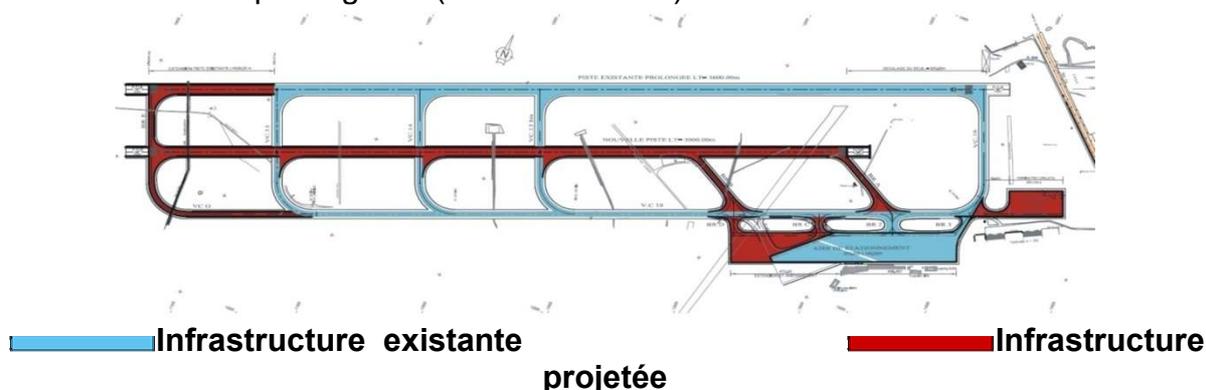


Figure 3 – Plan des infrastructures projetées [13].

La deuxième piste de l'aérodrome d'Oran assure des vols réguliers au moyen des Boeings 737 à raison de 40 mouvements par jour actuellement. Sachant que l'avion le plus contraignant est le Boeing 747-200

7. CLIMATOLOGIE

Les données climatologiques d'Oran, correspondant à la période allant de 1980 à 2004, proviennent de l'office national algérien de météorologie (O.N.M),

1. La température moyenne du mois le plus chaud est de **26.43°C**.
2. La température moyenne annuelle est de **18.41°C**.
3. La température maximale moyenne annuelle est de **24.01°C**.
4. La pluie moyenne annuelle 345.91mm
5. La pluie moyenne au mois de novembre 71.45mm
6. L'aérodrome d'Oran étant de classe A, les vents traversiers seront de l'ordre de 13 m/s

8. ORIENTATION DE LA PISTE

La direction choisie correspond à la piste ayant la valeur du coefficient d'utilisation la plus importante, soit : **Cu = 99.96 %**.

La direction choisie pour l'orientation de la nouvelle piste de notre aérodrome, est la même que celle de l'ancienne piste (Altitude : 90 m Latitude : 35°38 N Longitude : 00°36 W), direction NORD- EST à 45°. Ce choix est imposé par la présence de deux obstacles insurmontables.

9. PROBLEME DES CAVITES SOUTERRAINES

La présence de cavités souterraines sous un site de construction de bâtiments, sous une chaussée routière ou d'aérodrome ou sous une voie ferrée peut s'avérer très dangereux; il ya de très fortes chances qu'un effondrement ou un affaissement du sol se produise.

Ceci peut engendrer de multiples dégâts humains et matériels ;il ya lieu alors de détecter ces cavités dans le terrain à projet et de les éliminer.



Photo 1 – Photos des différentes cavités à ES-SENIA

Vu la forte salinité de la grande sebkha et vu les délits de exécution du projet, toutes les méthodes d'auscultations n'ont pas servis à la détection convenables de ses cavités. La méthode qui a été préconisé au repérage de ses cavités, est le compactage forcé le long de la piste.

Cette méthode consiste en premier lieu, de faire une excavation sur une profondeur de 1.35 à 1.5 m pour éliminer les cavités superficielles (Photo 2), ensuite compacter de manière très énergique au compacteur de 50 tonnes le fond de forme non seulement pour obtenir une bonne densité du terrain d'assise mais aussi pour identifier les cavités, par effondrement sous le poids des compacteurs (Photo 3).



Photo 2 – Phase 1 : Excavation sur une profondeur de 1.35 à 1.5m.



Photo 3 – Phase 2 : Compactage forcé du sol

10. SOLUTION DU PROBLEME

Pour éviter tout risques d'effondrement du sol ou de la piste à long terme, qui peut engendrer des dégâts humains et matériels, l'utilisation des produits géosynthétiques « géogrille 30/30 et le géotextile 400/50 » est une technique nouvellement utilisée en Algérie.

Cependant, toutes les chaussées aéronautiques de type souple, ont été jusque ici conçues en admettant, avec une approximation jugée suffisante, que la charge appliquée par une roue d'atterrisseur à la surface d'une chaussée souple, descend dans le corps de celle-ci à l'intérieur d'une succession de surfaces réglées dont les génératrices forment avec la verticale un angle, caractéristique du matériau traversé, qui se resserre lors du passage de chaque couche à l'autre.

La rupture de l'équilibre intervient lorsque, le sol support ne pouvant plus exercer une réaction égale à la charge appliquée, les couches supérieures lâchent à leur tour. Il y aura alors poinçonnement du terrain d'assise. La figure 4 ci-après montre que pour une charge donnée, il y a relation entre la réaction limite, ou portance du sol support, et l'épaisseur du corps de chaussée.

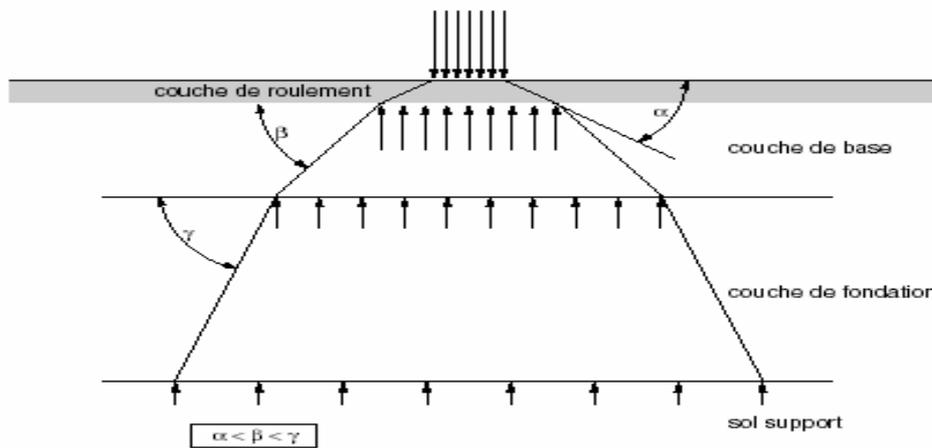


Figure 4 – Répartition de la charge d'une roue d'atterrisseur dans les différentes couches de matériau d'une chaussée souple.

Alors que le comportement de la chaussée renforcée par une géogrille lors de la présence des cavités souterraines est représenté dans la figure ci-après.

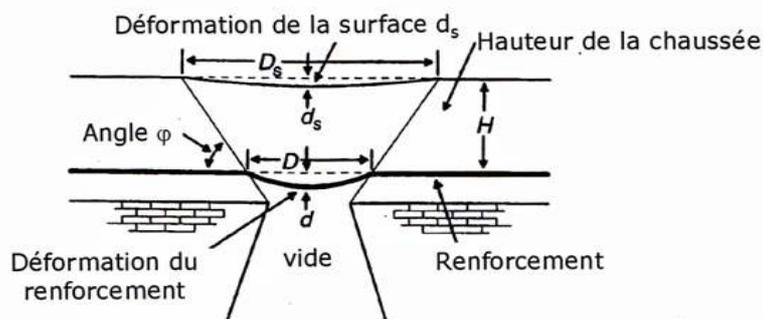


Figure 5 – Paramètres utilisés pour le calcul du renforcement selon BS 8006

- Avec :** **D** : Diamètre du vide $D=1\text{m}$
H : Hauteur du remblai ici la chaussée H (constante) = 1.15 m
 d_s : Déformation verticale en surface $d_s=1\text{cm}$
 D_s : Diamètre de la déformation en surface dépendant du diamètre du vide
 d : Déformation verticale du renforcement
 φ : Angle de frottement du remblai ($\varphi'_{pk}=35^\circ$; $\varphi'_{cv}=30^\circ$)

Les géotextiles sont fabriqués à base de polymères (essentiellement fibres de polyester et/ou de polypropylène) et sont utilisés dans le domaine de la géotechnique et du génie civil (en particulier pour le renforcement des sols). Ce sont des matériaux perméables et insensibles aux acides présents dans le sol. Leurs introductions dans domaines des travaux d'infrastructures des transports s'est développées depuis une vingtaine d'années en raison, d'une part, des propriétés de ces matériaux qui permettent de résoudre très efficacement un certain nombre de problèmes pratiques posés par les travaux relatifs aux sols et, d'autre part, grâce à leur facilité de mise en œuvre. Enfin ils confèrent aux ouvrages une plus grande fiabilité [5].

Le principe repose sur l'hypothèse de base que l'introduction de géotextile et géogrille suite à la présence de sol gypseux soluble qui présente des cavités de type II avec risque d'effondrement brutal, peut contenir une cavité de 1m de diamètre avec une surcharge: 345 kN/m. La solution retenue est explicitée sur la figure 6:

Au niveau de l'arasement terrassement :

- L'introduction d'un géotextile 400/50 en 2 nappes qui peut supporter une surcharge ultime de 450 kN/m (dans les 2 sens).
- L'introduction d'une géogrille de renforcement 30/30 sous le corps de chaussée.

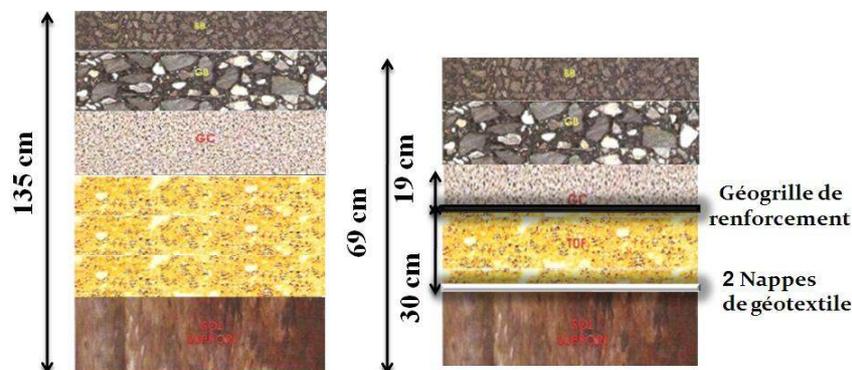


Figure 6 – Effet de la géogrille.

L'épaisseur équivalente est de l'ordre de 115 cm.

L'épaisseur réelle était de l'ordre de 135 cm.

L'épaisseur réelle était de l'ordre de 135 cm pour tenir compte des cavités.

Après traitement de la couche de fondation le corps de chaussée sera de l'ordre de 69 cm, soit une réduction de 50% de l'épaisseur totale (figure 6).

L'objectif voulu été de répartir l'ensemble des charges sur une plus grande surface, ainsi que de réduire la pression sur le sol support, afin d'augmenté la capacité portante.

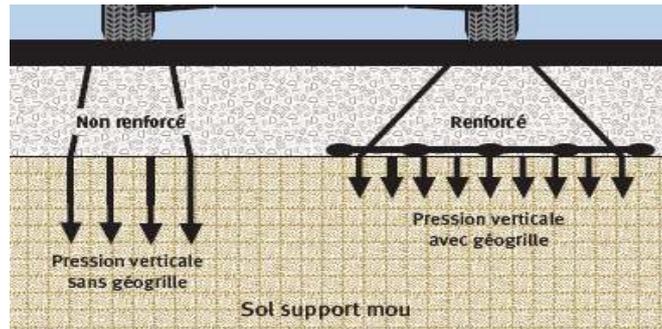


Figure 7 – L'avantage des géogrilles sur la répartition des charges.

L'incorporation des géogrilles bi-axiales permet un confinement latéral de la fondation d'une part et d'autre part, admet une réduction de la quantité d'agrégats de l'ordre de 40 % à 60 %, tout en offrant les mêmes capacités et les mêmes fonctionnalités.

11. LA MISE EN ŒUVRE

L'étalage des nappes de géotextiles a été faite de telle sorte que toutes les surfaces soient recouvertes ; la superposition doit être dans les deux sens (transversale et longitudinale).

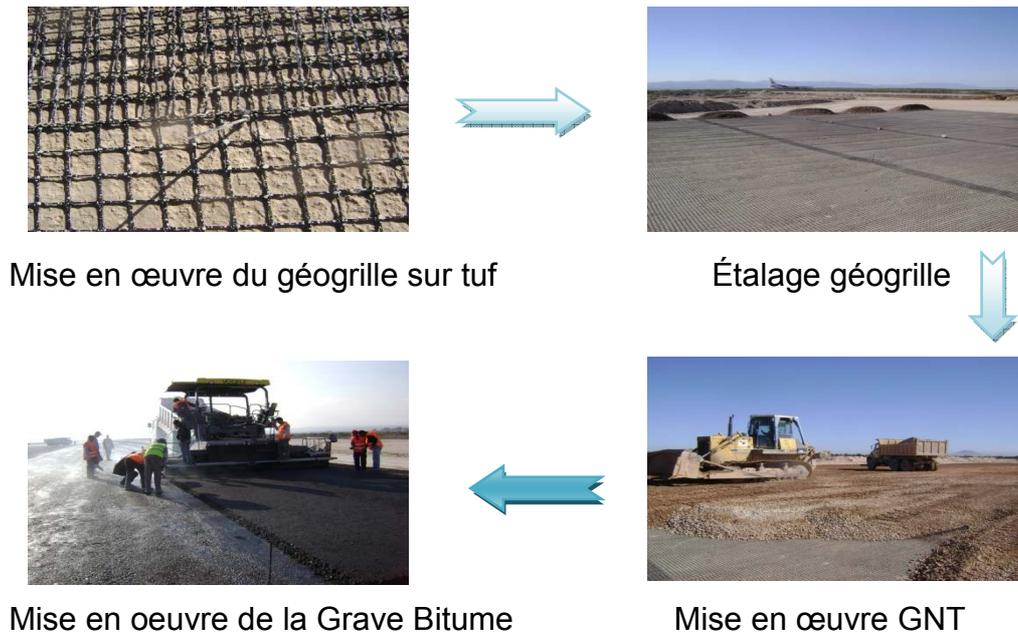


Photos 4 – Etalage de géotextile dans sens le sens longitudinal et transversal.

12. ÉPANDAGE DU REMBLAI

L'épaisseur du remblai requise dépend de la résistance du sol support, de la qualité du remblai utilisé et du niveau de trafic prévu. Afin de minimiser les dommages potentiels à la géogridde pendant le compactage, la première levée devrait être d'au moins 15cm mais, en aucune circonstance, être inférieure à 10 cm.

L'épaisseur de la première levée devrait être basée sur la résistance du sol support et la charge imposée par l'équipement de mise en place et de compactage. Lorsque le sol est très mou, il est prudent de décharger le remblai sur un sol stable, puis de le pousser par-dessus la géogridde. La lame du buteur doit être graduellement soulevée à mesure que la levée de remblai est étendue sur la géogridde biaxiales. Une fois que la géogridde et le remblai ont été mis en place, des méthodes standard de compactage peuvent être utilisées.



Photos 5 – Mise en œuvre de la géogrille.

Les géotextiles sont souvent utilisés dans les ouvrages routiers et aéroportuaires comme outil de séparation, de filtration, et beaucoup plus de renforcement. Leur performance comme renfort dans des bases de géotextile renforcé dépend de l'interaction géotextile-sol.

L'étude de l'interaction géotextile-sol sous une charge (roue) cyclique, par une nouvelle approche expérimentale menés par Han et al. [2] montre que les géotextiles placés à une profondeur de 25,0 mm ont conduit à l'enregistrement de moins de déformations (figure 10), que le cas non armé (figure 11) ; ceci a été affirmé dans les travaux de Bhandari et Han [2].

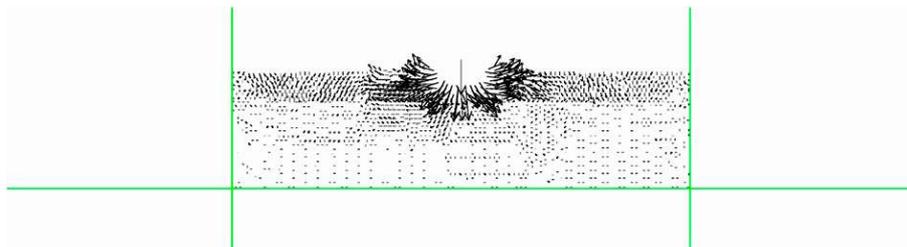


Figure 8 – Champ de vecteurs de déplacement de particules avec renforcement sans les géotextiles (le déplacement maximum $\frac{1}{4}$ 13,26 mm) [2].

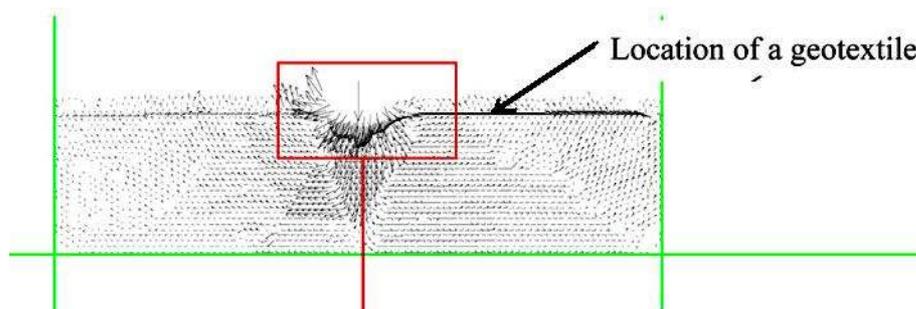


Figure 9 – Champ de vecteurs de déplacement de particules avec renforcement en géotextile placé à une profondeur de 25 mm (le déplacement maximum $\frac{1}{4}$ 11,9 mm) [2].

CONCLUSION GENERALE

La réalisation de la seconde piste de l'aérodrome ES-SENIA d'Oran, et vu l'importance de l'infrastructure de grande envergure dont la contribution au développement régional et national est non négligeable, nous sommes arrivés à conclure que l'aérodrome Es-Senia nécessite un renforcement au géosynthétique au vu de la présence des cavités souterraines après quelles soient traitées convenablement, afin qu'il soit plus opérationnel et performant et qu'il puisse répondre aux exigences de l'aéronautiques.

Il est également important d'attirer l'attention sur les nouveaux moyens et produits utilisés dans la réalisation des chaussées aéronautiques, géosynthétique de renforcement « géotextile et géogrille ». Ce produit peut devenir le moyen incontournable et efficace dans la réalisation ainsi que dans la réfection des chaussées aéronautiques, vu ces avantages en matière de coût et de résistance aux facteurs des dégradations en comparaison avec les méthodes classiques.

Néanmoins, les problèmes des sols salins, où les couplages hydro - thermomécaniques sont complexes, demeurent mal connus en géotechnique aéroportuaires (tels que les instabilités et effondrements des pistes), environnementale (isolation des déchets ménagères et mêmes nucléaires) et dans l'étude de divers risques (sécheresse, instabilité de cavités souterraines).

Enfin, établir des modèles numériques de soutien avec calage des paramètres en fonctions des lois de comportement adéquates, et même des nouvelles lois de comportement pour de tels problèmes, tout en se basant sur des résultats théoriques et expérimentaux s'avère nécessaire pour tenir compte de l'effet du couplage hydro - thermomécanique dans la prédiction de l'effondrement des sols salins à long terme [5].

RÉFÉRENCES

1. A. Tolooyan, I. Abustan, M.R. Selamat, Sh. Ghaffari., (2009) – A comprehensive method for analyzing the effect of geotextile layers on embankment stability. Article in journal Geotextiles and Geomembranes 27 (2009) 399–405, Elsevier – Science Direct.
2. Anil Bhandari, Jie Han., (2010) – Investigation of geotextile–soil interaction under a cyclic vertical load using the discrete element method. Article in journal Geotextiles and Geomembranes 28 (2010) 33–43, Elsevier – Science Direct.
3. C.H. Benson, A.H. Ören, W.P. Gates., (2010) – Hydraulic conductivity of two geosynthetic clay liners permeated with a hyperalkaline solution. Article in journal Geotextiles and Geomembranes 28 (2010) 206–218, Elsevier – Science Direct.
4. Chao-Sheng Tang, Bin Shi, Li-Zheng Zhao., (2010) – Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. Article in journal Geotextiles and Geomembranes 28 (2010) 54–62, Elsevier – Science Direct.

5. CHIKHAOUI M., (2010) – La prise en compte du couplage Hydro-Thermomécanique dans la prédiction de l'effondrement des pistes d'aérodrome construites sur un sol salin. *Thèse de doctorat en cours, spécialité géotechnique*. Faculté de génie civil –USTHB, Algérie.
6. Craig H. Benson, I. Emre Kucukkirca, Joseph Scalia., (2010) – Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 546-556, Elsevier – Science Direct.
7. Craig H. Benson, I. Emre Kucukkirca, Joseph Scalia., (2010) – Properties of geosynthetics exhumed from a final cover at a solid waste landfill. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 546–556, Elsevier – Science Direct.
8. Ehsan Seyedi Hosseininia, Orang Farzaneh., (2010) – A simplified two-phase macroscopic model for reinforced soils. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 85–92, Elsevier – Science Direct.
9. Ennio M. Palmeira, Elder A. Beirigo, Maria G. Gardoni., (2010) – Tailings-nonwoven geotextile filter compatibility in mining applications. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 136–148, Elsevier – Science Direct.
10. Ennio Marques Palmeira, (2009) – Soil–geosynthetic interaction: Modelling and analysis. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 27 (2009) 368–390, Elsevier – Science Direct
11. G. Madhavi Latha, Amit Somwanshi., (2009) – Effect of reinforcement form on the bearing capacity of square footings on sand. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 27 (2009) 409–422, Elsevier – Science Direct.
12. Julie Lovisa, Sanjay Kumar Shukla, Nagaratnam Sivakugan., (2010) – Behaviour of prestressed geotextile-reinforced sand bed supporting a loaded circular footing. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 23–32, Elsevier – Science Direct.
13. Kalouèche M., Bouaraoua R., Haddadi S., Braik N., (2009) – Etude de la deuxième piste de l'aérodrome ES-Senia d'Oran avec les nouvelles technologies. Faculté de génie civil –USTHB, Algérie.
14. Moussa. K (2007).- Apport de la géomorphologie à l'interprétation dynamique d'un bassin versant (cas d'application la sebkha d'Oran, sixième Séminaire de Géologie Pétrolière, Hilton, Alger les 15 et 16 Avril.
15. Moussa. K (2007).- Etude d'une Sebkha ; la Sebkha d'Oran (Ouest algérien). Thèse Es-Sciences, univ. Oran., 205 p ., 153 fig., 5 tabl., 12 pl. ph. h. t. (Oran, Algérie).
16. Moussa. K (2007).- Nouvelle organisation stratigraphique et sédimentologique de la série mio-plio-quadernaire du bassin de la grande sebkha d'Oran, à partir des coupes et forages de Misserghin (bordure nord) et de l'Oued Tafaraoui (bordure sud); conséquences paléogéographiques et géodynamiques sur le littoral oranais (Ora, Algérie), Laghouat.
17. Radhey Sharma, Qiming Chen, Murad Abu-Farsakh, Sungmin Yoon., (2009) –Analytical modeling of geogrid reinforced soil foundation. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 27 (2009) 63–72, Elsevier – Science Direct.
18. S.F. Brown, J. Kwan and N.H. Thom., (2007) – Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 25 (2007) 326–335, Elsevier – Science Direct.
19. W.P. Hornsey, J. Scheirs, W.P. Gates., A. Bouazza, (2010) – The impact of mining solutions/liquors on geosynthetics. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 28 (2010) 191–198, Elsevier – Science Direct.
20. Y.-J. Du, S.-L. Shen, S.-Y. Liu, S. Hayashi., (2009) – Contaminant mitigating performance of Chinese standard municipal solid waste landfill liner systems. Article in journal *Geotextiles and Geomembranes* 27 (2009) 232–239, Elsevier – Science Direct.