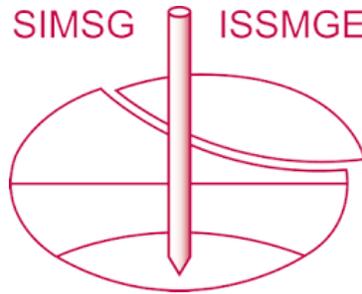


INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Etude expérimentale et numérique de l'impact des tassements d'ouvrages lourds fondés sur sol mou amélioré par colonnes ballastées flottantes

Experimental and numerical study of the impact of heavy structures settlement founded on soft ground improved by stone floating columns

Omar Sadaoui

Département Génie Civil, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie, o.sadaoui@univ-bejaia.dz

Ramdane Bahar

Laboratoire Eau, Environnement, Géomécanique et Ouvrages, Faculté de Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Algérie, rbahar@usthb.dz

Fatma Zohra Yagoub

Direction de projets, Groupe Cevital Spa Bejaia, Algérie, zohra.yagoub@cevital.com

RÉSUMÉ: Le présent article traite du retour d'expérience du comportement d'un silo 80000 tonnes et deux tours fondés sur un sol compressible renforcé par des colonnes ballastées flottantes dans la plaine de Bejaia, Algérie. Les colonnes ballastées de 18 m de longueur, réparties uniformément suivant un maillage de 1.6 x 1.6 (m²), n'ont pas atteint le substratum situé à 39 m de profondeur. Les contraintes de service (ELS) transmises sont variables de 73 à 376 kPa. Après la mise en chargement du silo en 2010, des tassements se manifestèrent en compromettant la stabilité des tours à cause des tassements différentiels excessifs. Les tours se sont inclinées et le transporteur endommagé. L'instrumentation mise en œuvre en 2008 a permis le suivi continu des tassements en fonction de l'évolution des contraintes sous les radiers durant 1400 jours (de 2008 à 2012). Des calculs numériques par éléments finis ont été effectués et les résultats obtenus sont comparés aux mesures.

ABSTRACT: This paper discusses the experience feedback of the behavior of storage silo 80KT and two towers founded on a compressible soil improvement by floating stone columns in the harbor of Bejaia city, Algeria. The stone columns of 18m depth, 1.6 x 1.6 (m²) meshes have not reached the substratum located at 39m depth. The stresses transmitted to the service limit state (SLS) are variable 73 to 376 kPa. After the loading of the silo in 2010, settlement occurred affecting the stability of the towers due to excessive differential settlements. Consequently, the towers were inclined and the damaged transporter. A rigorous and ongoing monitoring of the evolution of loads in the silo and settlements of the soil was carried out during 1400 days that is from the construction of foundations in 2008 to 2012. Numerical calculations by finite elements have been carried and the results obtained are compared with the measurements.

KEYWORDS: Stone columns, monitoring, settlements, numerical, consolidation.

1 INTRODUCTION

La plaine alluviale de Bejaia est située à 250 kms à l'Est d'Alger. Elle est caractérisée par des formations marécageuses de faible portance, potentiellement compressibles et sujettes au risque de liquéfaction (Sadaoui 2006; Khaitine et al. 2013; Delft Laboraty 1978). Les formations d'âge quaternaire d'une puissance de 25 à 30 mètres surmontant le substratum sont constituées d'une succession de couches d'argiles molles, sables et limons vaseux avec interpénétrations de lentilles sablonneuses. Parmi les pathologies de fondations diagnostiquées, on cite les ouvrages de stockage d'hydrocarbures fondés sur radiers souples ayant subis dans un passé récent des tassements différentiels variant de 18 à 28 cm. Les dommages structuraux inhérents aux tassements se sont traduits par l'ovalisation des robes, coincement et frottement des toits flottants et fissurations des radiers (Bahar, Khaitine et Sadaoui 2011; Bahar et al. 2012). La remise en état de service des ouvrages affectés avait conduit l'exploitant à réaliser des consolidations des fondations très onéreuses par micro-pieux injectés sur quatre bacs de stockage (Bahar, Sadaoui et Amzal 2013).

Devant ce constat alarmant, l'expansion des activités industrielles à partir des années 2000 avait impulsé les concepteurs de projets et les maîtres d'ouvrage à adopter soit des fondations profondes sur pieux fichés dans le substratum, soit de procéder au renforcement des sols pour l'adoption de semelles superficielles. Parmi les procédés de renforcement de sols, la technique de colonnes ballastées offre une alternative intéressante du fait qu'elle utilise le ballast comme matériau de substitution disponible localement. Ce procédé

économique et de réalisation rapide contribue à l'augmentation de la portance des sols médiocres, réduit les tassements et les risques de liquéfaction des sables saturés (Brown 1977; Seed and Booker 1977; Bouassida et Guetif 2000; Lambert 2013; Priebe 1989; Adalier and Gamal 2004; Dhouib et Blondeau 2005), par conséquent il constitue une bonne alternative par rapport au système de fondations profondes. Cette technique de renforcement a été appliquée pour la première fois en Algérie en 1999 dans le traitement des sols mous sous les silos de stockage de céréales au port de Bejaia. Le caractère flottant des colonnes de 18 m de profondeur et la contrainte de service de 2.18 bars appliquée avaient engendré des tassements incompatibles avec la stabilité des ouvrages (Bahar et Sadaoui 2008; Bahar, Sadaoui et Vincens 2010; Bahar, Khaitine et Sadaoui 2011). En outre, l'instrumentation durant 7 ans (2005 à 2012) d'une batterie de 10 silos de stockage fondée sur un sol renforcé par colonnes ballastées a révélé un développement rapide des tassements avec un impact très préjudiciable sur le radier et la structure métallique des silos (Sadaoui et Bahar 2017).

Le présent article traite le retour d'expérience en termes de tassements et de pathologies de fondations d'un silo de stockage de 80 000 tonnes de capacité et de deux (02) tours d'ensilage implantés au niveau du nouveau quai au port de Bejaia, Algérie. Ces ouvrages ont été fondés en 2008 sur un sol compressible renforcé par des colonnes ballastées de 0.80 m de diamètre, de 18 m de profondeur et d'un maillage 1.6x1.6 m². L'évolution continue des tassements absolus et différentiels et l'historique des chargements ont été suivi par des dispositifs de mesure très fiables. Cette étude met en évidence, le développement rapide des tassements différentiels et leurs impacts

sur la stabilité des ouvrages en interaction. Par ailleurs, la confrontation des mesures réelles aux résultats des calculs numériques par éléments finis montre certaine divergence dans les valeurs obtenues, néanmoins, les formes des cuvettes de tassements se concordent.

2 DESCRIPTION DES OUVRAGES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Les ouvrages de stockage ont été conçus pour augmenter les capacités d'emménagement en sucre blanc. Ils rentrent dans le cadre du développement des activités du groupe Cevital SPA en matière de traitement et de conditionnement de sucre d'une capacité de 3000 t/j. Les installations sont classées d'importance vitale en vertu du règlement parasismique Algérien (CGS 2003), elles constituent l'une des plus importantes en Afrique en termes de hauteur et de capacité de stockage. La superstructure du silo 80 000 tonnes de capacité est conçue en charpente métallique, de 54.3 m de diamètre intérieur, de 63 m de hauteur et de poids à vide de l'ordre de 3000 tonnes (Fig. 1). La coque et le toit sont constitués d'une paroi cylindrique sous forme d'assemblage en double viroles en acier. D'autre part, le radier rigide en béton armé de 58 m de diamètre est fondé sur un gros béton de 0.75 m d'épaisseur, il est constitué de nervures orthogonales (0.7m/3m) et d'une plaque de 0.5 m d'épaisseur. La contrainte due au poids propre est de 73 kPa. La contrainte maximale résultant de la descente des charges à l'état limite de service (ELS) transmise sous le radier est de 376 kPa. Concernant les tours d'ensilage 1 et 2, leurs contraintes en service (ELS) sont respectivement de 242 et 200 kPa. A l'achèvement des ouvrages en 2009, une instrumentation (tassomètres, cibles optiques, capteurs de déformation) a été mise en œuvre avant la mise en chargement du silo survenu en avril 2010.

3 DONNEES GEOTECHNIQUES ET INTERPRETATION

La lithologie du site est dominée par des formations quaternaires (a¹, a², m^{1p}) en surface (Fig. 2). Il s'agit d'argiles molles et de limons sableux vaseux sur environ 39 m de profondeur surmontant le crétacé de nature maro-calcaire et de schistes friables. L'analyse granulométrique montre que 60 à 95% des passants sont inférieurs à 80µm, ce qui dénote une constitution fine de la majorité des couches de sols (Fig. 3). En outre, les essais de limites d'Atterberg ont permis de classer ces sols dans la catégorie de plastique à très plastique. Le sol est très compressible (Fig. 4) et présente une tendance à la liquéfaction sur quelques lentilles sablonneuses.

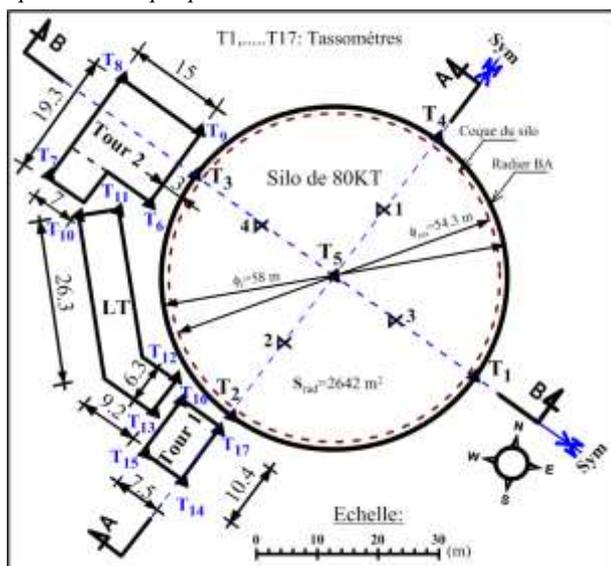


Figure 1. Vue en plan et dispositifs de mesure des tassements.



Figure 2. Extrait de la carte géologique et repérage des ouvrages.

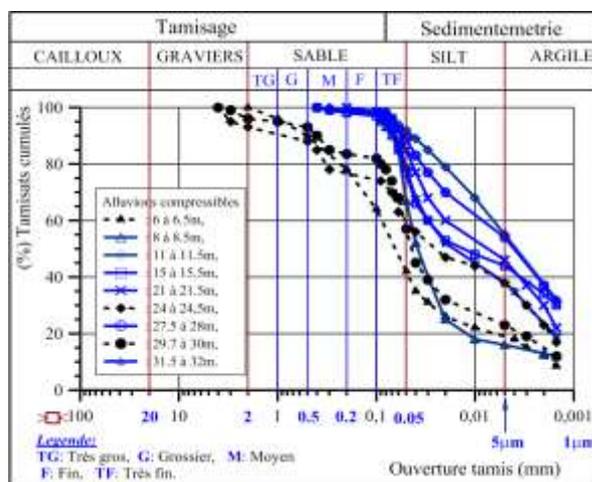


Figure 3. Courbes granulométriques.

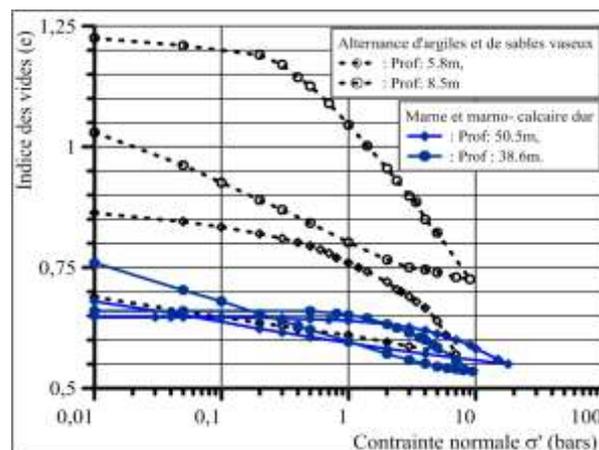


Figure 4. Courbes de compressibilité oedométriques.

Les essais de cisaillement drainés (CD) ont révélé une faible résistance au cisaillement des sols quaternaires ($10 \leq c' \leq 42 \text{ kPa}$ et $5 \leq \phi \leq 25^\circ$), les valeurs moyennes varient de 18 à 25 kPa pour la cohésion c' et de 10 à 15° pour le frottement interne ϕ' . Les paramètres mesurés dans la marne entre 39 et 47m de profondeur varient dans les intervalles ($12 \leq c' \leq 52 \text{ kPa}$ et $17 \leq \phi \leq 33^\circ$), ce qui dénote une bonne résistance. Les essais oedométriques entre 3.5 et 39 m de profondeur ont donné un coefficient de compression c_c variable de 0.09 à 0.27 et un coefficient de gonflement c_g entre 0.01 et 0.08. La formation quaternaire est sous à normalement consolidée et

le substratum est surconsolidé à partir de 50m de profondeur. Le niveau moyen de la nappe phréatique est à -2m/NGA.

4 SUIVI DES TASSEMENTS

Les relevés de l'évolution des chargements du silo et des tassements durant 1400 jours ont été effectués d'une manière continue depuis 2008 à 2012. Les tassements ont été mesurés sur 17 points notés (T1,..... à T17) par des tassomètres et des visées topographiques sur réflecteurs fixes (Fig. 1). L'incrément de contrainte de 73 à 260 kPa sous l'effet d'une charge d'exploitation de l'ordre de 50 000 tonnes (60% de la charge maximale) a engendré à partir 2012 des tassements absolus variables de 44 à 53 cm sous le silo et de 27 à 30 cm respectivement sous les tours 2 et 1 (Fig. 5). Les tassements différentiels y afférent varient de 5 à 8 cm sous le silo et de 8 à 18 cm respectivement sous les tours 1 et 2

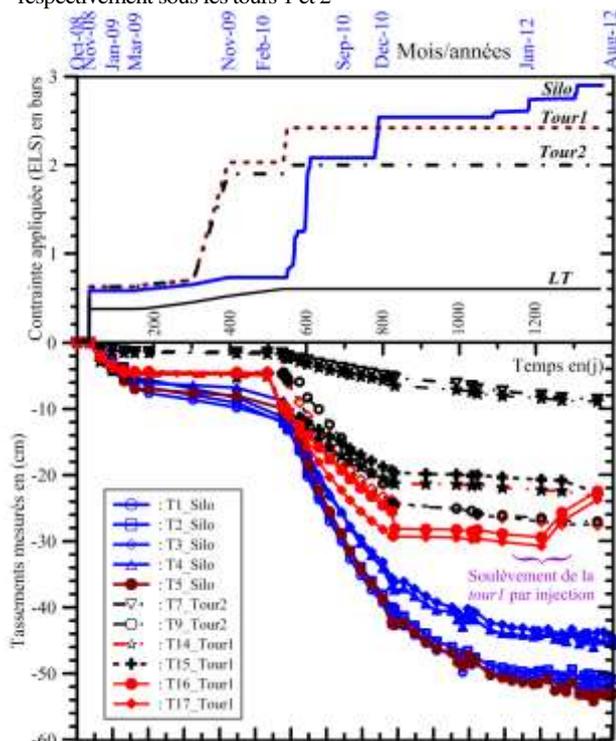


Figure 5. Evolution des tassements en fonction du temps (2008 à 2012).

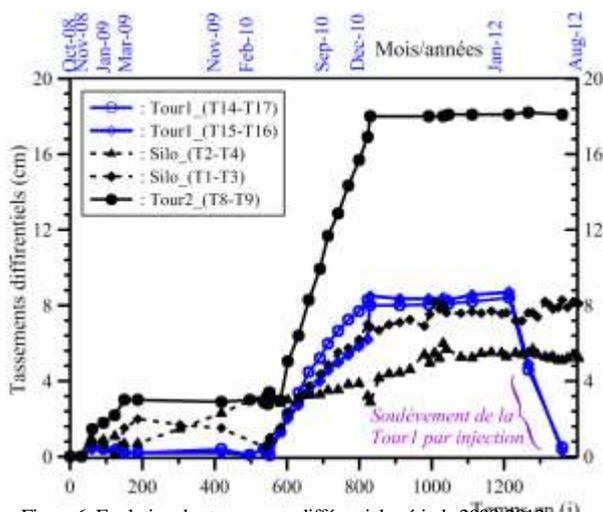


Figure 6. Evolution des tassements différentiels période 2008-2012.

Les premiers indices pathologiques se manifestèrent à partir de février 2010. Ils sont inhérents aux tassements différentiels ayant impacté la stabilité des tours et des locaux techniques. Il s'agit de l'endommagement des transporteurs reliant la tour 1 au silo, de fissures béantes des murs des locaux techniques et l'inclinaison des tours 1 et 2. L'inclinaison des tours a été décelée par des mesures topographiques, un déplacement horizontal maximal au sommet variant de 42 à 51 cm a été mesuré le mois de novembre 2010.

5 MODELE NUMERIQUE AUX ELEMENTS FINIS

Les calculs numériques ont été réalisés à l'aide du code d'éléments finis Cesar- LCPC (Itech 2004) en considérant une loi de comportement élastoplastique avec le critère de Mohr- Coulomb. Le modèle tridimensionnelle (3D) prend en compte 3/4 du radier du silo en intégrant les radiers des tours et les locaux techniques (LT). Il est constitué de 12930 éléments iso-paramétriques hexaédriques H8 (Fig. 7). Les chargements ont été appliqués suivant le passage de la construction des ouvrages et de l'ensilage- déchargement du silo de stockage (Fig. 5). La rigidité (EI) des radiers du silo et des tours est de l'ordre de 34 GPa.m²/m et celle du radier des locaux techniques est de 2.5 GPa.m²/m. Les paramètres géomécaniques des couches de sol sont indiqués dans le tableau 1 et ceux de la couche renforcée (0- 18 m) ont été évalués par la méthode d'homogénéisation de Priebe (1995). Les calculs ont été menés par phasage suivant les contraintes réelles apportées par les ouvrages comme indiqué dans la Figure 5.

Tableau 1. Caractéristiques physiques et mécaniques prises en compte dans le modèle EF.

Type de sols et des matériaux	EP (m)	γ (kN/m ³)	c' (KPa)	ϕ' (°)	E _s (MPa)	ν'
Remblai argilo-caillouteux	3.5	19	1	30	20	0.33
Alluvions compressibles	35.5	19	18	13	6-8	0.35
Marne graveleuse	8.0	20.5	30	23	15	0.32
Marne grise compacte (Crétacé)	≥ 28	21	50- 100	25-30	10 ² -10 ³	0.30
Colonnes ballastées	19m	21	1	38	60-80	0.33
Radier en BA RN30	-	25	-	-	3x 10 ⁴	0.20

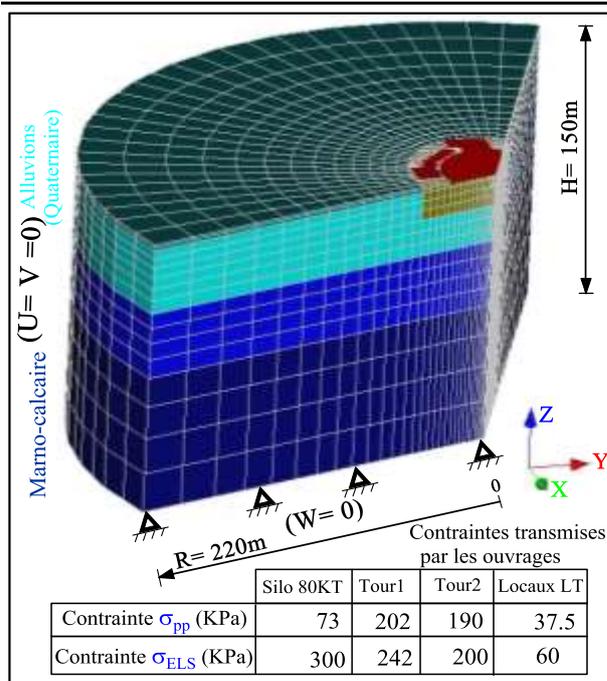


Figure 7. Modèle éléments finis tridimensionnelle à l'aide du logiciel Cesar-LCPC.

Les résultats des calculs numériques par éléments finis de la Figure 8 donnent un tassement maximal de 70 cm sous le centre du radier, soit un écart de 30% par rapport aux mesures. Cet écart est imputable à la variabilité des paramètres géotechniques et aux choix des modules de déformation des sols. Néanmoins, on remarque que l'évolution des cuvettes de tassements mesurés est concordante par rapport aux calculs numériques.

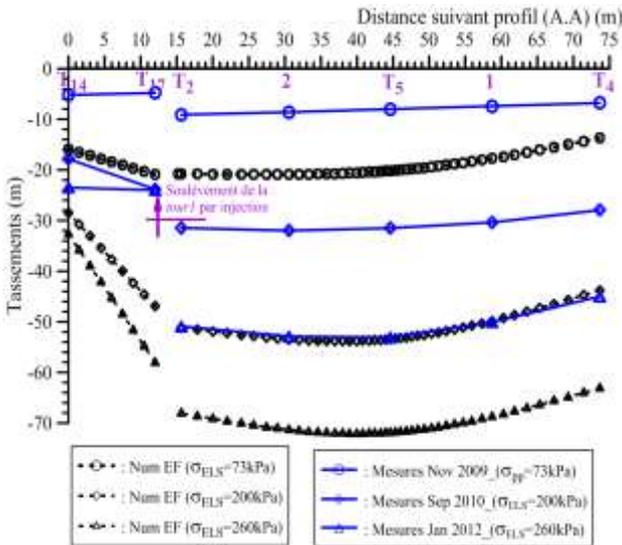


Figure 8. Evolution de la cuvette des tassements des radiers (2008- 2012) suivant la coupe (A.A.).

Le coefficient de réduction des tassements (β) est un paramètre régissant l'efficacité du traitement, il s'agit du rapport des tassements de consolidation sans et avec renforcement du sol. D'après les calculs à partir de la méthode de Priebe (1995) et des mesures, ce paramètre varie de 1.25 à 1.30 dans notre cas.

6 CONCLUSION

La technique de colonnes ballastées est intéressante sous les ouvrages souples soumis aux chargements modérés et acceptant des tassements différentiels. Elle offre des avantages économiques et un gain de temps substantiel dans la réalisation. Cependant, l'insuffisance des reconnaissances géotechniques et les erreurs de conception et de dimensionnement peuvent engendrer des dommages imminents dont la reprise en sous œuvre est extrêmement délicate et coûteuse.

La présente étude met en évidence l'inefficacité d'un renforcement par colonnes flottantes dans des sols mous soumis à l'interaction d'ouvrages à chargement variable. La prévision des tassements au stade de projet était correcte et proche des mesures enregistrées. L'erreur commise dans l'appréciation des effets d'un tassement absolu dépassant les 50 cm est très coûteuse.

En dépit de la rigidité élevée des radiers conçus pour pallier aux risques de déflexions, ils ont accusé des tassements différentiels excessifs qui sont à l'origine de l'instabilité des tours fondées sur des radiers rigides de faibles surfaces (174 à 290 m²). A noter également le caractère rapide du développement des tassements à cause l'accélération du drainage dû à la forte perméabilité des colonnes ballastées.

Les injections de coulis de silice réalisées en 2011 autour des tours et des locaux techniques ont permis le redressement de la tour 1 d'ensilage jusqu'à l'élimination des tassements différentiels. Tenant compte des risques d'évolution des tassements, la capacité de stockage du silo prévue initialement à 80000 tonnes, n'a pas dépassée 62% depuis 2012 à ce jour.

7 REMERCIEMENTS

Nous remercions le personnel technique de la direction projets Cevital SPA Bejaia et les techniciens d'exploitation de la raffinerie

3000T pour leurs contributions dans l'opération d'instrumentation de mesure des tassements et de relevé des chargements du silo. Nous remercions vivement également les cadres techniques du Bureau d'engineering des travaux publics BICS pour la mise à disposition de la station de surveillance topographique et leur assistance technique.

7 REFERENCES

- Adalier and Gamal 2004. Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns. *Engineering Geology*, 72 (1), pp. 678-690.
- Bahar et al. 2012. Settlements observations of industrial structures founded on soft soils: Case of the harbour zone of Bejaia city. . *Proc. 3rd Int. Conf. on new Developments in Soils Mechanics and Geotechnical Engineering, Nicosia, North Cyprus*, . pp. 149-156.
- Bahar et Sadaoui 2008. Tassements des sols renforcés par colonnes ballastées. *Seminaire International Hammamet Tunis, Tunisie*.
- Bahar, Khaïtine et Sadaoui 2011. Foundations behavior of projects founded on Bejaia soft soils reinforced by stone columns. *Seminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, Rabat 23- 25 Novembre 2011* . p. 35.
- Bahar, Sadaoui et Amzal 2013. Differential settlements of cylindrical steel storage tanks- Case of the marine terminal of Bejaia. *7th Int. Conf. on case Histories in Geotechnical Engineering, Chicago USA, Paper 12*, <http://scholarsmine.mst.edu/7icchge/session02/12>.
- Bahar, Sadaoui et Vincens 2010. Settlements of silos founded on compressible soil reinforced by stone columns. *Proceedings of International Geotechnical Conference- Geotechnical Challenges in Megacities, Moscou (Russie), 07- 10juin 2010, Vol.3*. pp. 965-970.
- Bouassida et Guetif 2000. Etude comparative: Pieux- Colonnes, Cas du siège des chèques postaux à Tunis cas du siège des chèques postaux à Tunis. *Seminaire sur le renforcement des sols : Etat de l'art et perspectives en Tunisie, ENIT – BP 37, Le Belvédère 1002 Tunis*. pp. 65-78.
- Brown 1977. Vibroflotation compaction of cohesionless soils. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division 103 (12)*, pp. 1435-1451.
- CGS. 2003. Document technique réglementaire DTR- BC2-48, Règles parasismiques Algériennes RPA99/Version 2003 . *Centre National de Recherche appliquée en Génie Parasismique (CGS)*. 2003, p. 89.
- Coprec. 2005. Recommandations sur la Conception, le Calcul, l'Execution et le Contrôle des Colonnes ballastées sous bâtiments et ouvrages sensibles au tassement. *Revue Française de Géotechnique*. 2005, Vol. RFG n°111, pp. 3-16.
- Delft Laboraty 1978. Etude du potentiel de liquéfaction du sol du site de la nouvelle raffinerie du terminal marin Sud de Bejaia, Sonatrach Engineering and Development- Alger, BO-24 2850/58.
- Dhouib et Blondeau 2005. Colonnes ballastées: Techniques de mise en oeuvre, domaines d'application, comportement, justification, contrôle, axes de recherche et de développement. *Presses de l'Ecole Nationale des ponts et Chaussées (ENPC), Paris*.
- Itech 2004. Manuel de référence de Cesar et Solveur CLEO 2D & 3D.
- Khaïtine et al. 2013. Evaluation of dynamics properties and liquefaction potential of silty sand in harbour of Bejaia, Algeria. *Proc. 2nd European Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering and Seismology, Istanbul- Turkey*, pp. 650-659.
- Lambert 2013. Évaluation de la réduction du risque de liquéfaction par des colonnes ballastées. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris 2013*, pp. 1-4.
- Priebe 1989. The prevention of liquefaction by vibro-replacement. *Proc., Earthquake Resistance Construction and Design, Berlin, Germany*.
- Priebe, "H.J". 1995. The design of vibro- remplacement. Reprinted from: *Ground Engineering . Keller Grundbau GmbH, Technical paper 12- 61E. 16pages*. 1995.
- Sadaoui 2006. Analyse numérique et expérimentale du comportement des sols compressibles renforcés par des colonnes ballastées. Mémoire de Magister de l'Université A. Mira de Bejaia Algerie.
- Sadaoui and Bahar 2017. Field measurements and back calculations of settlements of structures founded on improved soft soils by stone columns. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. doi/10.1080/19648189.2016.1271358, p. 27.
- Seed and Booker 1977. Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division 103 (7)*, pp. 757-768.