

# PHÉNOMÈNES DE LIQUÉFACTION ET STABILITÉ PAR COLONNES BALLASTÉES DANS LE SITE DE HERAOUA (ALGER)

## LIQUEFACTION PHENOMENA AND STABILITY WITH STONE COLUMN ON HERAOU SITE (ALGIERS)

Nabila Balla<sup>1</sup>, Ouassila Sadou<sup>2</sup>, Naâman Boutouatou<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherche Appliqué en Génie Parasismique CGS, Alger, Algérie

<sup>2</sup> Centre de Recherche Appliqué en Génie Parasismique CGS, Alger, Algérie

<sup>3</sup> Centre de Recherche Appliqué en Génie Parasismique CGS, Alger, Algérie

**RÉSUMÉ** – La susceptibilité d'un site à la liquéfaction est étudiée à travers des critères empiriques issus de la compilation des cas réels de liquéfaction sismique. Ainsi, un site vérifiant ces critères fera l'objet d'une évaluation de son potentiel de liquéfaction. Ce dernier a été évalué au niveau du site de Heraoua réservé à la construction en considérant à la fois la nature du sol, l'intensité du séisme ainsi que les propriétés mécaniques et dynamiques des couches formant le site. Les résultats des sondages et des essais réalisés par le laboratoire géotechnique montrent que le site est constitué ; par une couche de sable dont l'épaisseur varie de 3,2 m. à 4 m. reposant sur un substratum marneux de consistance raide à plastique, avec la présence d'une nappe d'eau, les résultats des essais SPT ont fait ressortir l'existence du risque du potentiel de liquéfaction. Étant donné que toutes les conditions du risque de liquéfaction sont réunies nature du sol (sable) et présence de la nappe, le laboratoire a procédé à un traitement du sol en utilisant la solution des colonnes ballastées pour renforcer la compacité du sol et dépasser la valeur du coefficient de sécurité (FS=1,25) fixé par le RPA99 version 2003.

**ABSTRACT** – The liquefaction of any site (place) is studied through an empiric criteria coming from real case studies of a seismic liquefaction, then, any site presenting similar criteria, will be evaluated based on its liquidation potential. this last was studied in Heraoua Site (eastern Algiers), place reserved for civil building, considering the soil nature and seismic hazards in addition to the mechanic/ dynamic properties of the sol layers. the soundings and in-site test realized by geotechnical laboratory, show the site is made by; a layer of sand with a thickness ranging from 3.2 m. to 4 m. resting on a substratum made of marl of stiff to plastic consistency; with presence of a water Table, the SPT test results have highlighted the existence of liquefaction risk. Given that all the liquefaction hazard conditions are gathered, (sandy soil, and water table presence), the geotechnical laboratory had proceeded to the soil treatment using the stone columns to enhance the compactness of the soil, exceeding the value of the safety factor (FS = 1.25) set by the RPA99 (2003 version).

### 1. Introduction

Les conditions géotechniques des sites de constructions sont étudiées par les moyens de reconnaissances et d'analyse classiques (essais in situ et essais de laboratoire). Lorsque les sites ne présentent pas des caractéristiques suffisantes ou sont soumis à des aléas tels que la liquéfaction, le recours à des techniques d'amélioration de sols est alors nécessaire.

Lorsque la liquéfaction se produit, la résistance du sol diminue et la capacité portante du dépôt de sol constituant la fondation des bâtiments et des ponts se réduit significativement en provoquant le basculement ou la flottaison de l'immeuble.

Le processus de liquéfaction du sol a été mis en évidence lors des séismes ; pour exemples, en Algérie, à El Asnam (1980) et Boumerdes (2003), ainsi qu'à travers le monde, à Kobe (Japon, 1995) et à Izmit (Turquie, 1999).

Durant le séisme de Boumerdes (2003), des ébullitions de sable et de fissures de sol ont été observées sur différents sites. Aussi, il a été observé que la liquéfaction a provoqué le déplacement latéral et longitudinal des fondations de pont d'Isser à Boumerdes.

## 2. Situation du site d'étude

Le site d'étude se localise à l'entrée Ouest de la localité de Heraoua à une trentaine de kilomètres à l'Est d'Alger.



Figure 1. Carte de localisation du secteur d'étude (MNT, RSTM)

## 3. Le cadre géomorphologique, géologique, sismique, hydrogéologique et géotechnique du site d'étude

La région d'étude est caractérisée par des ensembles morphologiques, qui sont le résultat d'une évolution complexe, que nous pouvons distinguer du Nord au Sud : le sahel oriental et la plaine de la Mitidja orientale.

La géologie de la région d'Alger est constituée par un socle métamorphique correspondant au massif d'Alger sur lequel sont discordant des dépôts sédimentaires d'âge Mio-Plio-Quaternaire.

La zone d'étude est caractérisée essentiellement par deux sédimentations : des sables assez grossiers arrondis rubéfié et des marnes grises plastiques. Elle se caractérise par un climat méditerranéen dans lequel existe deux périodes contrastées : un hiver frais et humide, un été chaud et sec.

Les marnes plaisanciennes forment le substratum imperméable et représentent le mur des aquifères astiens grésocalcaires et les alluvions quaternaires qui sont généralement alimentés par les eaux de pluies.

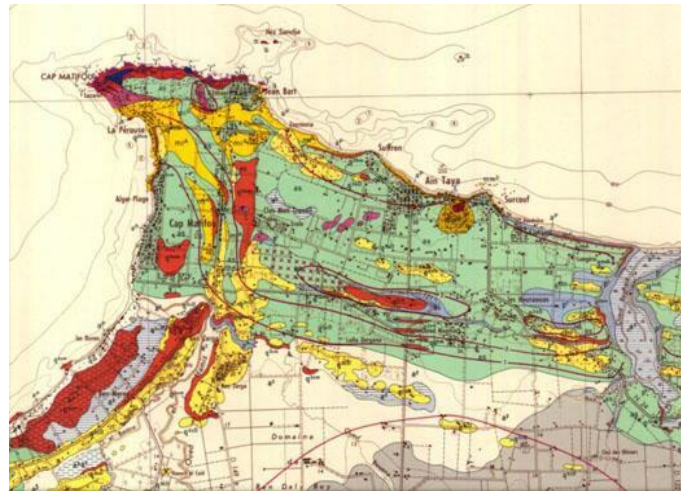


Figure 2. Extrait de carte géologique du secteur d'étude réalisée par A. Aymé 1962

Vue la sismicité élevée de la région centre et suite aux dernières manifestations de l'activité sismique notamment celle du 21 mai 2003, toute la région d'Alger est reclassée dans le nouveau zonage sismique qui lui attribue la zone III (forte sismicité) selon le RPA (complément 2003).

### 3.1 Campagne de reconnaissance

La campagne de reconnaissance géotechnique a consisté en la réalisation de 02 sondages carottés, 02 sondages pressiométriques, 09 essais SPT, et 10 essais de pénétration dynamique. Les résultats sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau 1. Catégorie et structures des sols selon les sondages

Paramètres	Couche sableuse	Couche marneuse
Niveau piézométrique	1.5m	-
$\gamma_d$	-	1.57-1.81 t/m <sup>3</sup>
$\gamma_h$	-	1.99-2.14 t/m <sup>3</sup>
W %	-	18-27%
Sr %	-	99-100%
5mm	99-100	100
2mm	64-98	40-100
80u	3-9	95-99
Cu (D <sub>60</sub> /D <sub>10</sub> ) %	1.5-6.4	-
D <sub>50</sub>	0.05-1.5mm	-
2u	-	44-54
WL%	-	25-55
IP%	-	22-44
Pc (bar)	-	2.18-5.90
Cc	-	11.29-18.60
Cg	-	4.66-9.16
C <sub>cu</sub> (bar)	-	0.31-0.36
Phi <sub>cu</sub> (°)	-	23.17-25.36

Tableau 2. Catégorie et structures des sols selon les sondages carottés, pressiométriques et SPT

N° Sondage	Étiquettes	Essais in situ N- SPT	Essai pressiométriques
Sc_01	Actuel, terre végétale (0 -0.5 m) Quaternaire, sable (0.50 - 8 m) Plaisancien, marne (8 – 10 m)	9 (1-1.45 m) 20(2.00-2.45) 43(3.00-3.45)	60-E-822 9-PL-42 3-E/PL-18
Sc_02	Actuel, terre végétale (0 -0.5 m) Quaternaire, sable (0.50 -4 m) Plaisancien, marne (4– 10 m)	20(1-1.45 m) 38(2.00-2.45) 40(3.00-3.45)	42-E-950 7-PL-42 3-E/PL-18

### 3.2 Evaluation du potentiel de la liquéfaction à partir des prélèvements et essais de laboratoires et essais in-situ

Pour évaluer le risque de la liquéfaction, Seed a prouvé en 1979 qu'il est possible de caractériser le potentiel de liquéfaction d'un sol en fonction de deux paramètres : un paramètre de résistance mécanique (donné par le SPT, Standard Pénétration Test) et un paramètre granulométrique (classification des sols, pourcentage en fines).

L'essai SPT nous permet de déterminer la valeur de N, qui représente la compacité du sol, qui est introduite dans les formules de calcul du coefficient CRR ;

À une profondeur H donnée, le carottier est enfoncé sur 45 cm :

- Y N1 de H à H+15 cm
  - Y N2 de H+15 cm à H+30 cm
  - Y N3 de H+30 cm à H+45 cm
- Le nombre de coup est  $N = N2+N3$

L'essai a été fait par les américains et les japonais, alors, tous les paramètres de calcul sont en fonction des conditions des régions américaines et japonaises, et du type du matériel utilisé au cour de l'essai. C'est pour cela qu'on doit faire des corrections sur la valeur de N pour que les résultats soient compatibles avec ceux trouvés par les américains et les japonais.

Les analyses de sol des essais géotechniques effectués ont permis de faire ressortir l'existence d'un risque potentiel de liquéfaction dans la couche de sable fin saturé d'une épaisseur de 3 m. au niveau du sondage 1 et de 4 m. d'épaisseur au niveau du sondage 2. Le niveau d'eau a été relevé vers 2 m. de profondeur au moment de la réalisation des essais. Les pénétrogrammes enregistrés indiquent que le sol a une bonne, voire une assez bonne résistance à l'énergie du battage, la moyenne des plus faibles résistances étant de l'ordre de 60 bars. Les essais SPT réalisés à chaque mètre de profondeur indiquent qu'il y a un risque de liquéfaction. Le coefficient d'uniformité ( $C_u$ )  $D_{60} / D_{10}$  est inférieur à 15 et le  $D_{50}$  est compris entre 0,05 et 1,5 mm. Et, au sens du règlement parasismique Algérien RPA 99 version 2003, ce type de sable risque de se liquéfier d'autant plus que le niveau de la nappe peut remonter à 1,5 m. de profondeur.

## 4. Renforcement du sol par colonnes ballastés

Un des défis majeurs de la géotechnique parasismique est l'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols et le traitement des sols reconnus liquéfiables : différents moyens sont couramment employés pour permettre la construction sur des sols de mauvaise qualité (vibroflottation, colonnes ballastées, jet grouting,). Compte tenu de la nature du sol en place, ainsi que des résultats des essais de laboratoire réalisés, et aussi de la remontée de la nappe phréatique à 1,5 m. de profondeur, un renforcement par la technique de colonnes ballastés a été retenu pour éliminer ou réduire le risque de liquéfaction.

Le système de fondation arrêté pour les ouvrages (Bâtiments habitations R+4) sont des radiers généraux au taux de travail de 0.5 bar sur une plateforme traitée par un maillage

de colonnes ballastées de diamètre 0.80 m. et d'espacement 2.00 m. ancrées à 7.00 m. dans les marnes raides.

L'essai de chargement a été réalisé sur la colonne ballastée N°54.

Le cycle et le palier de chargement sont inspirés de ceux de l'essai de contrôle de la norme AFNOR NF P 94 150-1 applicable aux pieux. La charge appliquée est de 20 tonnes. Cependant pour répondre aux exigences du D.T.U.1.3.2 et pour obtenir des résultats significatifs et exploitables dans le cas d'un essai sur colonnes ballastées, les paliers suivants seront respectés :

Pré chargement de 0 à 0.25  $Q_s$  maintenu pendant 15 minutes et déchargement rapide pour vérifier le bon fonctionnement du système et pour supprimer les défauts de contact entre la plaque et la tête de la colonne.

Chargement de 0 à 1.5  $Q_s$  pour 6 paliers de 0.25  $Q_s$

Chaque palier est maintenu constant pendant 60 minutes.

Déchargement par palier de 0.25  $Q_s$  tonnes maintenus pendant 5 minutes avec les lectures toutes les minutes.

La colonne ballastée mise en œuvre par voie sèche.

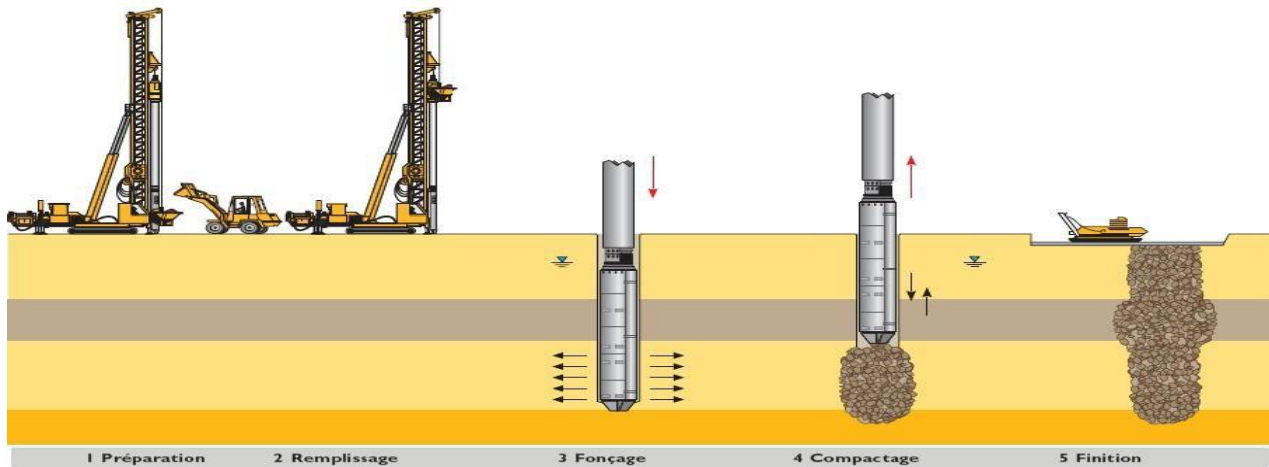


Figure 3. Mise en œuvre des colonnes ballastées par voie sèche (document Keller)

Les travaux d'exécution de colonnes ballastées doivent être suivis par des contrôles appropriés de façon à valider les nouvelles caractéristiques mécaniques du sol renforcé et à s'assurer que les objectifs de traitement sont bien atteints. Les contrôles effectués consistaient en :

1 - L'essai de chargement sur colonne isolée, nous a permis de vérifier son mode de déformation élastoplastique normal.

Tableau 3. Résultats et analyses

Étapes de chargement	Charge appliquée (T)	Tassement (mm)
25	5.00	0.46
50	10.00	0.80
75	15.00	1.55
100	20.00	1.92
125	5.00	2.62
150	30.00	3.60

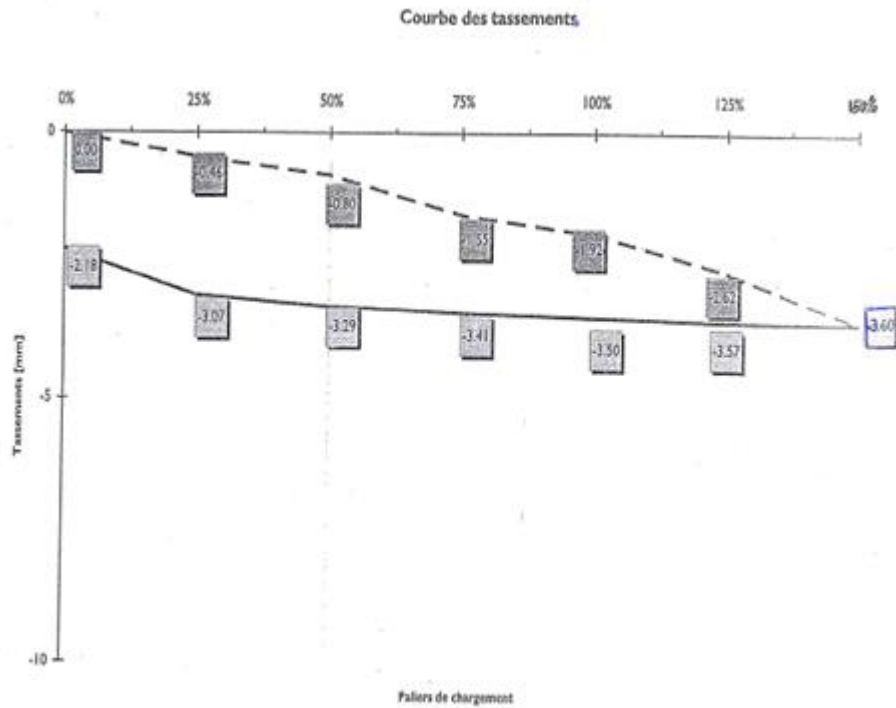


Figure 4 : La courbe des tassements

Les courbes font apparaître les résultats suivants :

- Les courbes de chargement indiquent de façon significative que le domaine des grandes déformations n'est jamais atteint : nous nous trouvons dans la phase élasto-plastique.
- Les courbes de déchargement et les faibles tassements résiduels obtenus confirment le bon serrage des matériaux de la colonne.

## 2 - Essais au pénétromètre dynamique

Les essais réalisés dans les colonnes ballastées sont satisfaisants. Ils ont confirmé une excellente compacité de leur matériaux constitutifs.

## 5. Conclusion

Le traitement de sol par colonnes ballastées est l'une des techniques préférées par les géotechniciens grâce à ses avantages techniques et économiques. En plus de l'augmentation de la capacité portante de sol traité, les colonnes jouent plusieurs rôles : elles travaillent comme des drains verticaux, transfèrent les charges structurales vers un substratum par l'intermédiaire d'un matelas de répartition et empêchent la liquéfaction de sol lors d'un séisme.

L'essai réalisé dans la colonne N°54 est satisfaisant. Il a confirmé une bonne continuité de celle-ci et un bon compactage de leur matériaux constitutifs ( confirmé par les enregistrements des paramètres).

Pour l'essai de chargement sur la colonne N°54, les tassements sont admissibles.

L'essai de chargement présente des résultats conformes aux calculs.

La continuité des colonnes ballastées est confirmée par les enregistrements des paramètres.

## **6. Références bibliographiques**

- Corneille S. (2007). Etude du comportement mécanique des colonnes ballastées chargées par des semelles rigides. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Naoui A. (2012). Conception des fondations sur colonnes ballastées cas d'ouvrages d'arts. Thèse de magister. Institut de Génie Civil. Hydraulique et Architecture. Université El Hadj Lakhdar Batna. Algérie.
- Serratrice JF. (2014). CETE Méditerranée. CFMS/AFPS, Paris.
- Pecker A. (1984). Dynamique des sols, presses de l'ENPC.
- Idriss IM., Boulanger RW. (2006). Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, volume 26, p. 115-130.
- Règles parasismiques Algériennes RPA 99 modifiées en 2003, Algérie, 2003