

## Soft soil strengthening by stone columns: case of the embankment under the bridge “Moulay Youssef” (Rabat/Salé).

Noura NEHAB<sup>1</sup>, Khadija BABA<sup>1</sup>, Latifa OUADIF<sup>1</sup>, Choukri CHERRADI<sup>2</sup> et Lahcen BAH<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Laboratoire L3GIE, Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Université Med V Agdal, Rabat, Maroc.

<sup>2</sup>Ecole Supérieure de Technologie, Université Med V Agdal, Salé, Maroc.

**Abstract** The soil is generally a heterogeneous material presenting very variable characteristics. In a general way, the main problems related to soils are: low bearing capacity, deformations under static or dynamic loads, large displacements and large settlements of soft soil where the soil moves according to a fixed ground water table. The development of soil mechanics and geotechnical engineering has led to the amelioration of a wide range of soil improvement techniques. These techniques consist in modifying the characteristics of the ground by physical action or by incorporating columnar inclusions made of highly compacted gravel or granular material into the original soil. Stone column is one of the soft ground improvement methods, applicable to a wide range of soil strata and an economical method of support in compressible and cohesive soils. However, there are many difficulties in quantitative analysis of soil column interaction due to the fact that bearing capacity and consolidation behavior of stone column-mat foundation system is affected by various parameters. In the present study, mechanism and various parameters of stone column behavior are investigated by loading tests. Also, tests results are compared to the finite element numerical modeling “Plaxis 2D” (case study: the embankment under the bridge “Moulay Youssef, Rabat/Salé”).

### 1. Introduction :

Avec l'évolution des moyens informatiques, la modélisation en éléments finis peut être aisément appliquée aux milieux traités par colonnes ballastées, qui sont un procédé d'amélioration du sol présentant de faibles propriétés géotechniques et susceptible de se déformer de façon considérable sous l'action d'un chargement.

Cette modélisation numérique constitue une alternative simple et efficace pour l'approche du comportement réel des sols renforcés par colonnes ballastées, elle permet l'analyse des tassements, des déformations latérales et des contraintes verticales et horizontales afin d'appréhender le comportement des colonnes et du sol. Elle présente de même l'avantage d'intégrer les tassements des couches sous-jacentes, notamment de moindre résistance. [1]

La réalisation d'essais de chargement sur des colonnes ballastées (chacune seule) a pour objectif de mieux appréhender le comportement à la rupture de ces inclusions souples.

Ce travail présente, dans une première partie, les conditions de sol ainsi que les paramètres liés au ballast et à la colonne (de la rive droite). Sont ensuite présentés les résultats du chargement, en grandeur réelle, ainsi

qu'une comparaison entre les mesures in situ et les résultats des modélisations numériques. Tout en étudiant la sensibilité de ces résultats vis-à-vis des différents paramètres caractérisant le ballast et le sol qui l'entoure (étude paramétrique).

### 2. Conditions de sol et caractéristiques des colonnes :

Une campagne de reconnaissance a été mise en œuvre au niveau du site du futur nouveau pont Moulay Youssef sur « Oued Bouregreg ».

Des sondages carottés jusqu'à 30 m de profondeur, avec prélèvement d'échantillons intacts et remaniés ont permis d'effectuer des essais de laboratoire (identification et caractérisation des sols) et d'établir une coupe détaillée des terrains. Des sondages pressiométriques ont été réalisés avec des essais SPT afin de déterminer les caractéristiques pressiométriques des sols. Enfin, l'hétérogénéité du site a été mise en évidence par des sondages de pénétration statique (CPT).

Ces essais montrent que jusqu'à 10m on a affaire à des formations sableuses et vaseuses peu consistantes et qu'au-delà de cette profondeur on a du sable consistant.

Compte tenu de la granulométrie du sol et selon le règlement parasismique Marocain, celui-ci est susceptible de liquéfaction.

Ce risque a été évalué en se basant sur le résultat d'essais de pénétration (SPT):

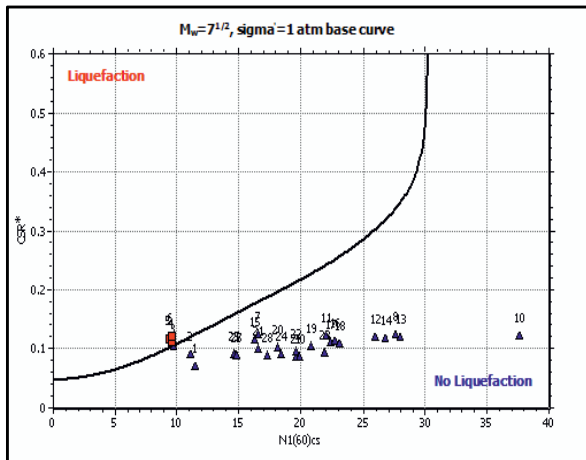


Fig. 1. Risque de liquéfaction du sol déterminé par le logiciel LIQUIT en se basant sur la méthode SPT.

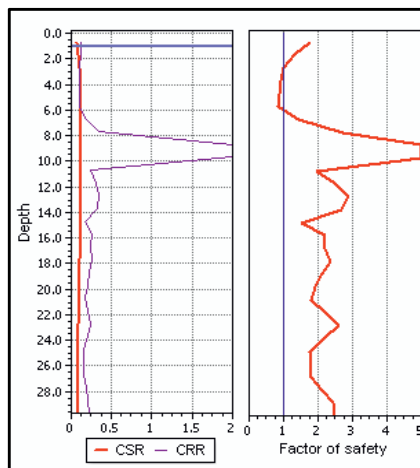


Fig. 2. Facteur de sécurité au risque de liquéfaction du sol déterminé par le logiciel LIQUIT en se basant sur la méthode SPT.

Ces graphes ("Fig.1" et "Fig.2") montrent que le risque est survenu surtout dans les six premiers mètres du sol.

Vu le risque de liquéfaction ainsi que la présence de la vase jusqu'à 10,5m de profondeur, il faut absolument traiter le sol de la rive droite par les colonnes ballastées de diamètre 0,8m, de profondeur de 10,5m et d'un espacement  $S=1,5m$ .

### 3. Essais de chargement en grandeur réelle :

#### 3.1 Présentation générale :

Une série d'essais de chargement a été réalisé sur des colonnes isolées appartenant aux deux rives, dans ce cas on va s'intéresser aux résultats de la rive droite. Une charge de 300 KN a été appliquée par paliers de 60 KN.

### 3.2 Résultats :

Les essais de chargement ont permis de déterminer les tassements en fonction de la charge :

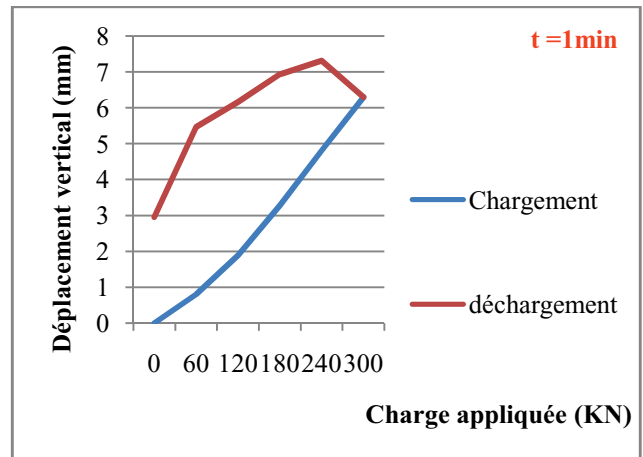


Fig. 3. Déplacement vertical en fonction de la charge appliquée pour  $t=1min$ .

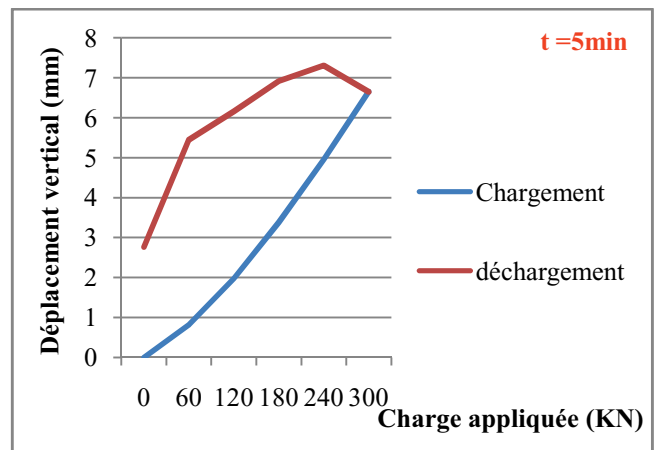


Fig. 4. Déplacement vertical en fonction de la charge appliquée pour  $t=5min$ .

### 4. Modélisation en éléments finis du comportement des colonnes ballastées ;

La modélisation du chargement sur une colonne ballastée a été effectuée en deux dimensions en axisymétrie de révolution à partir du logiciel PLAXIS 2D V8. [3]

#### 4.1 Le modèle de base :

Il permet d'assimiler le comportement de la colonne ballastée lors des essais de chargement appliqués directement sur la colonne sans l'intermédiaire du matelas. Dans ce cas on va appliquer aux sols les conditions non drainées du fait qu'il s'agit du calcul à court terme. [2]

Les conditions aux limites sont telles que les déplacements :

- ✓ horizontaux soient bloqués à l'axe et à l'extrémité latérale du modèle ;
- ✓ horizontaux et verticaux soient bloqués à la base du modèle.

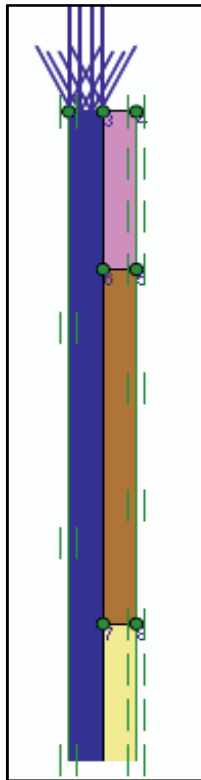


Fig. 5. Modélisation numérique (Plaxis 2D) d'une colonne soumise aux essais de chargement.

### 5. Comparaison des mesures in situ et des modélisations numériques (étude paramétrique):

Avant toute analyse des résultats numériques concernant le chargement d'une colonne ballastée, nous mentionnons ici que la charge critique de fluage déterminée par l'essai de chargement en grandeur réelle est de 250 KN.

Une étude paramétrique a été réalisée afin de déterminer l'influence de certains paramètres sur les résultats du tassement.

Nous avons fait varier certains paramètres :

#### 5.1 la loi de comportement de la colonne (Le modèle élastique linéaire et Le modèle élasto-plastique « Mohr-Coulomb ») :

La figure « fig.6 » présente le tassement mesuré in situ et déterminé à partir de deux modèles réalisés avec Plaxis 2D. L'un étant avec une colonne à loi de comportement élastique linéaire ( $E_{ballast} = 70 \text{ MPa}$ ) « mod lin elast » et une colonne à loi de comportement élasto-plastique « Mohr-Coulomb » ( $E_{ballast} = 70 \text{ MPa}$ ,  $\varphi = 40^\circ$ ) « mod Mohr C ». Les sols étant à l'état non drainé.

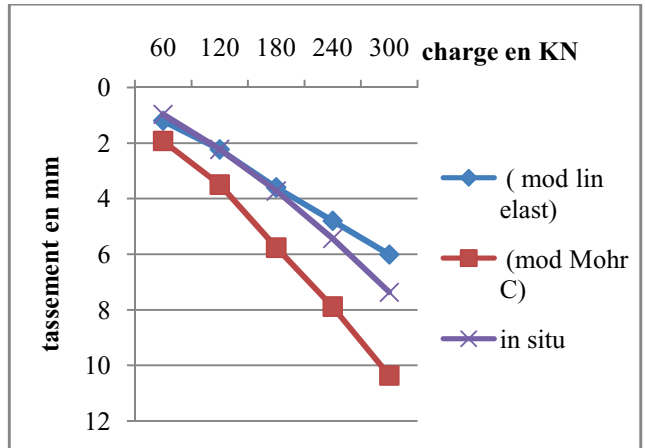


Fig. 6. Comparaison des tassements mesurés in situ et ceux obtenus en 2D (colonne à loi de comportement élastique linéaire ou élasto-plastique).

Tableau 1. Le Rapport du tassement numérique pour les deux modèles (MC et LE) :

charge en KN	Rapport MC/in situ	Rapport LE/in situ
60	2,00	1,25
120	1,57	1,00
180	1,55	0,97
240	1,45	0,88
300	1,41	0,82

Ce tableau indique que les tassements sont égaux à 0,8 à 1,25 fois les mesures expérimentales pour le modèle linéaire élastique et à 1,4 à 2 fois pour le modèle de Mohr coulomb. Donc le comportement de la colonne pour un chargement de 60KN à 300KN à court terme s'approche du modèle linéaire élastique.

#### 5.2 Le module de Young du ballast (de 40 à 100 MPa) :

Les deux figures ci-après (« fig.7 » et « fig.8 ») présentent la comparaison entre les tassements mesurés in situ et ceux déterminés à partir des deux modèles (comportement élastique linéaire et comportement élasto-plastique) pour lesquels le module de Young du ballast varie entre 40, 70 et 100 MPa,

##### 5.2.1 Comportement élastique linéaire :

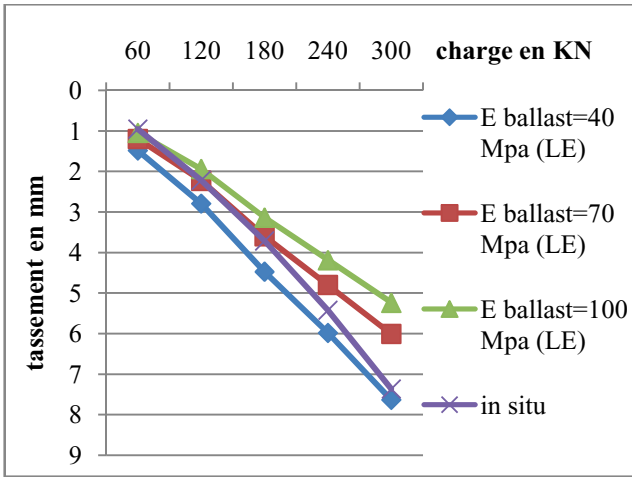


Fig. 7. Comparaison des tassements mesurés in situ et ceux obtenus en 2D (colonne à loi de comportement élastique linéaire avec E ballast=40,70 et 100 MPa).

Tableau 2. Le Rapport du tassement numérique pour les trois modèles :

charge	E=40/in situ	E=70/in situ	E=100/in situ
60	1,55	1,25	1,09
120	1,26	1,00	0,87
180	1,20	0,97	0,84
240	1,10	0,88	0,77
300	1,04	0,82	0,71

Ce tableau indique que les tassements du modèle « E=40MPa » sont égaux de 1 à 1,5 fois les mesures expérimentales, alors que le modèle « E=100MPa » les sous-estime (tassements égaux à 0,7 à 1 fois les mesures in situ). Et on constate l'amélioration du sol avec l'augmentation du module de Young du ballast.

5.2.2 comportement élasto-plastique :

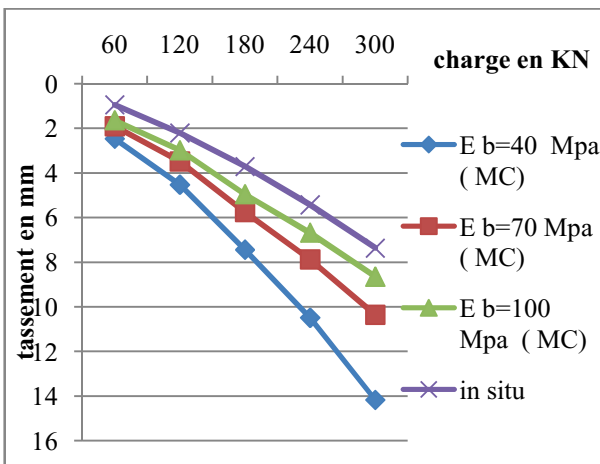


Fig. 8. Comparaison des tassements mesurés in situ et ceux obtenus en 2D (colonne à loi de comportement élasto-plastique « MC » avec E ballast=40,70 et 100 MPa).

Tableau 3. Le Rapport du tassement numérique pour les trois modèles (E=40, E=70 et E=100) :

charge	E=40/in situ	E=70/in situ	E=100/in situ
60	2,57	2,00	1,72
120	2,04	1,57	1,35
180	2,00	1,55	1,33
240	1,93	1,45	1,23
300	1,92	1,41	1,17

Ce tableau indique que les tassements du modèle « E=40MPa » sont égaux de 1,9 à 2,6 fois les mesures expérimentales, alors que ceux du modèle « E=100MPa » sont égaux de 1,17 à 1,7 fois les mesures expérimentales.

5.3 L'angle de frottement du ballast (de 35° à 45°) :

La figure « fig.9 » présente le tassement de la semelle sur la colonne ballastée, mesuré in situ et déterminé à partir du modèle réalisé avec une colonne à loi de comportement élasto-plastique « Mohr-Coulomb » (Eballast = 70 MPa) pour lequel l'angle de frottement du ballast varie de 35 à 45°.

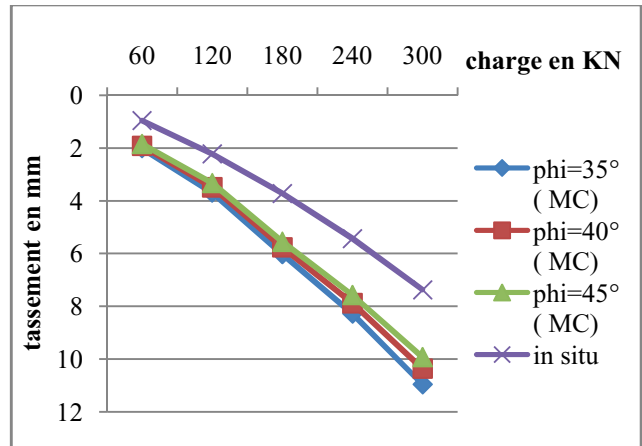


Fig. 9. Comparaison des tassements mesurés in situ et ceux obtenus en 2D (colonne à loi de comportement élasto-plastique « MC », E ballast et phi=35°,40° et 45°).

Tableau 4. Le Rapport du tassement numérique pour les trois modèles (phi=35, phi=40 et phi=45) :

charge	phi=35/in situ	phi=40/in situ	phi=45/in situ
60	2,09	2,00	1,93
120	1,66	1,57	1,50
180	1,62	1,55	1,49
240	1,52	1,45	1,39
300	1,49	1,41	1,35

On constate que l'augmentation de l'angle de frottement interne du ballast permet une réduction de

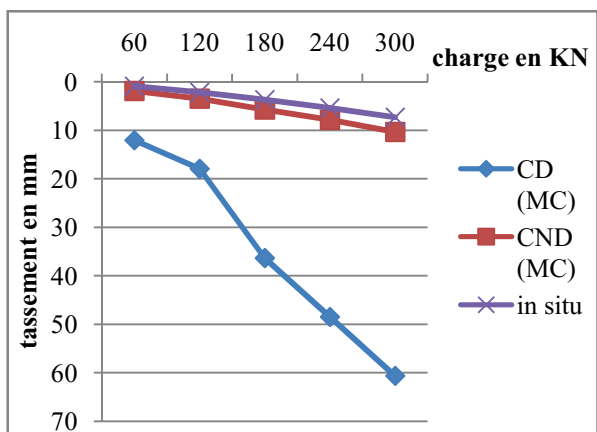
tassement.

Le tableau indique que les tassements du modèle « phi=35° » sont égaux de 1,5 à 2 fois les mesures in situ, alors que ceux du modèle « phi=45° » sont égaux de 1,3 à 1,9 fois les mesures expérimentales.

**5.4 Paramètres des sols à court et long terme (conditions drainées ou non drainées) :**

Les deux figures (« fig.10 » et « fig.9 ») présentent le tassement mesuré in situ et déterminé à partir du modèle réalisé avec une colonne suivant une loi de comportement ( soit linéaire élastique soit Mohr coulomb), (Eballast = 70 MPa), pour lequel les paramètres mécaniques des matériaux sont soit drainés, soit non drainés.

**5.4.1 Loi de comportement « Mohr coulomb » :**



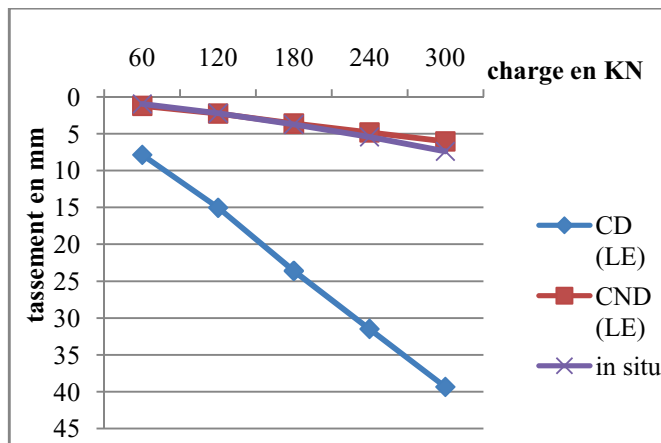
**Fig. 9.** Comparaison du tassement à partir des données expérimentales et de ceux obtenus en 2D (colonne à loi de comportement élasto-plastique « MC », paramètres drainés ou non drainés pour les sols).

**Tableau 5.** Le Rapport du tassement numérique pour les deux modèles (D et ND) et colonne à loi de comportement « MC » :

charge	D/in situ	ND/in situ
60	12,64	2,00
120	8,11	1,57
180	9,78	1,55
240	8,94	1,45
300	8,23	1,41

Les tassements déterminés par le modèle « D » sont au moins huit fois supérieurs à ceux in situ, alors que ceux déterminés par le modèle « ND » sont 1,4 à 2 fois supérieurs à ceux mesurés in situ. Ceci est dû au fait que les essais de chargement ne laissent pas le temps suffisant au sol de se consolider (Essais à court terme), alors que les conditions drainées exigent le chargement à long terme.

**5.4.2 Loi de comportement élastique linéaire :**



**Fig. 10.** Comparaison du tassement à partir des données expérimentales et de ceux obtenus en 2D (colonne à loi de comportement élastique, paramètres drainés ou non drainés pour les sols).

**Tableau 6.** Le Rapport du tassement numérique pour les deux modèles (D et ND) et colonne à loi de comportement élastique :

charge	D/in situ	ND/in situ
60	8,19	1,25
120	6,77	1,00
180	6,34	0,97
240	5,80	0,88
300	5,34	0,82

Ce tableau indique que Les tassements déterminés par le modèle « D » sont surestimés par rapport à ceux in situ (au moins cinq fois supérieurs), alors que ceux déterminés par le modèle « ND » sont 0,8 à 1,25 fois supérieurs à ceux mesurés in situ.

**6. Conclusion :**

L'étude paramétrique montre que les tassements déterminés par l'ensemble des modèles sont égaux à 0,8 à 2 fois les tassements in situ.

Les modèles pour lesquels ces rapports ne sont pas valables sont ceux avec une colonne élastique ayant un module de Young élevé (100 MPa) ou une colonne élasto-plastique ayant un module de Young petit (E=40MPa), ainsi qu'une colonne mise dans un sol en conditions drainées (pour un essai de chargement à court terme).

Ainsi, une modélisation en axisymétrie de révolution, pour laquelle le comportement et les paramètres sont bien choisis, permet de déterminer approximativement les tassements pour un chargement inférieur à la charge critique de fluage.

**Références :**

1. Ammar DHOUIB, Francis BLONDEAU. *Colonnes Ballastées* : Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, (2005).
2. Gérard PHILIPPONAT. *Fondations et ouvrages en terre* : Eyrolles, (1998).
3. R.B.J. Brinkgreve. *Manuel de référence de Plaxis*, PLAXIS b.v. P.O. Box 572, 2600 AN DELFT, The Netherlands, (2003).