ANSE DU PORTIER A MONACO : CALCULS DYNAMIQUE NON LINEAIRES POUR LA CONSTRUCTION DE LA PLATE-FORME.

ANSE DU PORTIER, MONACO : DYNAMIC CALCULATIONS FOR THE CONSTRUCTION OF THE EMBANKMENT

Fabien Borsellino¹, Luc Boutonnier², Alain Pecker³, Thibaut Perini⁴

1 Egis, Seyssins, France

2 Egis, Seyssins, France

3 Consultant, Paris, France

4 Bouygues Construction, Monaco

RÉSUMÉ – Dans le cadre de la réalisation de la plate-forme de l'Extension en Mer de Monaco au droit de l'Anse du Portier, des calculs temporels aux éléments finis en dynamique non linéaire ont permis de justifier la stabilité de la plate-forme dans l'extrémité nord du projet. Des calculs de colonnes de sol ont été réalisés selon les mêmes principes pour permettre d'analyser le potentiel de liquéfaction des sédiments.

ABSTRACT – For the construction of the Monaco offshore extension project, Anse du Portier district, dynamic calculations have be carried out. These calculations allowed for the justification of the north part stability of the project. Moreover, dynamic calculations on soil columns have been carried out to assess the liquefaction potential of the sediments.

1 Introduction

Dans le cadre de la réalisation de la plate-forme de l'Extension en Mer de Monaco au droit de l'Anse du Portier, de nombreuses problématiques géotechniques liées au séisme ont été traitées.

Pour la justification de la stabilité des ouvrages, les approches traditionnelles ont montré leurs limites. Afin de pallier cette faiblesse, des calculs temporels aux éléments finis en dynamique non linéaire (pour différents accélérogrammes) ont été implémentés au niveau de l'extrémité Nord du projet. La stabilité de la plate-forme a ainsi pu être démontrée en calculant les déplacements résiduels post séisme.

Pour l'examen du potentiel de liquéfaction des sédiments, sous plus de 15 m de couverture, des calculs aux éléments finis de type « colonne de sol » ont été réalisés. Dans cette configuration spécifique où les recommandations du NCEER ne sont plus adaptées, cette méthode a notamment permis de déterminer la valeur de la sollicitation sismique (CSR) à injecter dans les calculs

L'objectif est de présenter une synthèse des résultats de ces calculs en lien avec les dispositions constructives appliquées à la plate-forme de l'infrastructure maritime.

2 Présentation du projet.

Le projet s'étend depuis la côte sur 200m au maximum vers le large (sens Ouest-Est) et sur environ 400 m parallèlement à la côte (sens Nord-Sud). Sa superficie est d'environ six hectares. Une solution d'endiguement composée principalement de caissons sur assise est réalisée. Cette ceinture permet la réalisation du terre-plein sur lequel les superstructures seront construites sur pieux.



Figure 1. Description du projet.

Du point de vue géologique et géotechnique, les sols en place sont constitués de sédiments limoneux sableux à argileux, surmontant le substratum calcaire/marno-calcaire.

L'ouvrage se situe en zone de sismicité moyenne (aléa moyen, Magnitude 6). Aussi, le sujet de la liquéfaction représente un des enjeux majeurs du projet, notamment compte tenu de la présence des fondations profondes des superstructures à venir. Plusieurs techniques de traitement de sol ont été mises en place sur le projet :

- Vibrocompaction des remblais rapportés ;
- Traitement des sédiments par la réalisation de caissons en jet-grouting ;
- Traitement des sédiments par la réalisation de colonnes ballastées ;
- Traitement des sédiments par la réalisation de drains.

Les justifications des traitements de sol ne sont pas abordées dans cet article et seuls les deux sujets suivants sont présentés:

- La justification de la stabilité au grand glissement sous sollicitations sismiques de l'accroche au Larvotto;
- La détermination du coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction des sédiments.

3 Analyse de la liquéfaction des sédiments

Conformément aux règlements en vigueur, le coefficient de sécurité relatif à la liquéfaction est fonction :

- Du CRR : « Cyclic Resistance Ratio » pour un séisme de magnitude 7,5
- Du CSR : « Cyclic Stress Ratio »
- Du facteur correctif de la magnitude CM

Le calcul du coefficient de sécurité est le suivant : $FS = \frac{CRR_{7.5} CM}{CSR} \ge 1,25$ (1)

Avec
$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v}}$$
 et $\tau_{av} = 0.65 \alpha S \sigma_{v} r_{d}$

Plusieurs références permettent d'estimer la valeur du coefficient correctif en fonction de la profondeur r_d , tel que les recommandations du NCEER ou l'ouvrage « soil liquefaction during earthquakes » (Idriss et Boulanger, 2008).

(2)

Dans la présente configuration, compte tenu de la gamme de profondeur importante des sédiments (supérieures ou égales à 15-20 m), le calcul du CSR selon ces méthodes est hors de son domaine usuel de validité. De ce fait, des calculs numériques (éléments finis ou différences finies) sont nécessaires afin de calculer la sollicitation dans ces matériaux.

En ce qui concerne le CRR, celui-ci étant étalonné autant par des analyses in situ que des essais en laboratoire, il reste calculé selon la méthode NCEER, sur la base d'essais CPT.

Deux possibilités ont été envisagées pour déterminer le coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction :

- L'utilisation de lois de comportement classiques telle que la loi HSS (Hardening soil model with small-strain stiffness) ;
- L'utilisation de lois de comportement plus sophistiquées, permettant de simuler l'augmentation de pressions interstitielles sous l'effet des sollicitations cycliques, de manière à modéliser les déformations plastiques correspondantes, ainsi que la perte de résistance des sols, telles que les lois UBC3D ou équivalente.

Dans cette zone du projet, le choix de traitement de sol s'est porté sur une solution par dissipation des pressions interstitielles (solution drainage Seed-Booker). L'utilisation de la loi UBC3D permet bien de définir si la couche est liquéfiable ou non, mais elle ne permet pas de définir directement le nombre de cycles à partir duquel la liquéfaction est atteinte $(ru = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}} = 1)$.

Ainsi, par rapport aux enjeux du projet, le choix s'est porté sur la première solution (loi type HSS). Sur cette base, il est possible de définir :

- Le coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction et ainsi la nécessité, ou non, de traitement de sols ;
- Les entrants nécessaires au dimensionnement de ces traitements de sol, en reliant le coefficient de sécurité au nombre de cycles correspondant à la liquéfaction.

3.1 Principe général du calcul

Les calculs sont ainsi réalisés en utilisant un code de calculs aux éléments finis (Plaxis dans ce cas) en dynamique non linéaire avec résolution explicite dans le temps pour différents accélérogrammes temporels.

Le CSR est déterminé pour chaque accélérogramme en fonction de la profondeur :

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v}} = \frac{0.65\tau_{max}}{\sigma'_{v}}$$
(3)

Le principe général du calcul est le suivant :



Figure 2. Principe général du calcul.

Le calcul est réalisé en conditions non drainée. La loi de comportement retenue permet de prendre en compte :

- Le comportement hystérétique des sols ;
- Le critère de Mohr Coulomb ;
- Une courbe de premier chargement en cisaillement au profil hyperbolique de type Duncan et Chang (1970) ;
- La dépendance des modules de déformation à la contrainte ;
- La mobilisation de la dilatance à partir de l'angle de frottement critique (en fonction du déviateur) ;
- Des courbes d'amortissement et de dégradation du module de cisaillement adaptées au matériau.

Pour tous les sols, un amortissement numérique type Rayleigh est ajouté car les lois de comportement n'induisent aucune dissipation d'énergie aux très faibles déformations.

Les sols sont modélisés au travers d'une loi HSS. Pour cette loi, le module de cisaillement Gmax (donc E0) est introduit pour les calculs sous sollicitations sismiques.



Figure 3. Loi de comportement.

Une approche complémentaire au moyen du logiciel Shake a également été réalisée. Les résultats sont hors du domaine de validité du calcul compte tenu des niveaux de déformations calculés.

3.2 Paramètres des matériaux : sédiments et remblais

Les remblais rapportés constituant le terre-plein central sont essentiellement composés de matériaux graveleux de granulométrie 0/20 et 0/50 mm.

Afin de caractériser les matériaux vis-à-vis de la liquéfaction, des essais triaxiaux cycliques ont été réalisés. Ceux-ci ont été réalisés pour différentes gammes d'indice des vides et de pressions de confinement/amplitudes du déviateur.

La réalisation de ces essais a permis de construire la courbe reliant le nombre de cycles au CSR correspondant à l'apparition de la liquéfaction, selon une courbe CRR=a.N⁻



Figure 4. Analyse de la liquéfaction du remblai.

Ainsi, la réalisation des calculs dynamiques permet également de fixer le niveau de sollicitation dans le remblai et de conclure vis-à-vis du potentiel de liquéfaction de celui-ci.

Le nombre de cycles équivalent Neq, basé sur la magnitude du projet, a été déterminée selon les documents d'Idriss/Boulanger (Idriss et Boulanger, 2008) et Seed/Makdisi (Makdisi et Seed, 1978). Ce nombre de cycles, défini à Neq=6 à 8 sur le projet, permet de définir la sollicitation maximale admissible par le remblai.

En ce qui concerne le calage des paramètres dans ce matériau graveleux, une double approche a été réalisée :

- Approche bibliographique, sur la base des travaux de Menq (Menq, 2003) ;
- Approche sur la base d'essais en laboratoire.

Pour les essais de laboratoire, ceux-ci ont consisté en la réalisation :

- De bender elements, dont l'objectif est de déterminer la vitesse de cisaillement pour différents valeurs de pression de confinement ;
- D'essais triaxiaux cycliques en vue de déterminer les courbes de dégradation du module de cisaillement et les courbes d'amortissement.

Ces essais ont été réalisés pour différents indices des vides et différentes granulométries. Ils ont permis de caler la loi de comportement à retenir pour ces matériaux.



Figure 5. Lois de comportement dans les remblais.

En ce qui concerne les sédiments, le calage du paramètre Gmax, ainsi que les courbes d'amortissement et de dégradation du module de cisaillement, est essentiellement effectué sur la base de corrélations issues de la littérature.

Ces modules de cisaillement ont pu être contrôlés en cours de chantier avec des essais Cross Hole afin de s'assurer du bon calage des modules sur site.

3.3 Résultats des calculs

Les calculs sont réalisés sur une colonne de sol, en considérant une condition limite périodique sur les faces latérales (free field ou équivalent). Les accélérogrammes sont appliqués à un affleurement du substratum.

Pour ces calculs, 5 accélérogrammes ont été retenus. Ce choix est cohérent avec le guide de l'ASN. Sur cette base, la valeur de CSR retenue, à chaque profondeur, pour le calcul du coefficient de sécurité est alors :

 $CSR = Moyenne(CSR_{acc1}, CSR_{acc2}, CSR_{acc3}, CSR_{acc4}, CSR_{acc5})$ (4)

Les valeurs de cisaillement maximales sont récupérées au niveau des différents nœuds du modèle et la valeur du CSR est alors déterminée.



Figure 6. Cisaillement en fonction du temps (zoom pour un accélérogramme), colonne de sol.

Les résultats du calcul sont les suivants :



Figure 7. Coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction.

Les courbes de CSR en fonction de la profondeur permettent :

- De justifier la non liquéfaction du remblai rapporté (au moyen de la figure 4) ;
- De déterminer le coefficient de sécurité dans les sédiments •

Justification de la stabilité au grand glissement sous sollicitations sismigues de 4 l'accroche au Larvotto

Dans la partie nord du projet (hors zone de construction des villas), les calculs de stabilité traditionnels (au moven de la méthode de Bishop par exemple) ne permettent pas de justifier la stabilité sous séisme de non effondrement (avec et sans liquéfaction des sédiments).

Une approche de calcul en déplacements a donc été mise en œuvre, en respectant comme critères les recommandations du PIANC.

Ces recommandations permettent de quantifier, pour un niveau d'endommagement donné, les déplacements acceptables:



* d: residual horizontal displacement at the top of the wall; H: height of gravity wall.

Figure 8. Principes des recommandations du PIANC.

Pour cette vérification, deux lois de comportement ont été utilisées pour les calculs, réalisés sur le logiciel Plaxis :

- Loi HSS (Hardening soil model with small-strain stiffness) pour les remblais et sédiments non liquéfiables ;
- Loi UBC3D pour les sols dont la justification vis-à-vis de la liquéfaction n'est pas assurée (Fs<1.25 pour ce cas).

Dans cette configuration de faible hauteur de sols. la détermination des couches de sol liquéfiables a été réalisé au moyen d'une analyse NCEER classique. Le coefficient de sécurité a été calculé sur la base des sondages CPT, en prenant en compte les différents traitements de sol en place, dont la réalisation des colonnes ballastées avec un taux d'incorporation très élevé (25%).

Les sondages disponibles sont ceux effectués avant remblaiement. Une projection des paramètres de sols post-remblaiement a été réalisée. Les calculs de liquéfaction ont été réalisés en prenant en compte la présence du futur remblai (correction du calcul du CSR et du CRR).



Figure 9. Résultats des calculs.

5 Conclusions

L'utilisation de calculs dynamiques non linéaires a présenté un réel intérêt sur le projet. Ces calculs ont permis :

- D'apporter une justification en déplacements dans le cas où les méthodes traditionnelles atteignent leurs limites ;
- De déterminer le coefficient de sécurité et de justifier les traitements de sol à mettre en place, hors du domaine d'application usuel des recommandations du NCEER.

6 Références bibliographiques

Idriss I.M. and Boulanger R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquake, EERI Publication no MNO-12.

Menq, F.H. (2003). Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils

Makdisi, F. and Seed, H. (1978) Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations

Youd, T.L. and Idriss, I.M. (1998). « Liquefaction Resistance of Soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils ». Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering

CFMS – AFPS. (2012)« Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous action sismique », Association française du génie parasismique (AFPS), Comité français de mécanique des sols (, CFMS

Lunne, T. et al (2005). « Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice », E&FN Spon Krammer S. (1995). Geotechnical Earthquake Engineering

Notice Plaxis

PIANC/AIPCN (2001). Seismic design guide line fort port structures - WG34

Seed, Booker (1977). Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains.

Duncan, J.M., Chang, C.M. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils.

Guide de l'ASN. Prise en compte du risqué sismiques à la conception des ouvrages de génie civil d'installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme des déchets radioactifs