INTERACTION SOL – STRUCTURE SUR SOL GONFLANT : CAS DU RADIER DU SIEGE DES NATIONS UNIES A DIAMNIADIO - DAKAR

SOIL - STRUCTURE INTERACTION ON EXPANSIVE SOIL : CASE OF THE RAFT FOUNDATION OF THE UNITED NATIONS HEADQUATERS IN DIAMNIADIO - DAKAR

Abdou Xaadir GAYE¹, Alexandre BEAUSSIER², Cyril BORELY³, ¹ AGTS GROUPE, Dakar, Sénégal ² TERRASOL, FRANCE ³ TERRASOL, FRANCE

RÉSUMÉ – La prise en compte du gonflement comme déformation imposée dans le dimensionnement du radier, a permis d'apprécier l'évolution des déformations et sollicitations internes, dans le but qu'il soit en mesure d'absorber ses effets. Elle a entrainé une augmentation des sollicitations de 12 à 30%, avec toutefois, un dépassement considérable des rotations relatives. L'approche serait une alternative aux coûts élevés des fondations.

ABSTRACT – The taking into account of the swelling as a imposed deformation in the design of the raft, made it possible to appreciate the evolution of the deformations and internal stresses, with the aim that it is able to absorb its effects. It led to an increase in stresses of 12 to 30%, with, however, a considerable overshoot of the relative rotations. The approach would be an alternative to the high costs of foundations.

1. Introduction

Le pôle urbain de Diamniadio est en train d'être érigé sur des formations géologiques sujettes au phénomène du retrait-gonflement. Elles ont la particularité de causer des désordres structuraux sur les constructions lorsqu'aucune disposition particulière n'est prise. Les fondations sur radier sont posées généralement sur une couche de substitution accompagnée d'une batterie de dispositions constructives afin de maîtriser au mieux l'influence du climat sur les formations gonflantes.

La présente étude porte sur l'interaction radier - sol gonflant dans le cadre de la construction du siège des NU, la prise en compte du phénomène de gonflement comme déformation imposée dans le dimensionnement du radier en l'occurrence. Il sera question d'abord d'apprécier l'évolution des paramètres de dimensionnement du radier dans le but qu'il soit en mesure d'absorber les effets dus à la déformation imposée du sol, laquelle est causée par le gonflement, puis de proposer une solution sécuritaire pour une fondation en radier.

La prise en compte du gonflement dans le dimensionnement du radier objet de l'étude, a entraîné une augmentation des sollicitations maximales (moments) de 12% à 30%. Dès lors, il s'en suit une augmentation du volume de béton et du poids des armatures respectivement de 16 et 20%. Toutefois l'augmentation des rotations relatives d'environ quatre fois plus qu'en absence de gonflement a fait que le radier ne pouvait directement se fonder sur le sol gonflant sans dispositions constructives. Par ailleurs, l'étude montre que cette approche approfondie, apporterait dans certains cas, une alternative aux coûts élevés des fondations sur sols gonflants.

2. Les solutions actuelles de fondations sur Diamniadio

La lithologie rencontrée sur Diamniadio est composée d'une argile noirâtre molle à ferme de 0 à 3 m environ, en deçà de laquelle se trouve de la marne tendre et des marnocalcaires de 3 à 30 m voire plus. Parmi les solutions de fondation proposées, il existe:

2.1 Fondations superficielles de type semelles ou radier

Elles sont généralement posées sur une couche de substitution en graveleux latéritiques de 1 à 1,5 m d'épaisseur. Cette dernière n'est généralement pas évaluée sur une base théorique.



Figure 1. Méthodes de construction actuelles sur Diamniadio en fondations superficielles

La batterie de dispositions constructives devant accompagner la mise sur pied des fondations et ce, dans l'optique de protéger des variations climatiques le sol sujet au retrait-gonflement, rend fastidieux et onéreux leurs réalisations et suivis.

2.2 Fondations profondes de type pieux et micropieux

Ce type de fondation est souvent adopté pour s'affranchir de la zone à potentiel de gonflement très élevé. La disposition constructive spéciale dont on ne peut s'affranchir est la tenue d'un vide entre la semelle tête de pieux et le terrain naturel pouvant être sujet au phénomène du gonflement.

Cette technique permet de passer outre le strict respect d'une incommensurable liste de dispositions constructives permettant de se prémunir des variations climatiques. Elle reste toutefois assez dispendieuse.

3. Modélisation des fondations (radier) du siège des Nations Unies

3.1 Modèle de sol

En dessous, le schéma de la lithologie /modèle de sol ainsi que les hypothèses concernant les modules pressiométriques et coefficients rhéologiques.





Sur cette lithologie, il a été procédé :

- Excavation jusqu'à 7 m de profondeur ;
- Pose de 2 m de graveleux latéritique ;



Figure 3. Modèle sol-radier

Les caractéristiques mécaniques sont ci-dessous :

- Modèle de sol linéaire élastique;
- Module de Young E des sols calculés sur la base E= $2EM/\alpha$ adapté à des déformations dans le sol de l'ordre de 10^{-3} à 5.10^{-4} .
- Coefficient de poisson de 0,3 dans les marnes et calcaire marneux ;

3.2 Modèle structure

Conçu avec un maillage triangulaire de 6200 éléments et environ 3200 nœud, Le radier est composé de plusieurs zones de différentes épaisseurs. Ceci est pris en compte dans la modélisation, voir en dessous :





Figure 5 : surépaisseur du radier sous les poteaux

Les charges sont par la suite introduites, en ponctuelles et linéiques pour respectivement les poteaux et voiles. Le poids du radier est introduit en charge surfacique et correspond à : épaisseur x 25 kN/m³.

3.3 Résultats

3.3.1. Tassements et réactions



Figure 6 : tassement moyenné sur 5x5 m



n Figure 7 : réaction du sol moyenné sur 5x5 m

Les tassements sont de l'ordre centimétrique, environ 3 cm et les réactions de 10 à 270kPa.

3.3.2. Rotations totales et coefficients de réaction



Figure 8 : rotation totale



Figure 9 : Coefficient de réaction par zone

Nous avons trois zones de coefficient de réaction, illustrées dans la figure 8. Nous avons :

- Sur une bande de 2 à 3 m des extrémités kz = 15 MPa/m ;
- Sous les bâtiments kz = 8,5 MPa/m ;
- Les zones hors emprise bâtiments kz = 6 MPa/m ;

La superstructure n'a été modélisée que par ses charges en pied d'appui (encastré), appliquées directement sur le radier, le tout reposant sur le sol (sollicitations réelles) et sur ressorts surfaciques (sollicitations approchées) pour la détermination des coefficients de réaction. Au vu des rotations trouvées, inférieures à 1/500, cette approche de modélisation (niveau 0 de l'ISS) est acceptable au sens de l'EC2 NF EN 1992 – 1 – 1.

3.3.3. Moments dans le radier



Figure 10 : Moment MX

Figure 11 : Moment MY

Nous notons les moments maximaux en valeurs absolues : Mx=768 kN.m/m et My=991 kN.m/m.

4. Etude du radier avec prise en compte du gonflement des sols

4.1. Hypothèses

Coupes de calcul : sur la base des moments et des rotations observées, nous avons procédé à :

- Deux coupes sur le bâtiment nord dans les deux sens ;
- Une coupe globale traversant tout l'ouvrage pour prise en compte des différents niveaux de radier :



Figure 12 : Coupe sur les rotations



Figure 13 : Coupe sur les moments

La descente de charge initiale est utilisée mais moyennée sur 5 m de part et d'autre de l'axe de la coupe.

Couche soumise au gonflement de l'argile :

- Argiles et marnes;
- Dans le cas de l'étude, seuls les deux mètres de marnes sous la structure sont considérés



Figure 14 : Couche soumise au gonflement

Gonflement du sol :

Le gonflement du sol est donné par la formule : $u = HxR_g log\left(\frac{\sigma_g}{\sigma'_{rol}}\right)$ avec

- H= 2 m, l'épaisseur du terrain soumise au gonflement des argiles ;
- σ'_{sol} est la contrainte effective moyenne dans le sol après travaux, soit à la cote Z= - 8 m, il sera pris : $\sigma'_{sol} = \Delta \sigma' + 30 \, kPa$ où $\Delta \sigma'$ est l'incrément de charge à mihauteur de la couche de marnes provoqué par la descente de charge du bâtiment et 30 kPa est l'augmentation de contrainte effective sur 3 m d'épaisseur de terrain.
- **R**_g est le potentiel de gonflement provenant de la synthèse;
- σ_g est la pression de gonflement provenant de la synthèse.

4.2. Modélisation

Le calcul est réalisé à l'image d'un pieu soumis à un chargement latéral et une déformée libre du sol :

- Le pieu est ici représenté par le radier du bâtiment caractérisé par son inertie dépendant de l'épaisseur (analyse niveau 0 au sens de l'ISS);
- La descente de charge est introduite sous forme de charges ponctuelles et réparties transversales au pieu/radier ;
- Le coefficient de raideur ks est introduit en considérant une relation sol/radier linéaire ;
- Le gonflement du sol calculé est introduit sous forme d'une déformée libre g(z) du sol



Figure 15 : Illustration de de la déformation imposée au radier

Les réactions du sol sont alors récupérées, puis intégrées dans un modèle de calcul en charge souple (ici Tasseldo) afin d'en déduire la contrainte supplémentaire à mi- couche des marnes.



Figure 16 : Contraintes supplémentaires à mi- couche de la marne

- L'incrément de contrainte est utilisé pour recalculer le gonflement des marnes ;
- Ce gonflement est réintroduit dans le modèle ;
- La nouvelle réaction est ensuite introduite sous un modèle à charge souple ;

Ce processus est réitéré jusqu'à convergence (variation de la contrainte du sol \leq 5% entre deux itérations.

4. 3. Résultats

4.3.1. Moment dans le radier avant et après gonflement des sols



Figure 17 : Moment de la coupe 1





Figure 19 : Moment de la coupe 3





Figure 20 : Rotation du radier avec et sans gonflement

5. Conclusions

Une augmentation des moments de 12 à 30% est notée par endroit, pouvant conduire à des épaisseurs de radier de 60 à 70 cm (pour un μ_{bu} optimal de 0,15 et un fc28 du béton de 30 MPa) respectivement sans et avec gonflement, ce qui est acceptable et économique. Toutefois, la forte augmentation du tassement différentiel pouvant atteindre 1/125 par endroit n'est pas admissible, laissant présager de trop forts efforts dans la structure du bâtiment. Cette approche montre d'une part que l'épaisseur de la couche de substitution devrait être justifiée et d'autres part, dans certaines conditions, le radier pourrait être fondé directement sur le sol gonflant moyennant un rattrapage sur les épaisseurs de béton et le ferraillage.

Pour un certain niveau de tassement différentiel, l'influence des déformations du sol sur la structure doit être prise en compte dans un niveau 3 d'analyse au sens de l'interaction solstructure. La démarche de modélisation proposée en 4.2 consistant à une itération des charges jusqu'à une variation inférieure à 5%, pourrait approcher dans certains cas ce niveau 3 d'analyse.

6. Références bibliographiques

Cuira F., Simon B. (2008). Modélisation 3D simplifiée d'une plaque sur sol multicouche élastique ;

Afnor (2012) (NF P 94 – 261). Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations superficielles ;

Afnor (2005) (NF EN 1992 – 1 – 1). Calcul des structures en béton – Règles générales et règles pour les bâtiments ;

Afnor (1995) (XP P 94 – 091). Essai de gonflement à l'Œdomètre ;

Afnor (2005) (NF P18-711-1, NF EN 1992-1-1). Calcul des structures en bâtiments – Règles générales et règles pour les bâtiments ;

Terrasol (2015). Tasplaq – Manuel d'utilisation ;

Terrasol (2015). Tasseldo – Manuel d'utilisation ;

Terrasol (2015). Piecoef – Manuel d'utilisation ;

Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur – Lyon 2020