

## **TOUR OXYGENE A LYON – EVALUATION DES INTERACTIONS SOL-STRUCTURE POUR LE CHOIX DU MODE DE FONDATION**

### **TOUR OXYGENE IN LYON - ASSESSMENT OF SOIL-STRUCTURE INTERACTIONS FOR THE CHOICE OF FOUNDATIONS**

Eric ANTOINET<sup>1</sup>, Philippe BUSI<sup>2</sup> et François SABATIER<sup>3</sup>

1 ANTEA, Orléans, France

2 BOUYGUES Construction, Saint-Quentin-en-Yvelines, France

3 ANTEA, Lyon, France

**RÉSUMÉ** – Afin d'évaluer les possibilités de fonder superficiellement la tour Oxygène à Lyon Part-Dieu, un modèle numérique 3D d'interaction sol-structure a été mis en œuvre. L'article présente le choix des paramètres géotechniques et les hypothèses de modélisation de l'infrastructure ainsi que l'analyse des tassements absolus et différentiels qui a conduit, in fine, à retenir un mode de fondation profond.

**ABSTRACT** – A soil-structure interaction model has been built in order to estimate the feasibility of shallow foundations for the Tour Oxygène in Lyon. This paper presents the geotechnical parameters and the modeling hypothesis for the soil and the structure. The study of the absolute and differential settlements induced the choice of deep foundations.

### **1. Introduction**

SOGELYM-STEINER, maître d'ouvrage, assisté par KEPHREN, maître d'œuvre, ont confié la construction de la Tour Oxygène à Lyon Part-Dieu (69) à GFC Construction, filiale régionale de Bouygues Construction. Dans le cadre des études de conception de l'ouvrage et compte tenu des caractéristiques géotechniques globalement bonnes, un mode de fondation superficiel associant des radiers et des semelles isolées a été envisagé, en lieu et place des fondations profondes prévues initialement, afin d'optimiser le coût de celles-ci. Pour ce mode de fondation superficiel, le principal problème géotechnique à résoudre est la maîtrise des tassements, tant absolus que différentiels. En collaboration étroite avec le bureau d'études de Bouygues Bâtiment, ANTEA a réalisé un modèle 3D pour étudier les interactions entre le sol et les structures existantes et nouvelles. Cet article présente les principaux résultats géotechniques obtenus à l'issue de cette modélisation.

### **2. Description du projet**

Le projet de Tour Oxygène s'inscrit dans un milieu urbain dense. Le terrain a une superficie de 5 000 m<sup>2</sup>. Il est bordé au sud et à l'ouest par la station de métro Part-Dieu et par le centre commercial Part-Dieu. Les côtés nord et est sont respectivement bordés par la trémie routière Brotteaux-Servient et par le boulevard Vivier-Merle. Des images de synthèse de la figure 1 présentent le site dans son état actuel et futur (des vues plus complètes sont disponibles sur le site Internet [www.tour-oxygene.com](http://www.tour-oxygene.com)).



Figure 1. Vues de synthèse présentant le site dans son état actuel et futur

Comportant 4 niveaux de sous-sol dans la nappe, la fouille est protégée par une paroi moulée périphérique (épaisseur 0,82 m). Le bâtiment comportera un radier drainant, l'eau d'exhaure étant exploitée pour la géothermie (chauffage ou climatisation) avant réinjection dans la nappe.

### 3. Modèle géotechnique

#### 3.1. Informations géotechniques locales

7 sondages carottés et 3 sondages pressiométriques ont été réalisés au droit du site. Les sondages, menés jusqu'à 35 m de profondeur (~ 130 NGF), montrent une géologie régulière. En particulier, le toit des Molasses varie seulement de 3 m au droit des dix sondages (entre 144 et 147 NGF).

Du haut vers le bas, ont été observés :

- des remblais (sables et graviers, débris de brique, limons sableux), sur une épaisseur variable de 1 à 4 m,
- les Alluvions anciennes, constituées de sables et graviers plus ou moins riches en galets, sur une épaisseur de l'ordre de 20 m,
- des Molasses miocènes, constituées de sables fins jaunes, à rares graviers.

Les 8 essais d'identification physique (granulométrie) en laboratoire donnent :

$D_{max}$  : 3 à 14 mm, passant à 2 mm compris entre 92 et 97 %, passant à 80  $\mu$ m compris entre 3 et 15 %.

La base des Molasses n'a pas été recoupée par les sondages au droit de La Part-Dieu. A 1,5 km à l'ouest, les sondages pour le Pont de la Guillotière ont montré la présence des Conglomérats de base au-dessus du socle granitique.

Les histogrammes des modules pressiométriques  $E_M$  de la figure 2 caractérisent des distributions normales ou log normales. Les pressions limites nettes  $P_{LM}^*$  les plus fortes n'ont pu être mesurées, ce qui rend les histogrammes peu significatifs. On note cependant que les paramètres pressiométriques sont bons et globalement homogènes pour les deux horizons, Alluvions anciennes et Molasses miocènes.

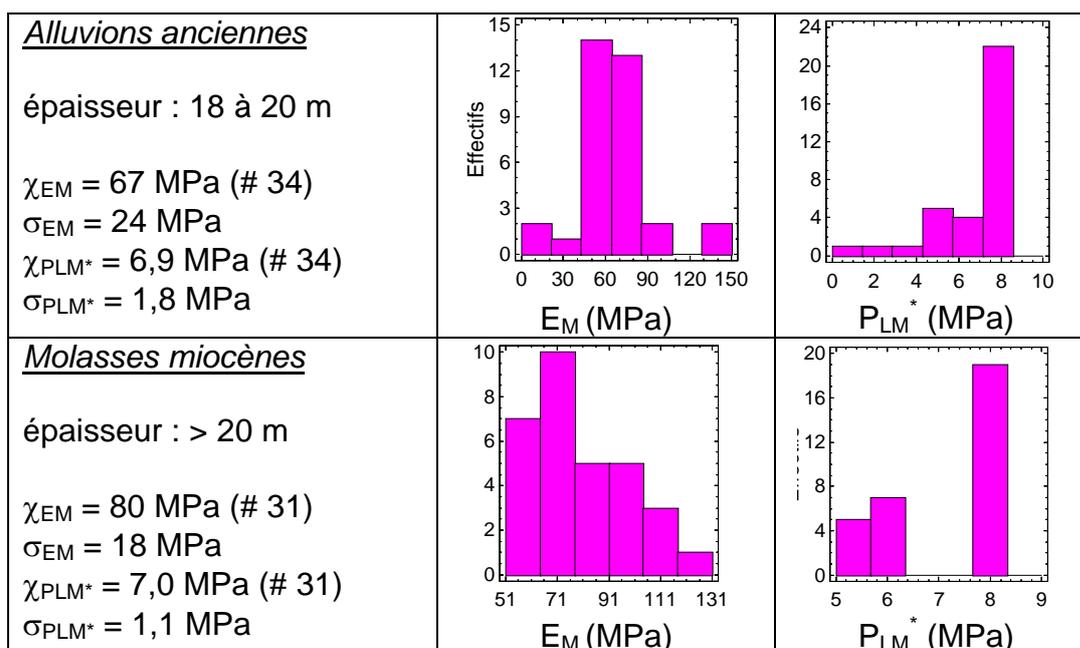


Figure 2. Histogramme des modules pressiométriques et pressions limites nettes

### 3.2. Informations géotechniques régionales

Des ouvrages fondés sur des radiers de grandes dimensions ont été construits à l'amont de Lyon à la fin des années 1970, sur l'horizon géologique des Molasses miocènes mais pour des faciès plus indurés que ceux du centre de Lyon. Les essais pressiométriques réalisés pour ces ouvrages ont donné un module pressiométrique moyen de l'ordre de 230 MPa. Les rétro-analyses des tassements mesurés sur une période d'environ 30 ans (~ 30 mm sous une charge moyenne de 0,45 MPa) ont permis de recalculer des modules d'élasticité du sol compris entre 500 et 700 MPa. En distinguant le module de 1<sup>er</sup> chargement  $E_i$  et le module de rechargement  $E_R$ , ces rétro-analyses ont conduit à retenir :  $E_i \sim 400 \text{ MPa}$  et  $E_R \sim 1600 \text{ MPa}$ .

### 3.3 Modèle géotechnique de calcul

Le module de déformation qui est le paramètre géotechnique fondamental pour l'estimation des tassements est en pratique délicat à évaluer (Combarieu, 2006). Pour prendre en compte le déchargement induit par le creusement de la fouille (contrainte effective en place de 160 kPa à la profondeur du fond de fouille), il a été défini un module de 1<sup>er</sup> chargement  $E_i$  égal à  $0,74 E_M/\alpha$ , avec  $\alpha = 1/3$ , et un module de rechargement  $E_R$  égal à  $3 E_i$ . Le modèle géotechnique de calcul des tassements est récapitulé dans le tableau I. Les terrains sont modélisés par un modèle élasto-plastique (loi d'écoulement de Mohr-Coulomb).

Tableau I. Modèle géotechnique de calcul des tassements

Lithologie	Toit NGF	Base NGF	$\gamma_h$ kN/m <sup>3</sup>	$E_i$ MPa	$E_R$ MPa	$\nu$	$\phi'$ °	$C'$ kPa	$\psi'$ °
Alluvions du Rhône	166	146	20	150	450	0,3	38	5	12
Molasses miocènes	146	100	20	180	540	0,3	38	10	12

### 3.4 Présentation du modèle numérique simulant les interactions sol-structures

La réalisation du modèle d'interaction sol-structure s'est imposée assez tardivement dans les études de conception de la tour. De facto, les possibilités d'adaptation des fondations suite à ces calculs étaient réduites. Le modèle de calcul d'interaction sol-structure devait répondre au double objectif :

- objectif 1 : estimer finement les tassements absolus et différentiels pour définir l'admissibilité technique de la solution « fondation superficielle »,
- objectif 2 : permettre d'« alimenter » les modèles numériques de calcul utilisés ultérieurement pour la justification de la structure de la tour : champs de déplacements sous les fondations (radier et semelles), coefficients de réaction horizontaux ou transversaux... Ce second objectif a conduit à choisir un modèle de complexité a priori supérieure à celle qui aurait été nécessaire à l'atteinte du seul premier objectif.

Le modèle 3D a été réalisé avec le logiciel FLAC<sup>3D</sup>, version 3.1, développé par ITASCA. Il simule :

1. l'initialisation de l'état de contraintes actuel (avec  $K_0 = 0,5$ ), en tenant compte de la présence des ouvrages adjacents (station de métro et centre commercial),
2. le creusement de la fouille avec le rabattement de la nappe en fond de fouille et soutènement par 2 lits de tirants,
3. la construction de l'infrastructure de la tour (4 niveaux de sous-sol et 2 niveaux intermédiaires).

Le poids de la tour en élévation et les efforts horizontaux dus au vent sont simulés par des efforts appliqués sur les voiles. La figure 3 montre le modèle numérique à la fin du creusement de la fouille.

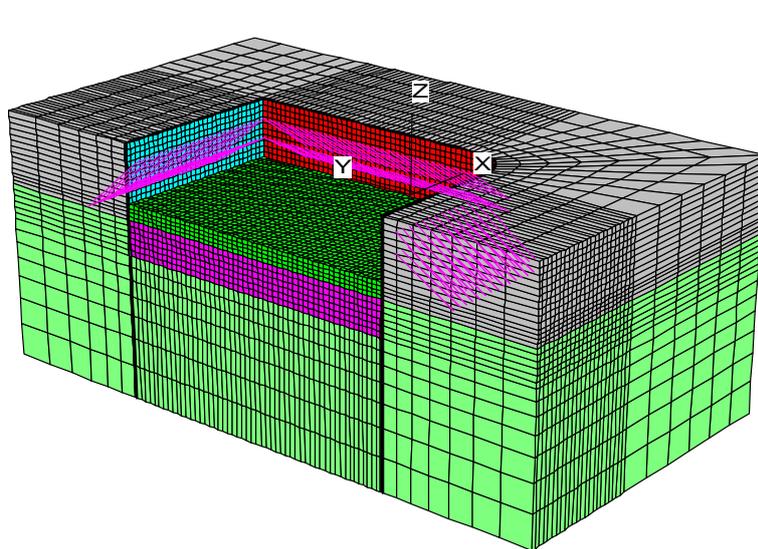


Figure 3. Vue de la moitié nord du modèle en fin d'excavation

A l'intérieur de la paroi moulée, l'infrastructure a été modélisée de façon à estimer au mieux les reports de charge sur les fondations induits par la raideur de la structure. Les 6 niveaux ont été modélisés, avec du bas vers le haut :

- sous le noyau de la tour : 3 radiers (épaisseur comprise entre 0,8 et 1,5 m) et 5 grandes semelles en périphérie (25 à 30 m<sup>2</sup>). 48 semelles isolées sont positionnées autour du noyau. La dimension des semelles isolées est adaptée de telle manière que la contrainte moyenne appliquée au sol aux ELS soit égale à 1 MPa. La figure 5 montre l'ensemble des fondations,
- les voiles du noyau, en distinguant les structures des niveaux -6 et -5, et des niveaux -4 à -1 (cf. figure 4). Les différentes épaisseurs de voiles (0,2 à 0,5 m) et certains linteaux ont été pris en compte,
- 9 poteaux descendus sur les 3 radiers, et un poteau (48 au total) au centre de chaque semelle isolée,
- 6 niveaux de planchers (épaisseur 0,3 m), liaisonnés à la paroi moulée périphérique.

Les éléments de structure sont liaisonnés rigidement entre eux (poteaux, voiles, planchers, semelles). Les planchers et la paroi moulée sont liaisonnés par des rotules. Les semelles sont séparées du sol par des éléments d'interface (frottement avec loi de type Mohr-Coulomb défini par l'angle de frottement et la cohésion).

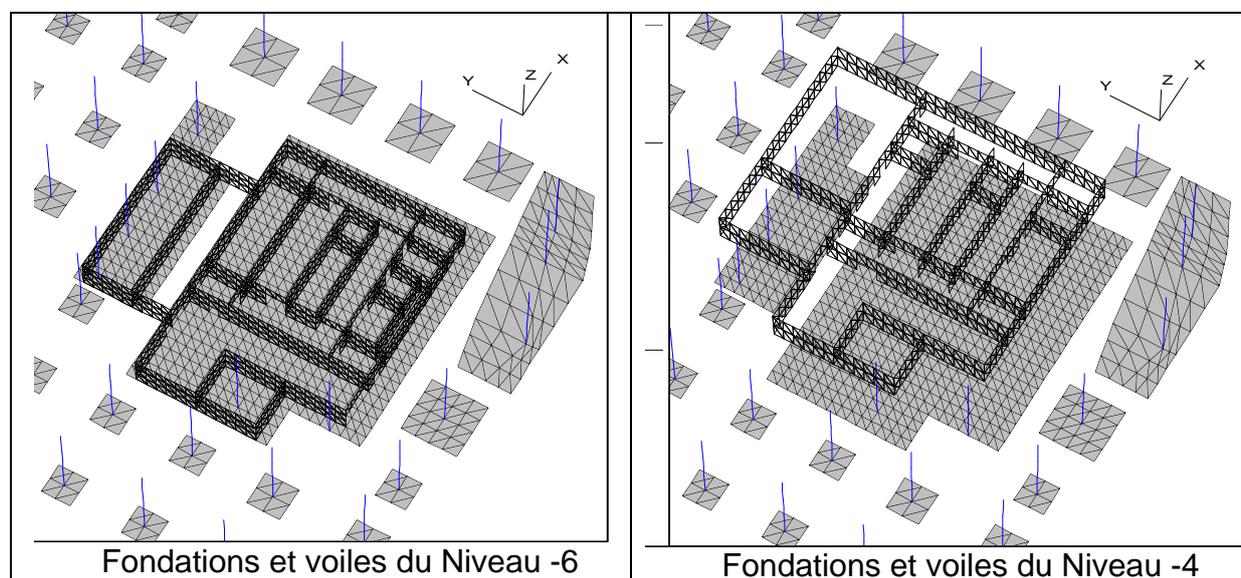


Figure 4. Fondations, poteaux et voiles pour les niveaux -6 et -4

Le poids propre de la tour est égal à 600 MN. La contrainte verticale à la sous face du radier principal atteint 0,8 MPa (contrainte admissible par rapport au prédimensionnement de conception). Les efforts ont été reportés à la base des voiles et des poteaux. Les efforts en tête de paroi moulée (angle côté tour) ont également été pris en compte (5 MPa). Le chargement comporte une dizaine de phases.

## 4. Résultats des calculs

### 4.1 Tassements à la fin de la construction

Le tassement maximal du radier de la tour à la fin de la construction est estimé à 8,3 cm avec les modules moyens définis dans le tableau I. La figure 5 présente les tassements des fondations et du sol support (seules les Alluvions anciennes en fond de fouille sont représentées). Ces calculs mettent en évidence l'effet d'entraînement

induit par les radiers de la tour sur les semelles environnantes : ces semelles ont un tassement de l'ordre de 4 cm alors que les semelles les plus lointaines, pourtant soumises à la même contrainte moyenne, ne tassent que de 1 cm. La paroi moulée tasse d'environ 2 cm dans l'angle de la tour. Les tassements induits sur les ouvrages adjacents sont de l'ordre de 1 cm.

Les tassements différentiels les plus importants sont localisés entre les deux radiers principaux et les semelles environnantes (liaison par le plancher). Entre les deux radiers qui sont liaisonnés par des voiles en béton armé, le tassement différentiel atteint 8 mm/m, ce qui n'est pas admissible (valeur maximale admissible de 2 mm/m aux ELS).

Un calcul complémentaire a été réalisé en appliquant les mêmes descentes de charge mais sans prendre en compte la rigidité de l'infrastructure. Les tassements maximum sont alors estimés à 9,1 cm (soit 10 % de plus que pour le modèle avec infrastructure). Les tassements différentiels sont par contre plus importants, avec un doublement ou plus des valeurs estimées. Les tassements différentiels entre les deux radiers atteignent alors 16 mm/m. Ceci justifie donc la prise en compte de l'infrastructure pour estimer précisément les tassements différentiels et le report de charge dans la structure, bien que le coût (temps pour élaborer les modèles et temps de calcul) en soit nettement plus élevé.

Compte tenu des caractéristiques mécaniques proches et peu dispersées (coefficient de variation de l'ordre de 20 à 30 %) entre les Alluvions et les Molasses, les tassements différentiels liés à la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques ne sont pas considérés comme importants et n'ont pas été pris en compte dans les calculs.

Le tassement différé dû au fluage des sables fins des Molasses n'est pas pris en compte directement dans les calculs. A partir des approches proposées par Schmertmann ou Burland et Burbidge (Frank, 1991 et 1994), le tassement différé à 50 ans pourrait atteindre 60 % du tassement à la fin de la construction. Les quatre radiers fondés sur les Molasses à l'amont de Lyon (cf. § 3.2.) permettent de nuancer ces valeurs : un seul présente un tassement de fluage représentant 10 % du tassement à la fin de la construction, pour une durée d'un peu plus de 20 ans. Comme les Molasses miocènes au droit de la Part-Dieu apparaissent moins résistantes, un tassement différé de 10 à 20 % a donc été retenu, soit un accroissement du tassement maximal de 8 à 15 mm.

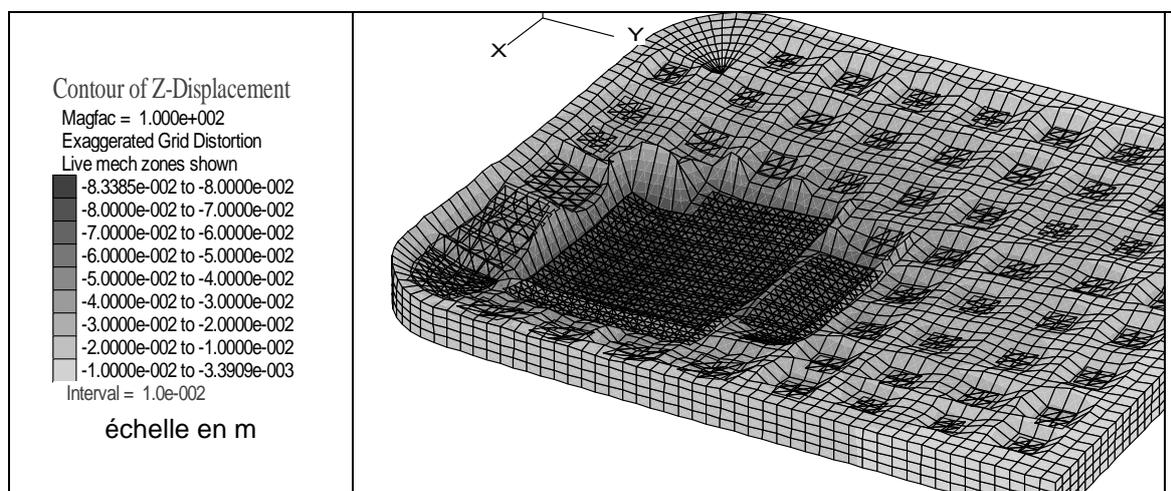


Figure 5. Tassements des radiers et des semelles environnantes, amplifiés 100 fois

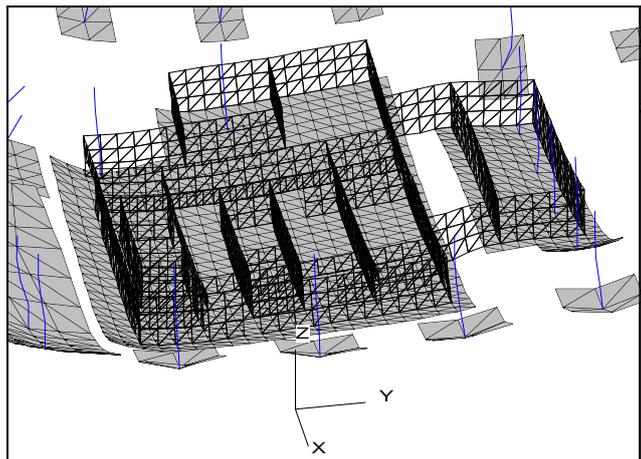


Figure 6. Déformation des éléments de structure (semelles, poteaux et voiles du niveau -6), amplifiée 100 fois

#### 4.2 Déformation et sollicitations de la paroi moulée pendant le creusement

La figure 7 montre la déformation (amplifiée 700 fois) de la paroi moulée à la fin de la construction. Compte tenu du butonnage important induit par les 6 niveaux de planchers, la partie supérieure de la paroi se déforme très peu au-dessus du niveau du fond de fouille. Au-dessous du fond de fouille, la paroi s'évase très largement sous l'effet de la poussée induite par le poids des radiers de la tour et de sa charge en tête. L'analyse des contraintes dans le béton de paroi moulée montre que des efforts de traction de l'ordre de 5 MPa sont générés à la base de la paroi dans l'angle côté tour, ce qui n'est pas réaliste dans le cas d'une paroi moulée sans continuité entre panneaux.

Un modèle complémentaire a été réalisé qui prend en compte les joints entre panneaux par des éléments d'interface dont la résistance est limitée à la résistance à la traction du béton. Ce modèle montre qu'une fissuration peut se produire au niveau des joints entre panneaux, avec le risque d'induire une augmentation du débit d'exhaure dans la fouille.

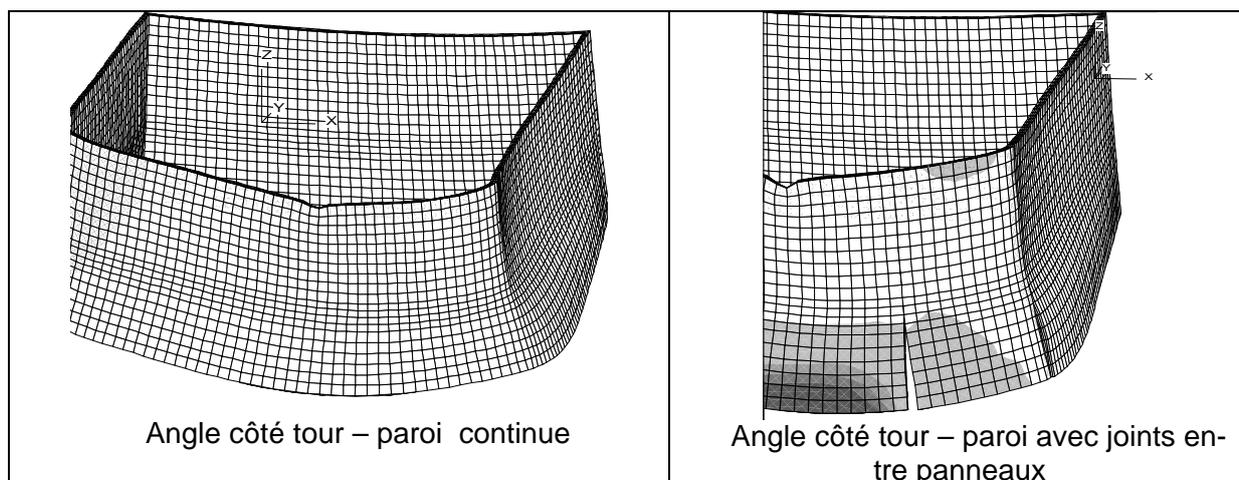


Figure 7. Déformation de la paroi moulée (avec ou sans joints entre panneaux)

## 5. Conclusions

Le modèle numérique 3D a permis d'évaluer le tassement maximal de la tour entre 8 cm (fin de construction) et 10 cm (avec prise en compte du comportement différé). Compte tenu de la présence de nombreux radiers et semelles, les tassements différentiels sont localement inacceptables pour l'infrastructure en béton armé ( $> 2$  mm/m aux ELS). Sur la base des résultats de ce modèle et compte tenu de l'impossibilité de reprendre aussi tardivement la conception de l'infrastructure de la tour, le risque de désordre a été jugé trop important et la solution de fondation sur radier abandonnée. Il a donc été retenu de fonder la tour sur un groupe de 50 barrettes (longueur 2,8 m, largeur 0,82 ou 0,92 m), fichées à la même cote que la paroi moulée (137 NGF). Le tassement du groupe de barrettes a été estimé à environ 3 cm à partir d'une approche couplant des modèles numériques et des modèles analytiques (Poulos et Davis, 1980).

De la réalisation de cette modélisation d'interaction sol-structure, on peut tirer les enseignements suivants :

1. les reconnaissances géotechniques doivent être adaptées afin de mieux caractériser les terrains aux besoins des modèles numériques : reconnaissances menées jusqu'au toit de l'horizon indéformable ou jusqu'à au moins 2 fois la largeur du radier. La déformabilité des terrains doit être mieux appréhendée, par exemple par la réalisation d'essais pressiométriques cycliques et des essais oedométriques avec mesure du fluage,
2. les échanges entre les ingénieurs de structure et géotechniciens doivent être plus précoces et plus intenses sur de tels projets. Ainsi, si les infrastructures avaient pu être modifiées et les descentes de charge adaptées à l'issue de ces calculs, les tassements absolus auraient peut-être pu être réduits entre 5 et 6 cm et les tassements différentiels ramenés dans une plage de valeur acceptable ( $< 2$  mm/m),
3. lors des études générales d'exécution, l'exploitation des résultats du modèle a conduit à l'ajustement de certaines rigidifications de structure pour minimiser les risques vis-à-vis des tassements différentiels. La zone de paroi moulée, particulièrement sollicitée, a été surmontée d'une poutre de couronnement renforcée et les panneaux de parois ont intégré des renforts d'armatures pour répondre aux sollicitations d'ensemble dans leur plan (effets « portiques » avec panneaux encastrés dans la poutre de couronnement),
4. l'infrastructure est réalisée avec des corrections de niveau de coulage jusqu'à +25 mm par rapport au niveau théorique, alors qu'en superstructure elles atteindront 40 mm pour prendre en compte également le fluage des structures verticales. Des essais de fluage du béton ont été réalisés et un suivi des déformations lors de la construction est mis en place, de façon à ajuster au besoin les corrections des niveaux de réalisation.

## 6. Références bibliographiques

- Combarieu O. (2006), L'usage des modules de déformation en géotechnique, Revue Française de Géotechnique, n° 114, 1<sup>er</sup> trimestre 2006
- Frank R. (1991), Déformations du sol et déplacements des structures, X CEMSTF, Volume III, Firenze, 1991, Italie, 1994, 1003-1030
- Frank R. (1994), Réflexions sur le tassement des fondations superficielles, XIII CIMSTF, New Delhi, Inde, 1994, 83-84
- Poulos H.G., Davis E.H. (1980), Pile foundation analysis and design, J. Wiley, New-York.