

# Conception, modélisation et auscultation d'une très grande excavation à Monaco

## Design, modelization and monitoring for a very large excavation in Monaco

Guilloux A., Porquet M.  
Terrasol, Paris France

De Lavernée P., Lyonnet P.  
Soletanche-Bachy, Rueil Malmaison, France

Roman P.  
Vinci Construction, Monaco

**RÉSUMÉ :** la construction d'une grande tour à Monaco, de 160 m de hauteur avec 10 niveaux de sous-sols et sur un terrain en forte pente, conduit à réaliser une excavation de 70 m de profondeur, dans un environnement très urbanisé. La communication présente les principes de conception de cet ouvrage exceptionnel, et notamment les modélisations numériques 3D mises en œuvre pour prédire les déformations de l'ouvrage et des avoisinants. On décrit ensuite le comportement de l'ouvrage pendant l'excavation, suivi selon les principes de la méthode observationnelle, ainsi que quelques adaptations rendues nécessaires au cours des travaux dans certaines parties d'ouvrage dont le comportement s'écartait des prévisions.

**ABSTRACT:** the construction of a high rise building in Monaco, of 160 m high with 10 basements levels and over a steep slope, required a 70 m deep excavation in an urbanized environment. The paper describes the main features of the design for this outstanding geotechnical structure, together with the 3D FE models developed for prediction of deformations of the retaining structures and the existing surrounding buildings. The actual behavior during the excavation, analyzed according to the principle of the observational method, will be described, as well as some changes in the work progress required in some areas due to a behavior somewhat different from the predictions.

**MOTS-CLES :** grande excavation, modélisation, auscultation, méthode observationnelle –

**KEYWORDS:** deep excavation, modelization, monitoring, observational method.

## 1 PRESENTATION

Le projet Odéon à Monaco consiste en la construction d'une tour de 160 m de hauteur sur un versant en forte pente et dans un contexte déjà fortement urbanisé. L'emprise du projet, la topographie, et la construction de 10 niveaux de sous-sol en infrastructures de la tour conduisent à réaliser un ouvrage de soutènement de très grande hauteur, environ 70 m, dont 35 m en parois berlinoises ancrées par tirants actifs et près de 40 m en paroi moulées butonnées par les planchers de sous-sols.

La géologie du site est constituée d'éboulis surmontant des marnes noires de qualité médiocre et des calcaires profonds. La tour elle-même repose sur des barrettes préfondées, permettant la construction selon la méthode « up and down », ancrées en moyenne à 50 m de profondeur sous le niveau du rez de chaussée.

Outre les dimensions tout à fait exceptionnelles de l'excavation, l'enjeu géotechnique majeur consistait à garantir des déplacements des ouvrages avoisinants existants inférieurs à 5 mm, et la méthode observationnelle était imposée pour garantir le succès de l'opération.

La communication présente :

- La conception globale du projet et le dimensionnement des divers éléments de soutènement et fondation ;
- Les modélisations numériques géotechniques 3D qui ont été élaborés à différents stades du projet, intégrant l'ensemble des fondations (parois moulées périmétriques et barrettes, planchers des sous sols) et des soutènements, y compris tirants et pieux des berlinoises, et reproduisant les phases de construction. Ces modèles ont globalement permis de valider les méthodes et phasages de construction ;
- Les performances réellement observées, notamment en termes de déplacements sur les avoisinants, qui ont dans l'ensemble confirmé les ordres de grandeur attendus.

Elle décrit également quelques adaptations du projet qui ont été mises en œuvre dans le cadre de la méthode observationnelle, et qui ont permis de gérer les situations où les déplacements observés sur des bâtiments avoisinants ont dépassés les seuils.

## 2 DESCRIPTION DU PROJET

### 2.1 L'ouvrage et son phasage de réalisation

La tour s'inscrit dans un talus naturel de pente moyenne 25°, qui doit être en conséquence rogné sur un dénivelé de plus de 40 m, entre la cote 110.0 NGM en amont et le niveau de la rue en aval à 67.0 NGM. Elle se compose de 2 parties en forme de pétales ayant respectivement 44 et 48 étages au-dessus d'un parking de 10 niveaux en sous-sol. L'ensemble est fondé sur une paroi moulée périphérique en forme d'auge vue en plan, et sur un réseau de barrettes intérieures. La paroi moulée est prolongée verticalement en superstructure par un voile pour épouser le versant sculpté en amphithéâtre, constituant un socle rigide dont le rôle est capital vis-à-vis de la reprise des efforts liés à la dissymétrie du site.

L'ouverture de la fouille se fait à l'abri de 3 soutènements étagés successifs (Figure 1) :

- Une microberloise de 15 m, avec micropieux  $\phi$  219 ayant une fiche de 8 m et espacés d'environ 1 m ;
- Une berlinoise de 20 m, avec pieux  $\phi$  1000 espacés de 2 m et ancrés d'en moyenne 12 m ;
- Et enfin la paroi moulée de 30 à 40 m de haut renforcée dans certaines zones par des contreforts.

Ces dispositions visent, au fur et à mesure du terrassement, à la constitution de plates-formes de travail de plus en plus larges pour l'utilisation d'un matériel de plus forte capacité permettant la mise en œuvre de soutènements de plus forte inertie.

Entre les cotes 110.0 NGM et 64.0 NGM, les berlinoises et la partie supérieure de la paroi moulée sont ancrées par 18 lignes de tirants de longueur maximum 42 m.

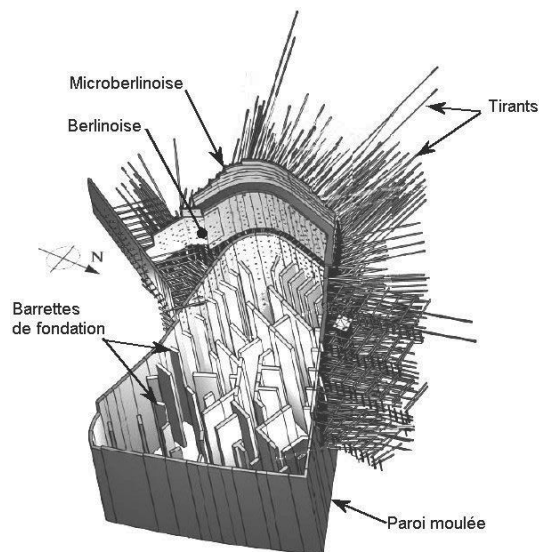


Figure 1 : Vue 3D des soutènements et fondations

À la cote 64.0/67.0 NGM, la dalle de couverture du parking est coulée, après quoi la construction de la tour en up & down peut débuter : il s'agit de construire simultanément la superstructure et l'infrastructure, à raison de trois étages de superstructure pour un niveau d'infrastructure en taube, la paroi moulée et ses contreforts prenant appui sur les dalles de sous-sols coulées à l'avancement et portées par les barrettes de fondations profondées.

## 2.2 Le contexte géotechnique

Géologiquement la structure tectonique régionale est complexe : l'ensemble du versant est constitué d'un système d'écaillés, et au droit du site on rencontre des marnes Cénomaniennes. Ces dernières, qui ont déjà été à l'origine de difficultés lors de la réalisation de grandes excavations à Monaco, constituent l'essentiel des terrains à excaver, avec localement un substratum calcaire, qui remonte à la faveur d'une faille. Notons que la faille du Larvotto se situe légèrement en aval du site.

Le site a fait l'objet d'une importante reconnaissance, avec environ 35 sondages, carottés, destructifs et pressiométriques, sur des profondeurs atteignant couramment 90 m, et jusqu'à 120 m. La Figure 2 montre une coupe transversale, mettant en évidence la couche de colluvions épaisse de 25 m en amont du site, puis les marnes du Cénomaniens, plus ou moins déstructurées, et localement les calcaires profonds.

On notera tout particulièrement la présence de niveaux décomprimés dans les marnes, mis en évidence par leur description sur carottes et par des modules pressiométriques très faibles (< 50 MPa), alors qu'ils sont de l'ordre de 200 à 300 MPa dans les marnes saines. Cette conséquence probable de la tectonique du site a été l'un des enjeux importants du projet de soutènement.

L'hydrogéologie montre une nappe de surface dans les éboulis, suivant la pente à 15-20 m sous le TN et une nappe captive en charge dans les calcaires profonds. Mais les capteurs de pression interstitielle dans les marnes montrent également des valeurs de pression correspondant à la nappe de surface, et ce au moins localement et temporairement : la conception du projet a du également tenir compte de ces fortes charges piézométriques.

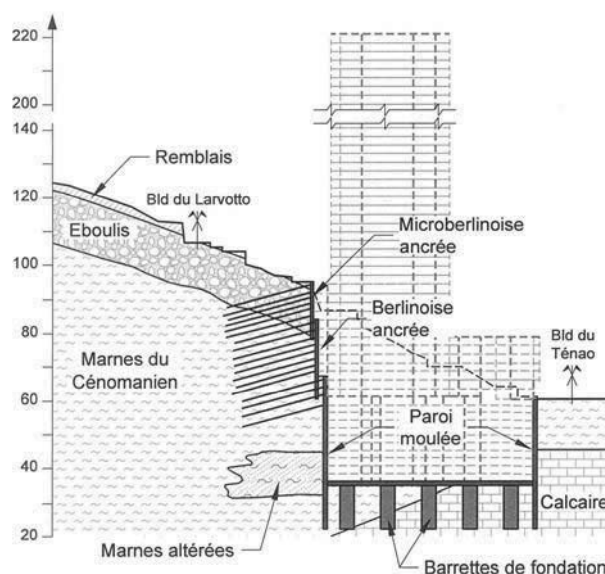


Figure 2 : Profil géologique et projet

## 2.3 La conception des soutènements et fondations

La hauteur importante de la tour, et les actions qui en résultent sur les fondations sous l'effet du vent et du séisme, ont nécessité une étroite liaison entre les études de la structure et des soutènements. En effet, la paroi moulée périphérique fonctionne à la fois comme soutènement des terres et comme fondation de la tour. Les effets de renversement sur la tour, notamment sous séisme, mettent en traction la paroi moulée amont. Par ailleurs, en phase de service, la tour doit être calculée sous l'hypothèse d'une détente des tirants des berlinoises, les massifs de terre s'appuyant directement sur le socle de la superstructure.

Pour ces diverses raisons, les soutènements ont fait l'objet de plusieurs vérifications. En phase d'excavation, ils ont été dimensionnés par la méthode classique des calculs au coefficient de réaction, complétée par des calculs de stabilité générale faisant intervenir la longueur des tirants. L'ensemble a été conduit selon des profils transversaux bidimensionnels, malgré le caractère fortement tridimensionnel du projet, conduisant à une approche a priori sécuritaire.

En phase de service, pour vérifier le comportement de la paroi moulée associée à la tour, un modèle 3D structurel des infrastructures a été élaboré, sur lequel ont été appliquées les poussées issues des calculs de soutènement au coefficient de réaction, et les actions propres à la tour (vent, séisme, charges verticales). Afin de prendre en compte l'effet des phases de terrassement sur les sollicitations finales dans la paroi moulée, il a été également introduit un cas de charge élémentaire représentant le décalage de moment et d'effort tranchant dans la paroi entre un calcul phasé et un calcul non phasé négligeant les terrassements. Le modèle de l'infrastructure ainsi étudiée fournit les cartographies d'armatures à prendre en compte dans le dessin des cages de paroi moulée et conduit à un dimensionnement rigoureux et optimum.

La méthodologie de construction de la tour en up & down permet d'assurer la stabilité générale et de maîtriser au mieux les modifications de contraintes dans le massif. En effet :

- En phase de terrassement, le poids de la tour compense partiellement le poids des terres excavées qui sont stabilisatrices vis-à-vis des cercles de grand glissement ;
- Les tassements se produisent au fur et à mesure de la construction et sont compensés par le soulèvement du fond de fouille.

Enfin, malgré le caractère de roche tendre des terrains, un clouage vertical en fibres de verre a été nécessaire devant la paroi moulée amont, afin d'améliorer la butée mobilisable lors des dernières passes de terrassement où la paroi est soumise à

une poussée approchant les 1000 kPa dans les zones de marnes altérées.

### 3 LES MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

#### 3.1 Modélisation 3D globale sous CESAR 3D

Après un premier modèle géotechnique tridimensionnel réalisé par Coyne et Bellier dans le cadre des études de conception, nous avons conduit, dès le démarrage des études d'exécution, une nouvelle modélisation géotechnique 3D de l'ensemble du projet, intégrant les interfaces géologiques, les avoisinants existants et les nouvelles infrastructures, réalisée avec CESAR 3D v5. Le modèle (Figure 5) comporte 57 phases de calcul reproduisant toutes les étapes des travaux depuis l'excavation des premières plateformes jusqu'à l'application des charges de superstructures sur les barrettes de fondations.

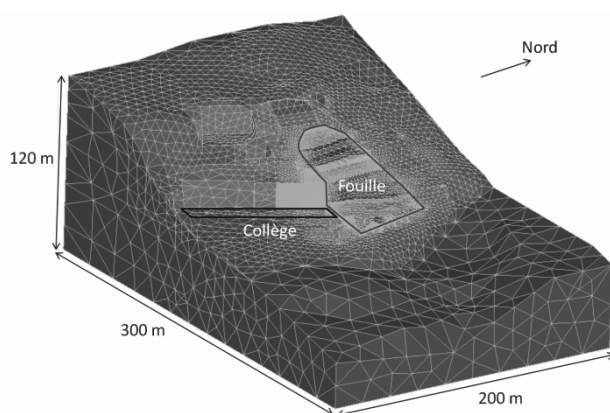


Figure 3 : Vue du modèle 3D général

Les résultats mettent en évidence l'effet de voûte lié à la forme de l'excavation et conduisent à des déplacements des avoisinants de l'ordre de 5 mm en déplacement horizontal, et presque toujours inférieurs à 5 mm en soulèvement. Les déplacements calculés les plus importants sont situés près du collège Charles III.

#### 3.2 Modélisation 3D locale sous Plaxis 3D

Suite à un changement de méthode pour réaliser les soutènements au niveau du collège, un autre calcul centré sur ce bâtiment a été réalisé avec Plaxis 3D. Ce modèle « simplifié » (Figure 4) ne comprend que les structures existantes du collège, la variante de soutènement, et une moitié de l'excavation principale. La stabilité de l'ensemble est assurée par les conditions aux limites, et l'effet de voûte est reproduit par une surcharge à l'arrière du modèle.

Les déplacements calculés restent comparables à ceux obtenus précédemment et montrent que la nouvelle solution de soutènement garantit bien la stabilité de l'ensemble.

#### 3.3 Apport des modélisations

Ces modélisations 3D ont permis la prise en compte des effets 3D tels que l'effet de voûte et la validation de systèmes de soutènement complexes, notamment vis-à-vis des déplacements des structures et des avoisinants. Le comportement fortement 3D de l'ouvrage est bien mis en évidence, avec notamment des déplacements des soutènements de l'ordre de 10 mm au maximum, très inférieurs aux 30 mm évalués par les calculs 2D au modules de réaction.

En outre, une approche de la stabilité générale a pu être conduite sur la base du modèle global, en affectant les paramètres de résistance au cisaillement des terrains de coefficients réducteurs partiels, et en vérifiant l'équilibre numérique du modèle avec ses caractéristiques réduites.

## 4 L'APPLICATION DE LA MÉTHODE OBSERVATIONNELLE

### 4.1 Auscultation mise en œuvre

L'auscultation de l'ouvrage et de ses avoisinants est organisée selon 10 profils verticaux (3 à l'amont côté ouest, 3 côté collège au sud, 2 côté Nord et 2 à l'aval côté Est) tel qu'illustré sur Figure 4. Sur chacun de ces profils, les différents instruments de mesures permettent de recouper les informations.



Figure 4 : Vue en plan du projet et des profils d'auscultation

La mise en place du dispositif d'auscultation de l'ouvrage et de ses avoisinants s'est faite de manière progressive :

- En premier lieu, dès le début des travaux, les avoisinants (villas et immeubles aux alentours, collège Charles III, paroi moulée amont du collège) ont été équipés de cibles topographiques ; des inclinomètres profonds ont été réalisés dans le terrain (jusqu'à 80 m de profondeur) à l'amont et autour de l'emprise de la future fouille, et une dizaine de piézomètres a également été réalisée tout autour de la fouille ;
- Puis les ouvrages ont été équipés au fur et à mesure de la réalisation : mise en place d'inclinomètres noyés dans les micropieux, pieux et paroi moulée, de cibles topographiques, d'extensomètres de forages, de cellules dynamométriques en tête de tirants, ainsi que de jauges de contraintes dans les barrettes et certaines dalles. L'auscultation des avoisinants a également été renforcée tout au long du chantier avec l'ajout de cibles complémentaires et de fissuromètres dans les zones ayant subi des déplacements au cours de travaux.

Pour les profils les plus hauts côté amont, 3 séries d'inclinomètres sont placées en recouvrement relatif sur la microberlinoise, la berlinoise et la paroi-moulée, de façon à reconstituer un profil inclinométrique complet intéressant les divers soutènements. Ils sont également équipés d'environ 7 cellules de charges sur les têtes de tirants, réparties sur les 18 lits.

Les cibles topographiques sont elles aussi disposées le long des profils à raison d'une cible toutes les 2 passes de terrassement soit environ une cible tous les 5 mètres, avec une cible en tête de chaque ouvrage.

Les extensomètres de forage sont pour certains ancrés à une profondeur de 60 m à l'arrière du soutènement, au-delà des tirants les plus longs, avec une ancre tous les 10 m.

Inévitablement un certain nombre d'instruments situés dans le terrain à l'amont du projet a été détruit au moment de la réalisation des tirants de la berlinoise, et a dû être remplacé. C'est notamment le cas des piézomètres, qui ont été remplacés le plus souvent par des capteurs de pression interstitielle.

#### 4.2 Choix des seuils

La limite admissible de déplacements des immeubles mitoyens a été fixée contractuellement à 5 mm, avec un seuil d’alerte à 3 mm.

Vis-à-vis des soutènements eux-mêmes, le contrat spécifiait uniquement des critères de déplacements pour le dimensionnement selon la méthode de calcul au coefficient de réaction (calcul 2D) :

- 30 mm pour les parois non joutées par des immeubles ;
- 15 mm pour les points situés à plus de 10 m des fondations des immeubles ;
- 3 à 10 mm pour les points entre 5 et 10 m de ces fondations ;
- 3 mm pour les points situés à moins de 5 m des fondations.

Il faut souligner que les déplacements calculés par les méthodes aux éléments finis (3D) sont largement inférieurs à ceux obtenus par les méthodes 2D.

### 5 LE COMPORTEMENT EN COURS DE TRAVAUX

#### 5.1 En zone courante

On notera tout d’abord que la précision du théodolite automatique est tout à fait remarquable : avec une mesure toutes les trois heures, la précision obtenue est de l’ordre de +/- 0,5 mm, comme cela apparait sur les courbes de suivi topographique. De même la précision des extensomètres de forage est tout aussi remarquable : +/- 0,1 mm. Seule la précision des inclinomètres est plus aléatoire : il apparait que celle-ci dépend fortement de la qualité du scellement, en relation avec la qualité des terrains trouvés et bien sûr de la hauteur de l’inclinomètre. Un post-traitement de type correction de pied, ou autre, améliore nettement la fiabilité des résultats.

En vue de l’analyse des mesures, le Bureau d’Etudes avait transmis, pour les profils types, les courbes de déplacements calculés phase par phase, pour comparaison avec les mesures inclinométriques.

Les mesures montrent, notamment en zone amont, des déplacements inclinométriques de la paroi moulée de quelques millimètres, nettement plus faibles que ceux calculés avec la méthode au coefficient de réaction en 2D, qui atteignaient 10 à 15 mm dans cette zone (Figure 5).

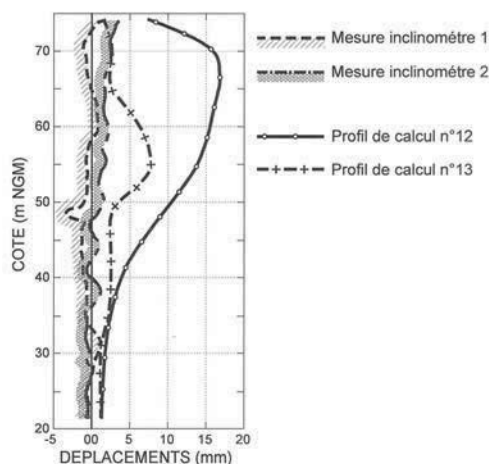


Figure 5 : déplacements calculés et mesurés des parois

Ceci était prévisible, comme le montraient les résultats des calculs numériques 3D, du fait de la géométrie de la fouille beaucoup plus haute que large, qui favorise la formation de voûtes de décharge horizontales, réduisant ainsi la poussée effective sur le soutènement.

D’une façon générale, on peut souligner que les déplacements maximaux  $\delta$  des parois de soutènement restent de l’ordre de 10 mm au maximum, ce qui est remarquable pour un soutènement de hauteur totale  $H = 70$  m :  $\delta/H \approx 0.15/1000^\circ$ .

#### 5.2 Exemple d’écarts par rapport au modèle et adaptations du projet

D’une façon générale, il n’a été constaté que peu d’écarts significatifs entre le comportement observé et les prévisions de déplacements fournies par les calculs.

Les premiers écarts l’ont été dès le début du chantier, lors de la foration des premiers tirants dans les éboulis qui ont conduit à des déplacements centimétriques, dépassant les seuils, sur certains avoisinants. Ces premiers mouvements, attribués à l’effet de la foration et du scellement des tirants dans les éboulis, nous ont conduits à adapter la méthode de forage : abandon des forages à l’air en faveur de méthodes au tricône sous coulis, et forage « Sonic ».

Ainsi, pour la villa Bataglia, située au nord-ouest du projet et qui avait subi des déplacements allant jusqu’à 14 mm, nous avons été conduits à réaliser un soutènement spécifique en aval de la villa : longrines en béton armé de 1 m de haut sur deux niveaux, ancrées par 8 tirants de 15 m de long scellés dans les éboulis, et 3 tirants de 21 m dans les marnes. Ce soutènement a permis d’éviter l’évolution des mouvements jusqu’à la fin des travaux de perforation et d’injection de coulis dans cette zone. A ce jour, soit environ un an et demi après ces travaux, plus aucun déplacement complémentaire n’a été observé.

Un autre écart de comportement structurel a pu être constaté, cette fois-ci sur l’ouvrage en construction : dans la zone située au droit du collège, la paroi moulée se trouvait localement en console maintenue par trois lits de tirants, après un terrassement de 7 m pour le coulage de la dalle RDC. Les déplacements mesurés en tête de la paroi moulée ont atteint 13 mm, supérieurs aux déplacements calculés. Le bureau d’études a alors lancé une rétro-analyse, qui a montré que ces mouvements pouvaient être attribués à une « surcharge » résultant de l’accumulation d’eau derrière la paroi, en relation avec les venues d’eau rencontrées lors de la foration de certains tirants.

Nous avons donc réalisé des drains complémentaires et trois tirants d’ancrages supplémentaires. Lors de la foration des drains complémentaires, il a été constaté un fort débit pendant les premiers jours et une atténuation par la suite. Ce dispositif a permis de stopper les déplacements, en attendant le butonnage par la réalisation des planchers correspondants.

### 6 CONCLUSION

Cet ouvrage, exceptionnel par sa hauteur (70 m de soutènement) et par son environnement imposant des contraintes très strictes de déplacements, a pu être mené à bien grâce à une conception d’origine adaptée, notamment par sa géométrie en voûte et par la méthode de construction en « Top & Down », et par des études alliant des approches traditionnelles négligeant tout effet tridimensionnel, et des modélisations numériques 3D permettant d’évaluer les effets bénéfiques de cette géométrie en reproduisant tous les éléments de soutènement et d’infrastructure et le phasage détaillé de l’opération.

Mais tout autant que la conception, c’est le suivi rigoureux du chantier, conduit selon les principes de la méthode observationnelle, qui a permis d’atteindre les performances attendues (déplacement horizontal en tête de l’ordre de  $0.15/1000^\circ$  de la hauteur), et de traiter à temps les rares, mais inévitables, anomalies de comportement local.

### 7 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient : le Maître d’Ouvrage : Groupe Marzocco, la Maîtrise d’œuvre générale : Cabinet d’Architecte GIRALDI, le Bureau d’Etudes Structure : Coyne et Bellier, le Bureau de contrôle : SOCOTEC, et le Bureau d’Etudes Géotechnique : E&G.