

LA TOUR MAJUNGA A PARIS LA DEFENSE

THE MAJUNGA TOWER IN PARIS - LA DEFENSE

Evelyne OSMANI

Directeur du bureau d'Etudes Structures d'Eiffage Construction
Director Structural Design Department of Eiffage Construction

LE PROJET

Le projet de la Tour Majunga s'inscrit dans le Plan Renouveau du quartier de la Défense qui vise notamment la construction de nouvelles tours écologiques et architecturalement innovantes.

Conçue par l'architecte Jean-Paul Viguier pour le compte d'Unibail-Rodamco, la Tour Majunga est constituée de jeux de plans, d'obliques et de contre obliques inspirés des paysages de montagnes (**figure 1**), bien que son nom de code soit celui d'une ville balnéaire de Madagascar.

La végétalisation est présente sur toute la hauteur de la Tour autant que les niveaux de végétation en montagne.

Enfin les performances énergétiques sont ambitieuses puisque les labels HQE et BREEAM sont recherchés. Réalisé dans une fouille unique et sur une fondation continue, le projet de la Tour Majunga se décompose en plusieurs parties (**figure 2**).

- la partie principale est la zone « Tour » : elle comporte 2 niveaux enterrés, 5 niveaux de médiastructure et 43 niveaux de superstructure
- les locaux techniques comptent 2 niveaux de sous-sol et s'élèvent en R+1 à R+3
- l'aire de livraison est en R+2

Les 8 niveaux inférieurs constituent le socle de la Tour.

THE PROJECT

The Majunga tower project is part of the Renewal Plan of La Defense area, which especially expects the erection of new ecological towers with innovative design.

*Designed by architect Jean-Paul Viguier on behalf of Unibail-Rodamco, the Majunga tower is made up of a set of planes, obliques and counterobliques inspired by mountain landscapes (**figure 1**), despite the fact that its name is the one of a seaside town in Madagascar.*

Vegetation is present at each level, high up to the top of the tower, as well as vegetation levels in the mountain.

At last, energy performances are outstanding, searching for HQE and BREEAM labels.

*Erected in a single excavation and built on a continuous foundation, the tower Majunga project may be divided in several parts (**figure 2**)*

- *the main part is the tower area, including 2 underground levels, 5 mediastructure levels and 43 superstructure levels*
- *the technical levels are designed with 2 underground levels and rise up to GF+1 or GF+3*
- *the delivery area rises up to GF+2*

The 8 lower levels form the base course of the Tower.



Architecte : J-P. VIGUIER

Figure 1.

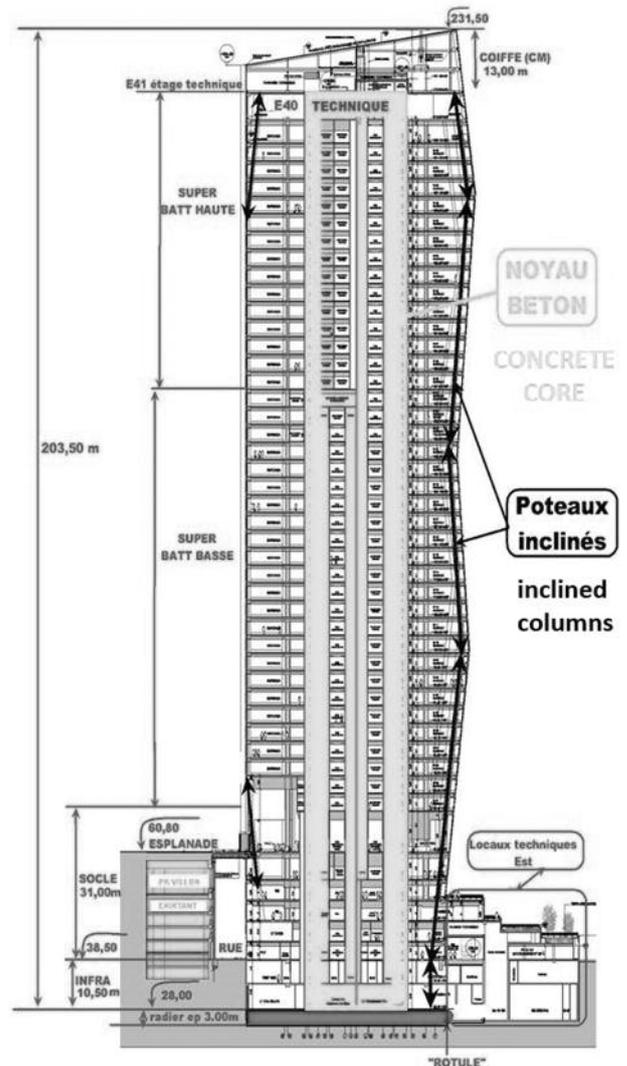


Figure 2.

L'emprise du chantier est extrêmement étroite et entourée d'immeubles de bureaux et de logements dont le plus élevé, la Tour Ariane, a été érigé par Eiffage Construction en 1975 (figure 3).

La surface totale de plancher atteint 92.500 m².

Les principales quantités de matière constituant la structure en béton armé sont les suivantes :

- 48.000 m³ de béton
- 6.500 t d'aciers

Le béton a été coulé en place par pompage à l'aide de 2 colonnes et d'un mât de bétonnage. Seules des retombées de poutres évidées et les volées des radiers ont été préfabriquées.

En termes de résistances caractéristiques, les bétons utilisés sont du C40/47 dans le radier de fondation, du C80/95 dans les poteaux verticaux et inclinés et de C40/47 à C60/70 dans les murs du noyau de contreventement.

Deux grues à tour ont été montées pour assurer l'approvisionnement en ferrailage, le déplacement des coffrages des poteaux intérieurs et des talons de poutres.

The site area is extremely narrow and surrounded by office and housing buildings, the highest of which, Ariane tower, was erected by Eiffage Construction in 1975 (figure 3).

The total floor area reaches 92, 500m².

The main quantities of materials involved in the reinforced concrete structure are the following ones:

- 4,800 m³ of concrete
- 6,500 t of reinforcing bars

The concrete has been cast in situ by pumping by mean of 2 concreting pipes and 1 concreting pole. Only the under slab parts of beams and flights of stairs were pre-cast.

In terms of characteristics resistances, the concrete provided are C40/47 in the foundation raft, C80/95 in the vertical and tilted columns, and from C40/47 to C60/70 in the core walls.

Two tower cranes were erected to supply all the reinforcement precast units and the other components in elevation floors, and to remove the interior columns formwork from part to part.

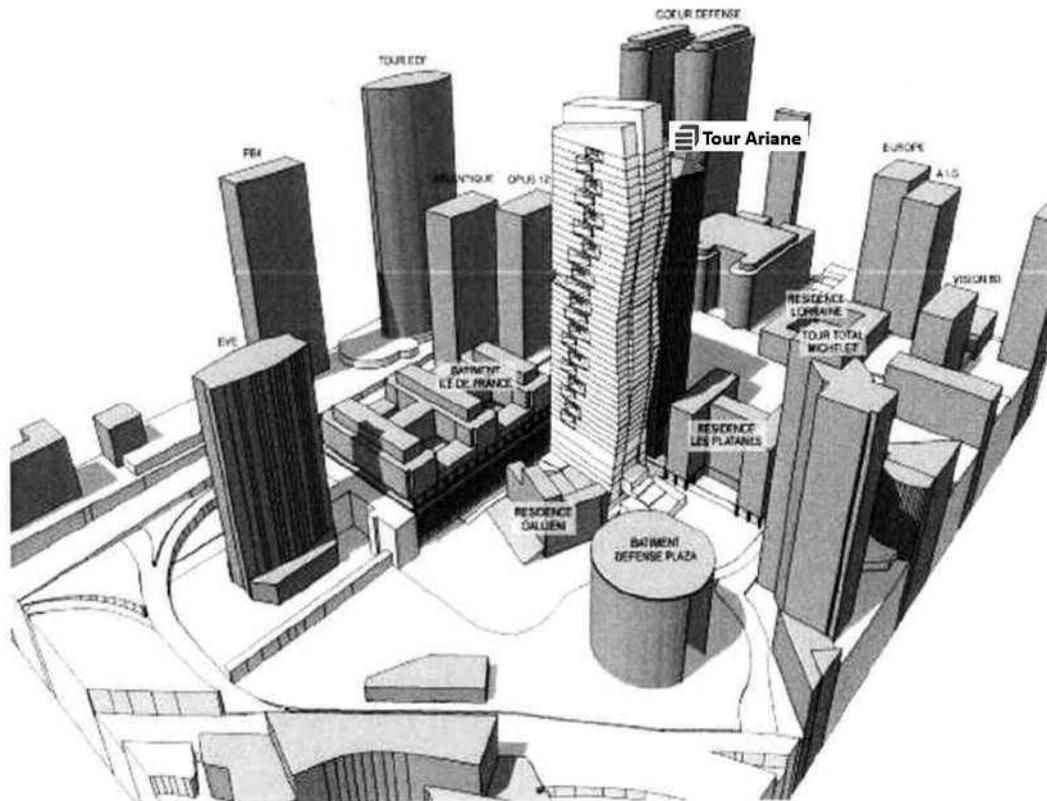


Figure 3.

Trois lifts extérieurs et un jump lift ont été utilisés pour assurer l’approvisionnement des divers composants ainsi que la circulation des ouvriers.

La durée de construction est de 3 ans, sur la base d’un niveau « courant » par semaine en allure de croisière de construction.

Le travail de nuit est interdit à cause des immeubles d’habitation très proches.

Le noyau a été, dès que possible, coulé par plots à l’aide de coffrages auto grimpants. Enfin un outil coffrant a été mis au point pour, en une levée, former le coffrage des poteaux et des poutres de façade tout en assurant la sécurité des ouvriers par ses passerelles consoles intégrées.

Le noyau était en avance de 4 à 5 niveaux sur le reste de la structure (figure 4).

Les 6000 m³ de béton du radier ont été coulés en 5 plots sans joint définitif.

LA SUPERSTRUCTURE

Un plancher « courant » est montré en figure 5.

En réalité, l’inclinaison variable des poteaux gomme l’impression d’étage courant ; ils sont tous différents, et les loggias et balcons contribuent aussi à leurs différences.

La structure est conçue en béton armé majoritairement coulé en place (murs, poteaux, planchers, certaines poutres et clavetages des poutres).

Elle comporte un noyau de contreventement intégrant tous les locaux communs (ascenseurs, escaliers et leurs sas, sanitaires, locaux techniques et gaines verticales).

Three outside lifts and one jump lift were provided for components supplies and for site men use.

The duration of construction progresses over 3 years, on the basis of the execution each week of a “current” level, during the cruising construction speed. No night work was authorized because of the very close housing buildings.

The core was, as soon as possible, built in separate blocks by means of self-climbing formwork.

At last, a self-climbing formwork tool was designed so that, in one lifting, the formwork of façade columns and beams might be ready for reinforcing and concreting the façade framework, providing the site men’s security with the cantilever foot walk connected to the formwork tool.

The core execution took place 4 to 5 levels earlier than the remaining part of the structure (figure 4).

The 6,000 m³ of the foundation raft concrete were cast in 5 times, without definitive joint.

THE SUPERSTRUCTURE

A “current” floor is shown on figure 5.

In reality, the variable tilt of columns erases the appearance of current floor: they are all different, and the loggias and balconies contribute a bit to their differences.

The structure is designed with reinforced concrete, mostly cast in situ (walls, columns, slabs, part of beams and key-work of beams).

It is composed with a wind bracing core including the common parts (lifts, staircases and their airlocks, restrooms, technical rooms and shafts).

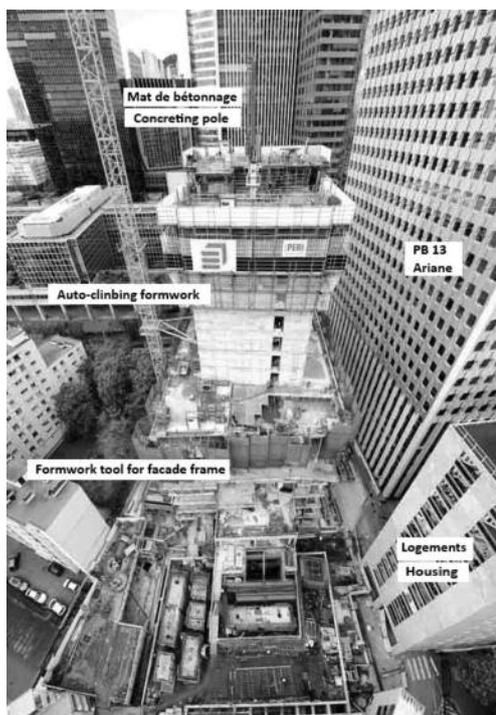


Figure 4.

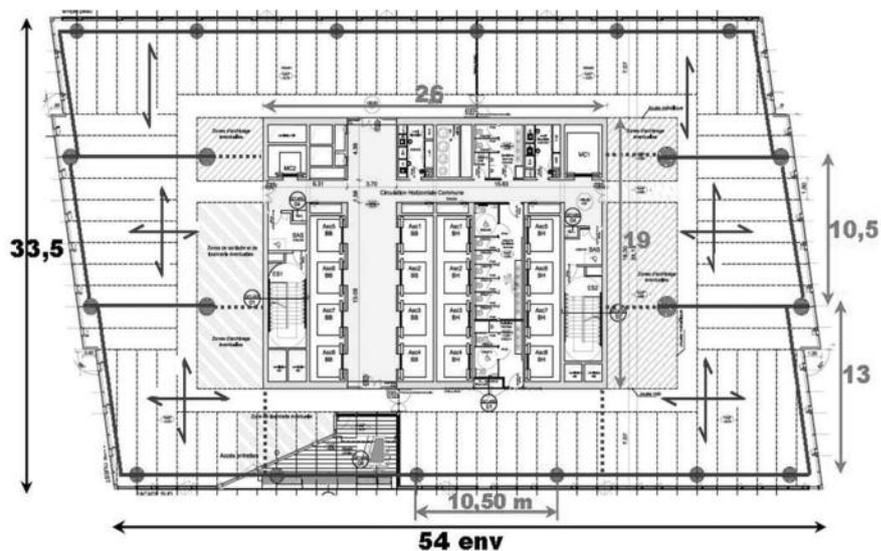


Figure 5.

L'épaisseur des murs du noyau, varie de 20cm à 80cm. À l'extérieur du noyau, la partie restante du niveau est dévolue à des bureaux le long de la façade et à des archives le long du noyau. Dans cette partie, la structure est conçue en poteaux/poutres avec une dalle portant souvent dans 2 directions. 20 poteaux (15 verticaux et 5 inclinés), d'un diamètre variant de 70 cm à 1,40 m, supportent des poutres 70 cm de haut.

Tout le long des murs du noyau, les poutres sont remplacées par des bandes noyées, afin de procurer une plus grande hauteur libre, permettant ainsi le passage des gaines principales d'air conditionné, alimentées par les gaines verticales de climatisation situées çà l'intérieur du noyau. Du fait que la hauteur entre la rue utilisée comme accès pompier et le dernier plancher de bureaux est inférieure à 200m, le bâtiment est classé IGH au lieu d'ITGH. La réglementation française en matière de sécurité incendie, qui est techniquement écrite par les pompiers, impose à la structure béton armé une stabilité au feu de 2h, sans l'aide de sprinklers ou de protections.

Les façades sont conçues avec un mur rideau porté par la structure poteau/poutre. La platitude de la façade Sud est brisée par des loggias et balcons se décalant tous les deux étages.

Afin de respecter la planification des travaux, la mise en œuvre du mur rideau a commencé tôt, au 10^e étage « courant », pendant que la structure continuait à s'élever vers le ciel (figure 6).

Dans la partie Ouest du bâtiment, 4 poteaux de 16 m de haut supportant 3000 à 4000 t, permettent d'ouvrir un hall d'accueil monumental en communication avec l'esplanade, qui est le principal accès piéton à la Tour Majunga (figure 7).

The thickness of the core walls varies from 20 cm to 80 cm. Outside the core, the remaining part of the level is intended to offices all along the façade and to record offices along the core. In this part, the structure is designed with columns / beams with a slab often bearing in 2 directions. 20 columns (15 vertical ones and 5 tilted ones), the diameter of which varying from 70 cm to 1,40 m, bear beams 70 cm high.

All along the core walls, the beams are replaced with flat beams, to provide greater headroom, thus allowing the way for main air conditioned ducts taking air from vertical air shafts inside the core.

Because the height between the street used as an access for fire safety means and the last office level is less than 200m, the building is classified as a High Rise Building instead of a Very High Rise Building The French fire regulation, which is technically written by firemen, imposes the concrete structure to be 2 hours fire resistant, without the help of sprinklers or coatings.

The facades are designed with a curtain wall supported by the concrete frame. The flatness of the southern façade is broken with loggias and balconies moving along each two levels.

In order to respect the planning of the works, the setting of the curtain wall began early, at the 10th current floor, while the structure was still going up to the sky (figure 6).

In the western part of the building, 4 columns 16m high, bearing 3,000 to 4,000 tons, permit the opening of a monumental lobby in communication with the Esplanade, which is the main pedestrian access to the Majunga Tower (figure 7).



Figure 6.

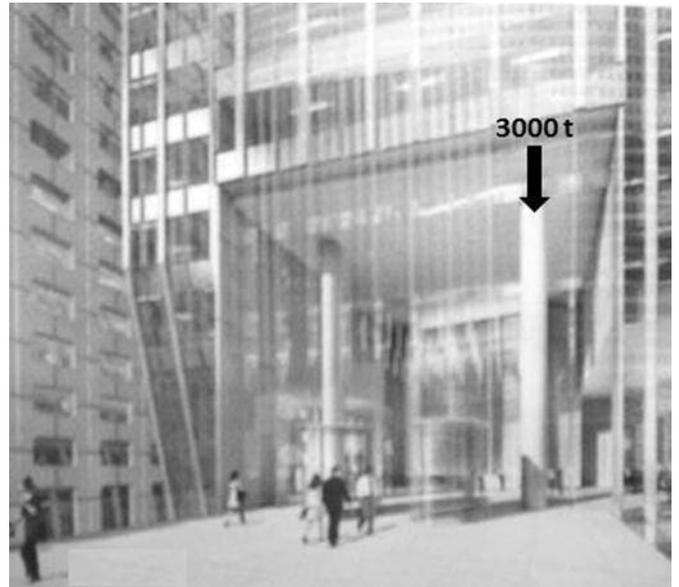


Figure 7.

CHARGES GLOBALES À LA BASE DE LA TOUR

La descente de charges gravitaires à la base de la tour est de 126.000 tonnes de poids propre et de 18.000 tonnes de charges d'exploitation, distribuées comme suit : 50 % dans le noyau et 50 % sur les poteaux ; le poids du radier à ajouter est de 15.000 tonnes.

La descente de charges totale ELS est de 159.000 tonnes. L'enlèvement du terrain en place lors de l'excavation donne un crédit de charge de -50.000 tm.

L'inclinaison des poteaux y compris l'effet $P\Delta$, génère un moment de flexion vers l'Est de 50.000 tm.

Les effets du vent ont été calculés à partir de mesures effectuées sur une maquette rigide de la tour et des immeubles environnants placée dans le tunnel d'essais en soufflerie du CSTB avec un vent de 50 ans de période de retour (24 m/s) (figure 8)

Les efforts horizontaux et moments de flexion engendrés à la base de tour par le vent cinquantenal sont :

- vent Est-Ouest (petite largeur) : 600 t / 80.000 tm
- vent Nord-Sud (grande largeur) : 130 t / 174.000 tm

GLOBAL LOADS AT THE BASIS OF THE TOWER

The global gravity loads at the basis of the tower is 126,000 tons of dead loads and 18,000 tons of live loads, distributed as follows : 50 % in the core, 50 % on the columns ; the weight of the raft to be added is 15,000 tons. The total vertical SLS load is 159,000 tons.

The removing of in situ soil for excavation gives a credit of load of -50,000 tons.

The inclination of columns, including $P\Delta$ effect, induce a bending moment towards East of 50,000 tm.

The effects of wind were calculated from measurements managed on a stiff model of the tower and of the surrounding building placed in the CSTB wind tunnel, with a wind of a return period of 50 years (24 m/s) (figure 8).

The horizontal forces and bending moments generated at the basis of the tower by the 50 years wind are:

- wind East-West (small wideness) : 600 t / 80,000 tm
- wind North-South (great wideness) : 1,300 t / 174,000 tm

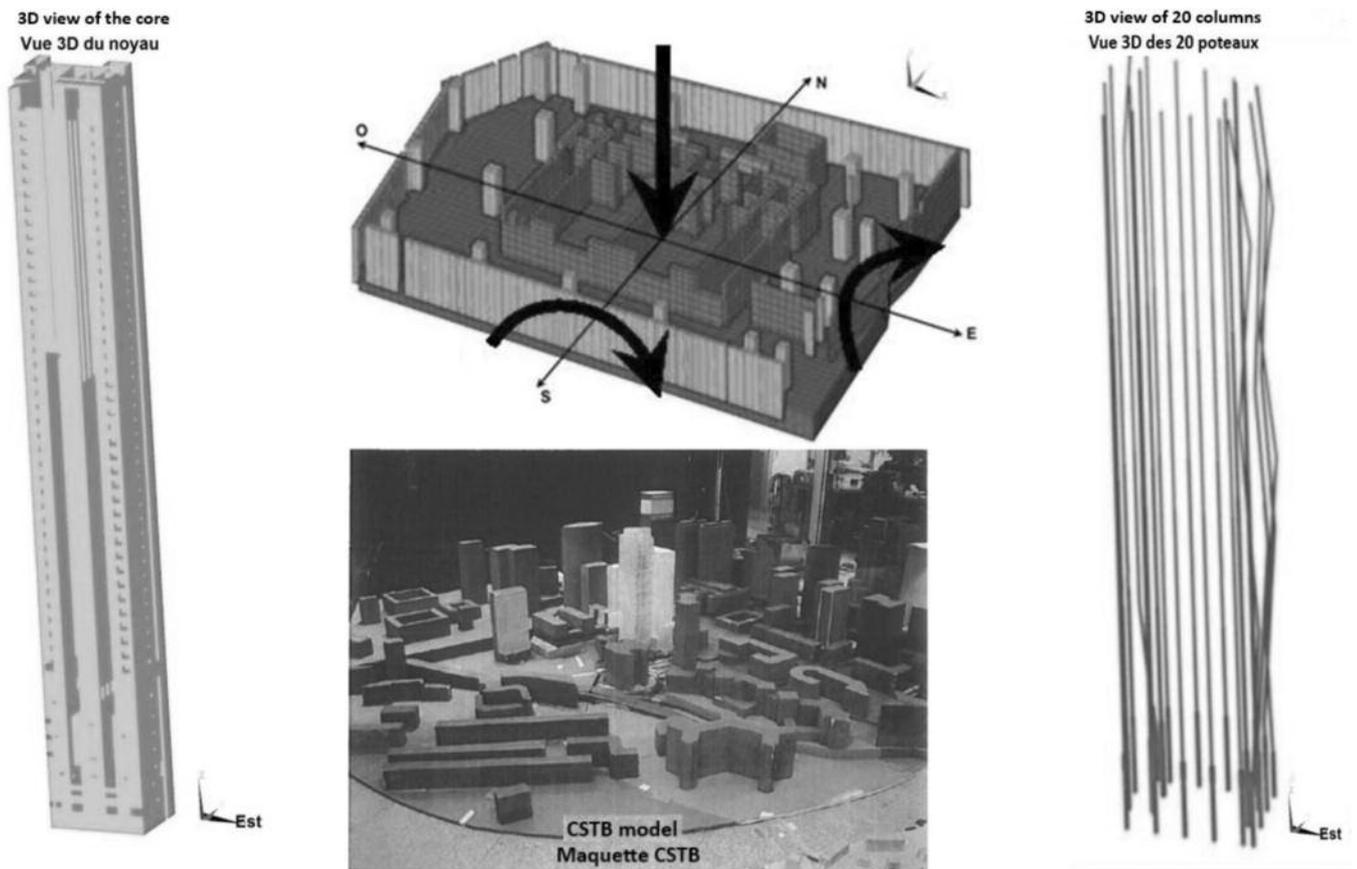


Figure 8.

FONDACTIONS DE LA TOUR MAJUNGA

La tour Majunga est implantée sur une zone géotechnique de transition entre la couche courante de calcaire grossière approximativement horizontale et la vallée alluvionnaire de la Seine. La **figure 9** montre la coupe géologique correspondante.

Dans cette partie, 3 principaux problèmes ont été mis en évidence par des forages géotechniques :

THE MAJUNGA TOWER FOUNDATIONS

The Majunga tower is located on a transitional geotechnical area between the usual approximately horizontal layer of limestone lying above superior sands and the alluvial Seine valley. Figure 9 shows the corresponding geological section.

In this area, 3 main problems were revealed by geotechnical drilling:

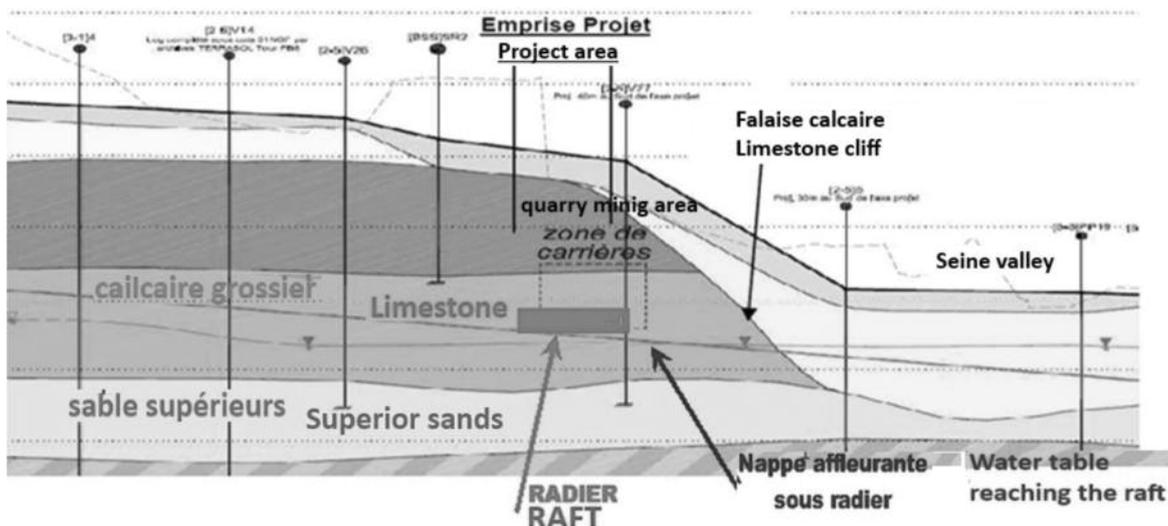


Figure 9.

- le calcaire grossier a été exploité, laissant une zone de carrières sur une partie du site
- les paramètres de forage montrent la présence d'une couche très faible de la base du calcaire grossier à la partie de la plus haute des sables supérieurs
- le niveau de la nappe phréatique atteint la sous-face du radier

Il a alors été décidé de renforcer la couche de sol faible par plots de jet grouting situés à l'aplomb des poteaux et des murs les plus chargés, après remplissage de tous les vides de carrières.

Le ratio de substitution en jet grouting a atteint 75 % du sol traité. (figure 10)

Le renforcement du sol par jet grouting a permis de limiter les tassements sous la tour, donc les tassements différen-

- the limestone was exploited, leaving a quarry mining area on part of the site
- the drilling parameters shows a very weak layer, from the basis of limestone to the higher part of superior sands
- the level of the water table is reaching the under face of the raft.

It was then decided to strengthen the weak layer of soil by means of jet grouting piles located under the columns and most loaded walls, after filling all empty spaces of quarries.

The substitution ratio with jet grouting reaches 75 % of the treated soil. (figure 10).

The soil reinforcement with jet grouting permitted to limit the settlements under the tower, then the differential settle-

Ariane tower

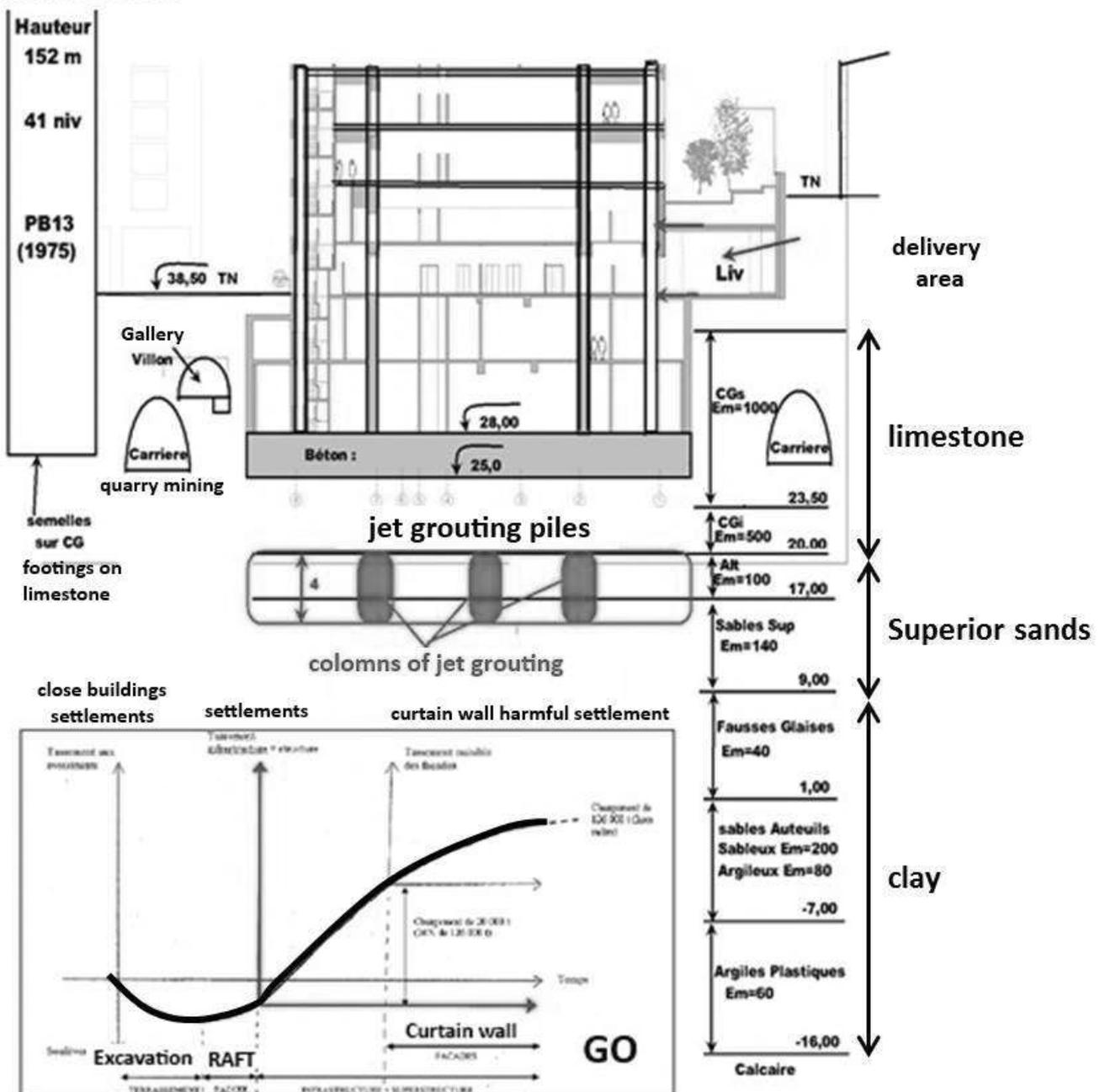


Figure 10 shows the location of jet grouting piles.

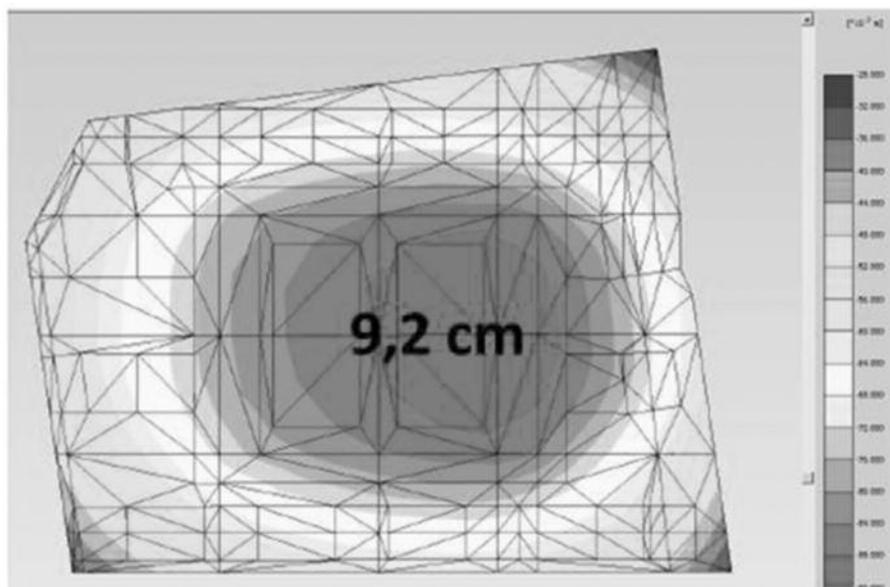


Figure 11.

tiels entre poteaux, entre poteaux et murs, ainsi que ceux des bâtiments proches.

Les prédictions de la forme de cuvette de tassements sous la tour ont pu être estimées avec un modèle MEF3D. (figure 11)

Un programme de surveillance mis en place durant les travaux a rendu possible la comparaison entre valeurs calculées et valeurs mesurées des tassements et la vérification de leur conformité aux critères de 2 ‰ imposés pour les valeurs de tassements différentiels entre appuis voisins de la tour autant que pour celles des tassements différentiels entre appuis de bâtiments et ouvrages existants proches. (figure 12)

Les problèmes de confortement du sol de fondations étant réglés, il restait à calculer et mettre en œuvre le radier de fondation de 3 m d'épaisseur armé avec des barres HA de diamètre 40 mm et de 12 m de long pour respecter le gabarit routier.

Les 6000 m³ de béton sont armés avec 1500 t d'acier HA feE500, avec des recouvrements de barres par tiers.

Compte tenu de la densité du ferrailage (localement 16 lits de barres HA40), le béton a été mis en œuvre à l'aide de

ments between columns and walls of the tower and those of the close buildings.

Predictions of the shape of the surface settlement under the tower could be estimated by a 3D FEM model (figure 11).

A survey program, set during the construction works, made it possible to compare calculated and measured values of settlements and the verification of their conformity to the imposed 2 ‰ criterion for the values of differential settlements between close bearing supports of the tower as well as those of differential settlements between bearing supports of close existing buildings and close existing construction works (figure 12).

The problems of reinforcement of the foundation soil being solved, one had to calculate and build the foundation raft 3 m thick, reinforced with high bond bars Φ 40 mm and 12 m long to respect the wideness of roads.

The 6,000 m³ of concrete were reinforced with 1,500 tons of high bond bars feE500, with overlapping of bars one third by one third.

Taking the density of reinforcement bars (locally 16 layers of Φ 40 mm bars) into account, the concrete was cast in situ with the help of socks reaching the bottom of the raft

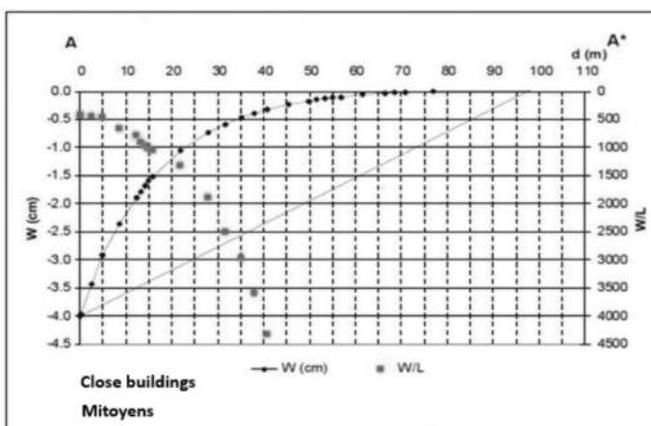
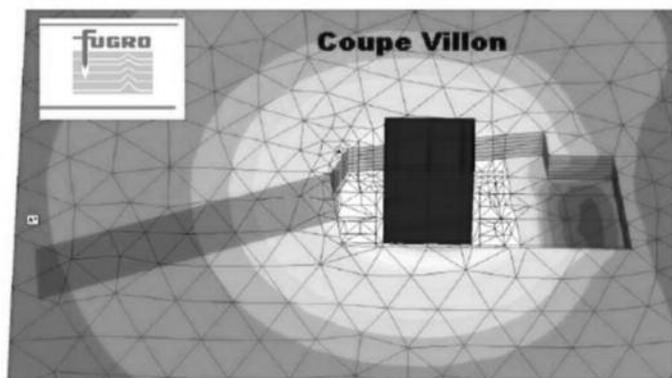


Figure 12.



Figure 13.

chaussettes descendant en fond de radier pour assurer un enrobage correct des armatures. (figure 13)

Les formulations du béton de radier ont été élaborées selon un protocole d'essais afin de limiter la vitesse de montée en température du béton et de limiter les effets de retrait.

Le béton du radier a été instrumenté pour suivre l'évolution de sa température et fiabiliser la formulation.

COMPOTEMENT DES BÉTONS

De façon générale, les bétons mis en œuvre ont été suivis pour, outre leur résistance, limiter les effets dus au retrait et au fluage et vérifier les écarts éventuels par rapport aux lois de comportement des codes de calcul (figures 14)

CRITÈRE DE CONFORT

Le noyau de contreventement de la tour Majunga est plutôt rigide, mais le critère de confort a néanmoins été vérifié, le radier n'étant pas encastré dans le sol (figures 15a et 15b).

Les déplacements horizontaux ELS en tête sous vent décennal et charges permanentes sont de $\frac{H}{1000}$ pour un critère

de $\frac{H}{500}$, et en ELU non pondéré sous vent cinquantennal

seul de $\frac{H}{950}$ pour un critère de $\frac{H}{800}$

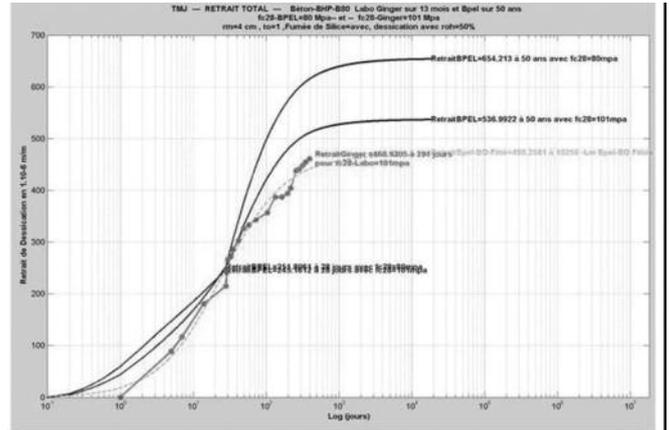


Figure 14.

in order to insure an adequate cover of the reinforcing bars (figure 13)

The cast concrete formulae were designed following a testing program in order to limit the temperature rise of the concrete and the effects of shrinkage.

The raft concrete was monitored in order to follow the temperature rise and to ensure the concrete formula.

CONCRETE BEHAVIOUR

In a general way, the different types of concrete cast in situ were monitored in order to, besides their resistance, limit the effects of shrinkage and creep and to verify the possible discrepancies between measurements and behaviour predictions issued from the calculation codes (figure 14).

COMFORT CRITERION

The Majunga tower core is stiff, but the comfort criterion was nevertheless verified, as the raft was not fit inside the soil (figures 15a and 15b).

The SLS horizontal displacement at the head of the tower under decennial wind and dead loads is $\frac{H}{1000}$ for a criterion

of $\frac{H}{500}$ and the ELU without factor displacement is $\frac{H}{950}$

for a criterion of $\frac{H}{800}$ under wind of a fifty years return period.

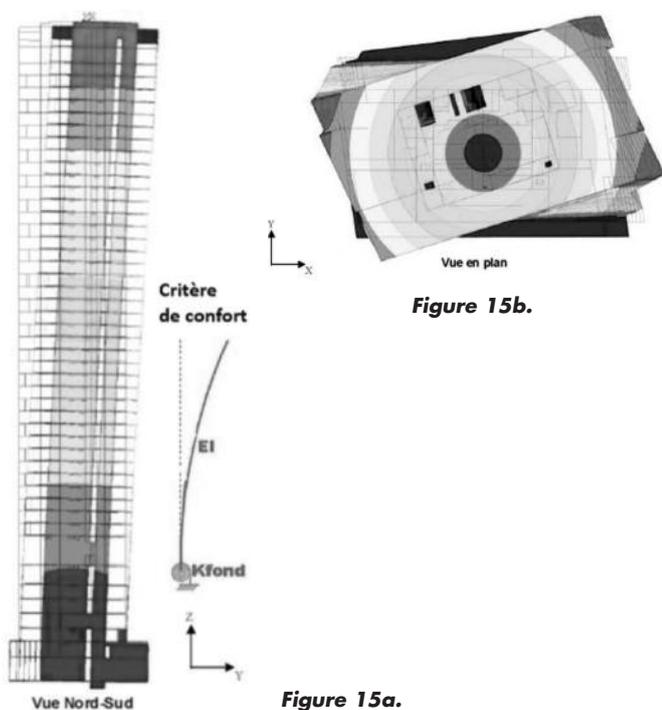


Figure 15a.

Figure 15b.

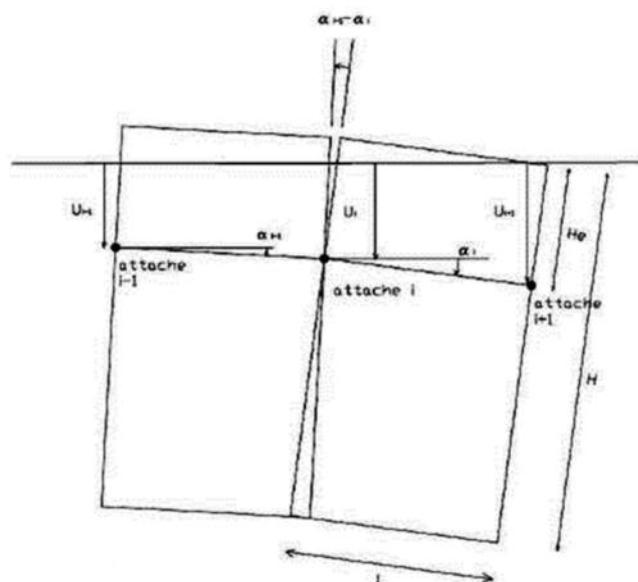


Figure 16.

DÉFORMÉE NUISIBLE POUR LE MUR RIDEAU

Le mur rideau, constitué de cadres pouvant bouger les uns par rapport aux autres, doit en principe comporter entre cadres un joint permettant les déplacements relatifs (figure 16).

Ce qui est susceptible d'engendrer des déplacements relatifs des panneaux de mur rideau :

- la flèche des poutres portant les panneaux
- les tassements différentiels entre poteaux portant ces poutres
- les tassements différentiels de fondation entre ces poteaux.

Ces 3 phénomènes sont cumulables.

Les critères classiques de tassements différentiels et de flèche nuisible de poutre ayant donné une épaisseur de joint refusée par l'architecte, certaines poutres ont dû être encastrees dans les poteaux pour réduire les valeurs de leurs flèches.

On voit ci-dessous (figure 17) la situation de la Tour Majunga depuis la perspective des Champs-Élysées à la Défense.



Figure 17.

LIMIT OF DISPLACEMENT FOR THE CURTAIN WALL

The curtain wall, designed with rigid frames able to move relatively one to another, has to manage joints between frames. (figure 16).

The following effects may generate relative displacements of the frames:

- the deflection of the beam supporting the frames
- the differential settlements between columns supporting the beam
- the differential settlements in the foundation of the columns.

These 3 phenomena must be added.

The classical criterion of differential settlements and limitation of deflection of the beam induced a joint thickness which was refused by the architect; for this reason, some beams had to be restrained in their columns in order to reduce their deflection.

The Majunga tower location (figure 17) can be seen from the view line going from Champs Élysées to La Défense.