

28 avril à Marseille La tour CMA-CGM

Le 28 avril 2008, la délégation Méditerranée a organisé une journée consacrée à la Tour CMA-CGM située dans le quartier de la Joliette à Marseille; cet ouvrage s'inscrit dans le cadre du projet d'urbanisme, de développement économique et culturel, d'architecture et d'immobilier EUROMED.

Rappel du programme

9h00 - Accueil et présentation de l'AFGC
Jacques RESPLENDINO, Président de la délégation Méditerranée,

9h30 - Présentation générale de l'opération
Laurence FERRACCI (société NEXITY) représentant du maître d'ouvrage,

9h45 - La partie architecturale et la conception générale de la tour
Philippe GOUIRAND (SRA-RTA - Groupement Cabinet d'architecte ZAHA HADID et Bureau d'études ARUP)

10h15 - Les études d'exécution
Joseph ATTIAS (SIDF)

10h45 - Les contrôles et contre-calculs
Franck DUBOIS (VINCI Construction France)

11h15 - L'organisation générale du chantier
Jean-Luc MOUNIER (GTM - VINCI)

11h45 - La réalisation de la façade
Laurent MAS (VINCI /EPYTECH)

12h00 - Synthèse - Discussions

13h00 - Déjeuner au restaurant le Milano des Docks

15h00 - Visite du chantier de la Tour CMA - CGM

Compte-rendu de la journée

1. Présentation de l'AFGC par le Président de la délégation Méditerranée

L'A.F.G.C. a été créée en 1998 à la suite de la fusion de l'AFPC et de l'AFREM. Elle a pour objectif de rapprocher tous ceux qui sont motivés par une même passion : la volonté de construire.

L'association comporte des Instances Nationales et des délégations régionales qui redéployent au niveau local les objectifs de l'AFGC, au travers de manifestations comme celle d'aujourd'hui.

Le bureau de la délégation Méditerranée est constitué de 13 membres, issus de différentes entreprises, bureaux d'études, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre (citons, entre autres, GTM, Campenon Bernard Méditerranée, Eiffage TP, le CETE Méditerranée, la DIR Méditerranée...), avec à sa tête son Président, Jacques RESPLENDINO.

L'Association informe de ses activités au travers de publications périodiques :

- Le bulletin annuel, qui contient les compte-rendus des conférences et visites, ainsi que le bilan des activités de l'année.
- La lettre d'information, qui informe des manifestations et actualités de l'Association.
- Le site Internet : www.afgc.asso.fr

Citons quelques exemples de thèmes en cours :

- Bétons Fibrés à Ultra Haute Performance (BFUP)
- Aciers à très haute limite d'élasticité

En 2007, l'AFGC a proposé les manifestations suivantes :

- 29/03 : Le forum ISBA TP / AFGC sur les fondations spéciales
- 29/11 : Le métro de Marseille

2. Présentation générale de l'opération

La première spécificité à souligner est que l'ouvrage est réalisé au compte d'une entreprise en nom propre.

La CMA-CGM est le 3e groupe mondial de transport maritime de conteneurs. En 2007, l'entreprise a réalisé une majoration de 58% de son résultat en 2006 (où le CA s'élevait déjà à 8.5 Milliards de Dollars). L'opération, lancée en 2004, prévoit 2700 postes de travail sur la Tour, sans compter les deux bâtiments voisins appartenant déjà à la CMA-CGM. Le Maître-d'Ouvrage est M. Jacques SAADE, Président de la CMA-CGM, qui est seul décideur sous tous les aspects. Même s'il existe un comité de pilotage constitué d'experts qui sont là pour le conseiller sur les décisions administratives, ils doivent lui demander son avis concernant les questions financières et esthétiques notamment.

NEXITY, 1er groupe immobilier en France, a été recruté en tant que Maître-d'Ouvrage délégué, afin de conseiller J. SAADE au travers d'un groupe d'experts.

La Maîtrise-d'œuvre a été confiée au groupement ZAHA HADID (Architecte) /ARUP (BE), la partie exécution à SRA-RTA, la partie technique à COPLAN.

R2M a été engagé en tant que BET cuisine et économiste, et SOCOTEC en tant que Bureau de Contrôle et Coordinateur SPS.

L'entreprise générale choisie pour les fondations et le gros œuvre est GTM, chargée également de l'OPC, de la synthèse et du TCE.

Les autres entreprises présentes sur chantier : EPITECH pour les façades, CEGELEC/SAUTERME pour les courants forts/faibles, la détection incendie, GTB,..., l'Agence GRENOIT pour la décoration intérieure, SPEEG pour la mise en lumière, G&S France pour la plomberie...

Nexity a réalisé un chiffre de 2.4 Milliards d'euros en 2007, et la part du pôle tertiaire s'élève à 355.7 M° d'euros.

A Marseille, l'entreprise a construit de nombreux ouvrages, citons pour exemple le GEORGES 5 par la filiale logement, les Docks sous l'étiquette SARI et le Mirabeau II, actuel bâtiment de la CMA-CGM.

Lors du concours pour le projet de la Tour, J. SAADE a consulté trois « stars » internationales, mais c'est finalement ZAHA HADID qui a remporté le concours avec un projet initial de 20 étages. L'image qui en ressortait était celle d'une mariée avec derrière elle sa traîne, représentée par le bâtiment annexe.

La Tour est située dans le périmètre de l'établissement public d'Euroméditerranée. Actuellement, l'ouvrage comporte 33 étages pour 147 m de haut et pour une SHOB de plus de 58000 m².

Elle renfermera une université d'entreprise (au niveau R+3), des locaux syndicaux, un fitness, un auditorium, un hall d'accueil, 16 ascenseurs dont deux panoramiques, deux pour l'accès au parking et deux monte-charges.

L'annexe a une SHOB d'environ 35000 m², 5 niveaux de sous-sol, 1 niveau (RDC) de locaux techniques, 1 niveau qui accueillera le restaurant d'entreprise prévu pour 2000 couverts, et un parking de 800 places, le tout pour une superstructures de R+4 niveaux.

Pour finir avec une note humoristique, nous retiendrons la métaphore employée par la presse pour décrire l'évolution des 3 bâtiments voisins de la CMA-CGM :

« La courbe de croissance de la CMA-CGM »



3. Le parti architectural et la conception générale de la Tour

Philippe GOUIRAND introduit la Tour de M. SAADE comme « un bâtiment à l'image de sa société et un ouvrage de fonction de sa société ». Pour le client, la signalétique du bâtiment est très importante.

Cet élément vertical trouve une de ses principales caractéristiques dans ses poteaux, qui ont une double fonction : outre leur rôle premier de descente de charges, ils ont une fonction esthétique primordiale.

La façade est elle-même très complexe : aux quatre angles de la tour une deuxième façade vient en recouvrement de la façade principale. La façade extérieure, en double peau, a un rôle de 'manteau', purement esthétique. Au niveau des parties centrales, la façade est en simple peau. Le vitrage est plus foncé pour accentuer la tête de la tour, qui accueillera des réceptions (également en pied de tour avec l'auditorium et le hall), ou des bureaux. Le bâtiment sera plus transparent de loin (effet miroir de près). Les études de réaction ont été menées de jour comme de nuit, la CMA-CGM travaillant quasiment 24h/24.

L'entreprise STA a fait office de traducteur et de conseil entre la Maîtrise d'œuvre anglaise et les entreprises françaises, en ce qui concerne la partie réglementaire notamment.

La Maîtrise d'œuvre est organisée en deux grandes familles :

- Etude : interfaces, coordination, suivi de la mise au point des entreprises
- Suivi des travaux

Au vu des spécificités de l'ouvrage, un travail en commun est primordial. Notons l'envergure internationale du projet : les études GO ont été menées à Saïgon, les façades viennent d'Italie, les ascenseurs de Suisse, la climatisation de Norvège, l'architecte est londonien et les travaux sont réalisés à Marseille.

Quelques chiffres concernant la Tour :

- hauteur de levée standard : 4.08 m
- 41000 m³ de béton
- 4800 t d'acier
- 34000 m³ de terrassement
- SHOT d'environ 63400 m²

Quelques chiffres concernant l'annexe :

- 12500 m³ de béton
- 900 t d'acier
- 60000 m³ de terrassement
- SHOT de 37590 m²

4. Les études d'exécution

Les études initiales ont été menées par ARUP, puis elles ont été confiées à Structures Ile de France.

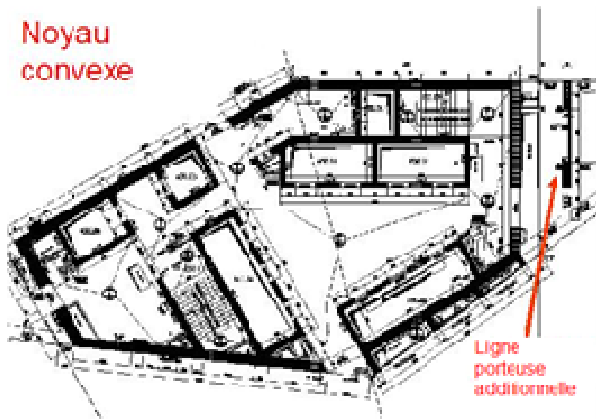
Le contreventement de la tour est assuré par le noyau central en BHP. Mais l'ouverture sur le côté gauche du noyau, des linteaux intérieurs et des planchers dalles sont des particularités difficiles à réaliser.

Pour palier aux grandes portées de planchers, on a réalisé une ligne porteuse additionnelle. Une 'translation' de la poutre de façade double peau vers l'extérieur a également été réalisée et un noyau convexe en BHP est choisi.

Les manifestations régionales

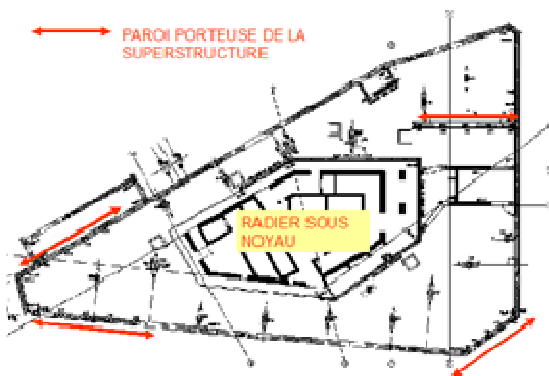


Noyau convexe



Les fondations de la tour sont mixtes :

- Une paroi moulée périphérique de 80 cm d'épaisseur et 260 ml, pas toujours porteuse de la superstructure
- Des barrettes simples ou mixtes sous charges ponctuelles de fortes intensités
- Un radier sous noyau de contreventement 2.30 m de hauteur et surépaisseurs au voisinage des fosses
- Un radier d'étanchéité d'épaisseur 70 cm déconnecté de la paroi moulée pour éviter les phénomènes de clavetage.



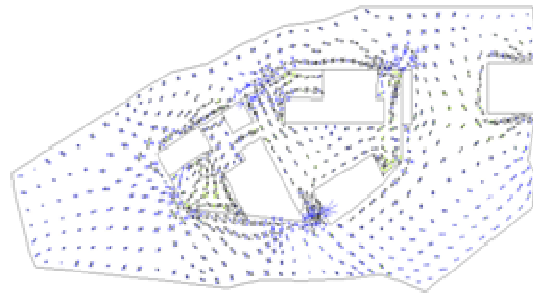
Les planchers sont en béton armé traditionnel, d'épaisseur en général 33 cm, et localement 40 et 45 cm, jusqu'à 80 cm pour le niveau R0, qui est le siège d'efforts de membrane très importants.

*efforts de membrane : efforts de traction dans les planchers, dus à l'inclinaison des poteaux.

Niveau 10



Niveau 6



Une poutre de rive, d'épaisseur variable, est réalisée à la périphérie du bâtiment à chaque niveau..

Ces poutres reposent sur les poteaux qui sont inclinés dans le plan des poutres qu'ils supportent et parfois même en dehors de ce plan.

Hypothèses générales :

- Les charges de pesanteur sont supérieures à celles courantes dans les tours de bureaux en France.
- Un poids de 1.5 kN/m² de façade est retenu.
- Les conditions contractuelles du calcul parasismique sont : règles PS92, zone la, ouvrage de classe C, site S2, coefficient de comportement $\eta=2$, amortissement 5%.
- Les conditions contractuelles du calcul au vent sont : zone 4, $V_{ref}=30\text{m/s}$, vent moyen sur 10min de période de retour 50 ans, hauteur 10 m, de plus les limitations pendulaires en tout point du dernier étage (R32) sont fixées à 18mg.

Les efforts exercés par le vent ont été validés au travers d'essais en soufflerie.

Une particularité de la tour est que pour une incidence de 320° , la dérive est du même ordre de grandeur que la traînée.

Hypothèses complémentaires :

- Stabilité au feu : 2h en général pour les éléments verticaux et horizontaux.
- Fissuration peu nuisible.
- Déplacements relatifs inter- étages aux noeuds des poteaux limités à $H(\text{étage})/500$ sous toutes les incidences du vent et à 25mm sous incidences sismiques.
- Variation de température des poteaux dans les façades double peau assez exceptionnelle pour la France :
 - o Tintérieure= 22°C
 - o T poteau double peau en été= 44°C
 - o T poteau en hiver= 4°C

Le noyau et les éléments verticaux intérieurs sont réalisés en béton C60/70 sans fumée de silice, les poteaux de façade en béton C60/70 avec fumées de silice.

Le pourcentage d'aciers dans les poteaux est d'environ 1%.

Modélisation (sur Robot Millenium Full)

La superposition de tâches de conception du dimensionnement et d'études d'exécution nécessite une procédure rigoureuse. A chaque modification d'un modèle, il faut contrôler l'impact sur la structure.

Pour aider à la vérification, à chaque élément est associée une couleur.

La superstructure a été modélisée sur appuis simples.

Une tour est caractérisée par son analyse modale.

Une difficulté est survenue pour modéliser la paroi en infrastructure :

- o éléments barres
- o appuis unidirectionnels dont la raideur a été choisie en fonction des caractéristiques dynamiques du sol.

La tour pèse 80000 tonnes, et ce poids n'est pas uniquement du au noyau. Ce noyau est très rigide, mais la masse n'est pas assez distribuée, d'où une petite période et des accélérations plus importantes.

La tour se déplace sous son poids propre, du fait de l'inclinaison des poteaux. Sous l'effet du vent, le déplacement vaut environ 10 cm (ce qui reste assez peu), et sous l'effet des séismes, il vaut environ 20 cm (ce qui n'est pas extraordinaire).

Notons enfin des zones de striction, pour lesquelles il est nécessaire de réaliser des enveloppes, surchargées en acier.

Les manifestations régionales

5. Les contrôles et contre-calculs

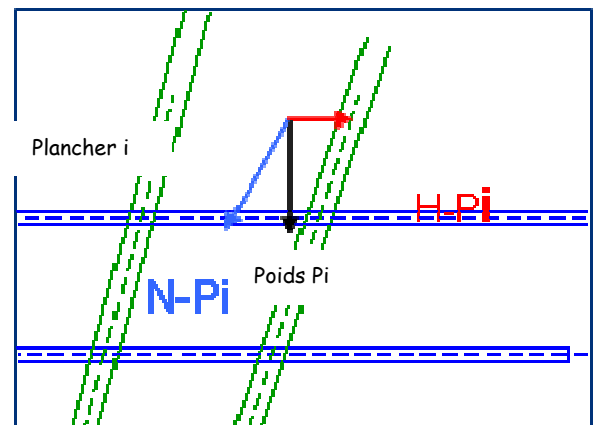
Le BET a plusieurs missions, dont :

- Coordonner les BET
- Assurer la bonne résistance de la structure
- Assurer une bonne constructibilité de la structure

En ce qui concerne le fonctionnement des poteaux :

La charge est inclinée, du fait du poids du plancher. De plus, comme les poteaux changent d'inclinaison, une force horizontale apparaît. Ainsi, les poteaux créent des efforts dans tous les sens dans les planchers.

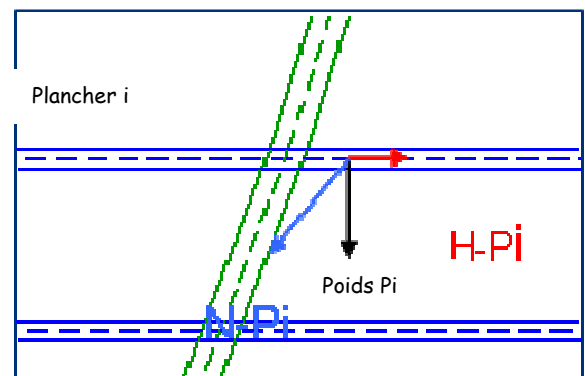
Les poteaux inclinés de façon constante :



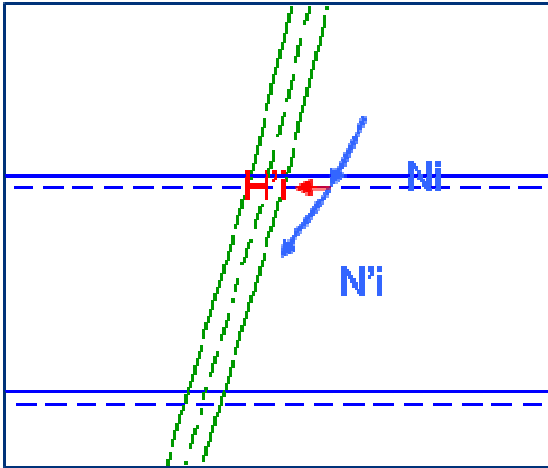
La partie du poids du plancher P_i équilibrée par le poteau se décompose en :

- un effort normal dans le poteau N-Pi supérieur à P_i
- un effort horizontal dans le plancher H-Pi

Les poteaux inclinés de façon variable :



Le poids du plancher se décompose comme précédemment. Du fait de la variation d'inclinaison, l'effort normal du poteau N_i génère une composante horizontale H_i dans le plancher.



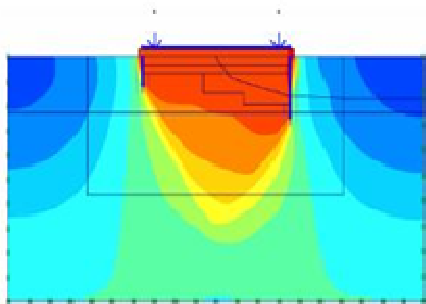
Les efforts horizontaux générés par les poteaux sont repris d'une part par les poutres de rive (équilibre en famille de poteaux voisins), d'autre part par la dalle qui va les transmettre au noyau (efforts de membrane dans les planchers).

Tous les efforts horizontaux (sous G) s'équilibrent au niveau 00. Quand on fait le bilan des efforts de vent et de séismes au niveau 00, on constate que 30% des efforts sont localisés au niveau du noyau.

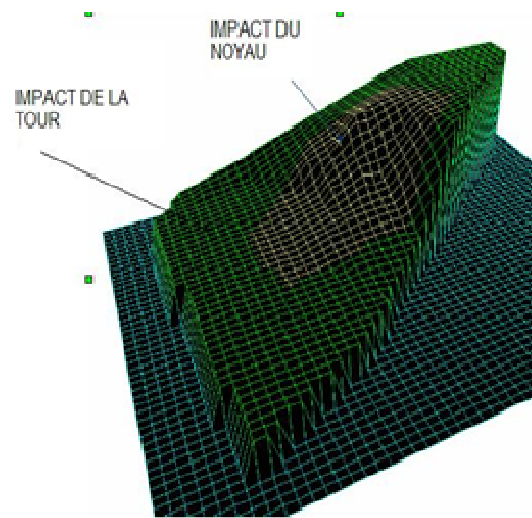
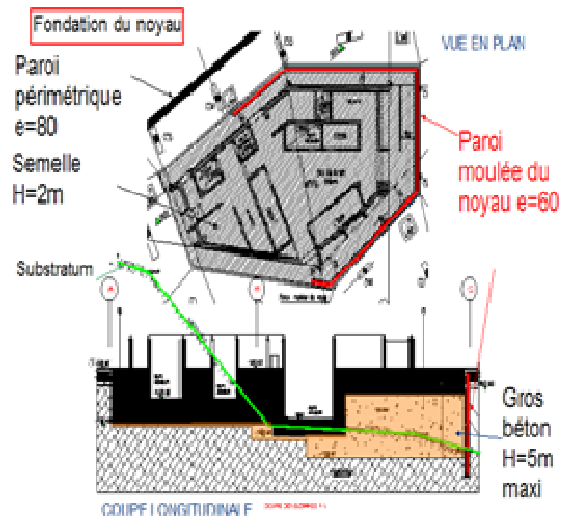
En ce qui concerne le calcul des infrastructures :

L'étude des infrastructures et des fondations a nécessité la collaboration de 5 BET. Les essais de reconnaissance de sol ont mis en évidence un substratum très haut dans la zone Nord de la tour, mais très bas dans sa zone Sud, d'où la nécessité d'effectuer de nombreux sondages pour définir quel type de fondation choisir pour le noyau. Si une barrette avait été initialement choisie, c'est finalement une semelle en gros béton d'une épaisseur de 2m qui a été retenue. Elle a été posée directement sur le substratum afin d'éviter tout problème de tassement.

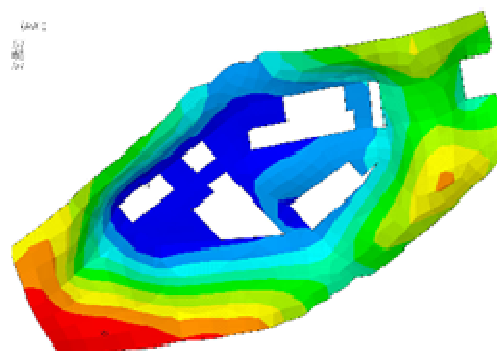
Etude par éléments finis du tassement du noyau



Une paroi moulée du noyau d'une épaisseur de 60 cm a été coulée pour pouvoir réaliser le gros béton.



Un problème très important est celui du fluage des poteaux :



Les poteaux se déplacent beaucoup plus que le noyau, il est donc nécessaire d'apporter des corrections afin d'assurer l'horizontalité des dalles.

Le béton des poteaux contient des fumées de silice, pour limiter justement ce fluage, tandis que le béton du noyau n'en contient pas.

Pendant la construction, chaque niveau se déplace au maximum de 0.4 cm. Les niveaux sont coulés plus haut de 4 cm par rapport à leur cote NGF.

6. L'organisation générale du chantier

Le chantier aura coûté environ 100 Millions d'euros, dont 84 Millions pour le GO, le terrassement et les fondations, et 12 Millions pour l'OPC et la mission de synthèse.

Jacques SAADE a choisi l'entreprise de gros œuvre, mais c'est GTM qui a choisi les entreprises de second œuvre.

Le délai de gros œuvre est de 30 mois, dont 3 qui ont servi à la déviation des réseaux, donc un délai ramené à 27 mois.

Par rapport au projet initial, GTM a proposé principalement deux variantes :

- La poutre de rive en béton
- La réorganisation des accès au parking de l'annexe...

Planning directeur :

- Avril 2006 : OS
- 3 mois de déviation des réseaux
- Juillet à octobre 2006 : fondations et terrassement
- Avril 2007 : fin radier

Aujourd'hui, les travaux en sont à 60% d'avancement.

Un délai de 9 mois a été nécessaire entre les études et le début de l'exécution.

L'ouvrage a été conçu avec une géométrie quasi constante de bas en haut pour pouvoir le réaliser de façon 'industrielle' à l'aide d'un même outil coffrant. La géométrie générale de l'ouvrage est la suivante : 1172 poteaux regroupés en 500 familles différentes (fuselés, banane,...), ainsi que des planchers de types différents.

L'ouvrage est réalisé à l'aide d'un coffrage auto-grimpant et d'un mât de bétonnage. Les grues sont ancrées sur les planchers.

Le noyau a 7 étages d'avance dans sa réalisation par rapport aux planchers.

Par niveau, il faut compter 1600 m² de coffrage sur un seul bloc, 330 m³ de béton. L'outil pèse entre 300 et 350 t et est tenu sur 60 vérins.

Un niveau est coulé par semaine, car le noyau est bloqué par les grues.

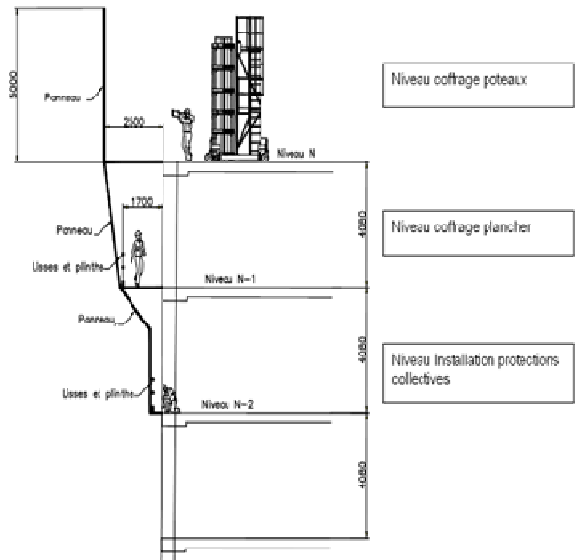
Principe de coulage des voiles

Niveau_{N+1} : bétonnage des voiles et désélingage des armatures.

Niveau_N : coffrage.

Niveau_{N-1} : télescopage de l'équipement et ragréage des voiles.

niveau_{N-2}:Récupération des sabots



Principe de bétonnage

Le béton sort de la centrale, rentre dans un réseau de pompage pour être envoyé en tête de tour. Le béton est distribué à l'aide du mât de bétonnage.

En ce qui concerne les poteaux :

Les poteaux ont une inclinaison variable vers l'intérieur.

L'analyse des besoins a montré :

- Qu'il fallait limiter le nombre de coffrages des poteaux (du fait d'un chantier exigu et du coût).
- Que pour monter d'un étage par semaine, il faut couler 8 poteaux par jour.
- Le béton doit rester brut apparent.

L'entreprise a utilisé un outil de stabilisation (châssis) permettant la stabilisation au sol et le réglage de l'inclinaison.

Les coffrages de talonnettes sont tous différents.

Chaque poteau est implanté au niveau du sol et équipé d'un laser.

Pour les poteaux courbes, le mode de coffrage est différent : il est en polystyrène, revêtu d'une résine et de fibres de verre (il est à simple ou double usage).

La passerelle périphérique de protection a été réalisée pour ce chantier. Elle sert contre le vent, et est autonome des grues : elle se déplace par vérinage, comme le coffrage auto-grimpant.

Les hauteurs sous plancher sont de 4m, contrairement aux 3.74m habituels.

Des rampes hélicoïdales ont été mises en place dans le bâtiment annexe.

Des parois moulées avec 2 niveaux de butons ont été réalisées pour les fondations.

7. La réalisation de la façade

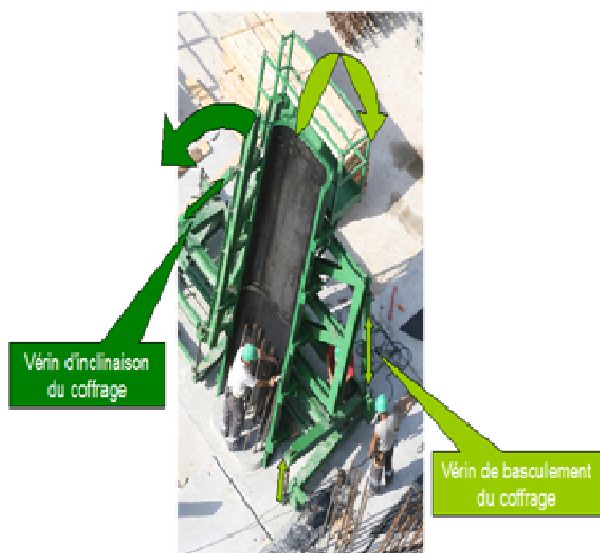
Le lot façades a été confié à l'entreprise italienne EPITECH, groupement de 4 entreprises : COOPSETTE, LORENZON, METAL SIGMA et BLUE STEEL (BE).

Les façades sont constituées de panneaux vitrés courbes.

On distingue deux types de façades :

- **Façade double peau** : 2694 panneaux en extérieur (peau non étanche, ventilée) ; 2710 panneaux en intérieur (peau assurant l'étanchéité) ; un total de 6110 panneaux, sachant qu'un panneau sur deux est un prototype
- **Façade simple peau** : 706 panneaux

Les deux types de façades sont tenus en tête et passent devant la poutre périphérique.



La réalisation de la façade a débuté en mars 2007, avec la réalisation des filières, au nombre de 64, qui donnent forme au profil. Puis a suivi l'extrusion des profils (environ 60000 différents), en mai 2007. Enfin, la pose des panneaux de la façade a débuté en février 2008, avec une cadence de 25 panneaux par jour.

8. Synthèse - Discussions

Les questions posées ont amené quelques informations supplémentaires :

- L'inclinaison des poteaux amène une pondération des efforts de 15%
- La partie thermique n'a pas été prise en compte lors de la conception. Le projet ne s'inscrit pas dans la démarche HQE.

9. La visite

A 15h, nous avons rendez-vous au pied de la Tour CMA-CGM pour une visite guidée. Séparés en deux groupes, nous sommes montés jusqu'au 11e étage pour l'un, et jusqu'au 15e pour l'autre.

Au 11e, nous avons pu voir le dernier plancher coulé. Au 15e, il s'agissait de voir le coulage des voiles du noyau.

Nous avons pu observer les différents types de poteaux, le mât de bétonnage, le coffrage auto-grimpant, le système de coffrage des poteaux, les implantations des lasers, l'emplacement du futur ascenseur panoramique,...

10. Remerciements

Nous remercions particulièrement :

- Jacques RESPLENDINO, Président de la délégation Méditerranée de l'AFGC
- Jean PEYTAVIN, professeur à Polytech/Marseille
- et tous les professionnels qui sont intervenus lors de cette conférence et ont répondu aimablement à toutes nos questions.

Compte-rendu rédigé par Morane BOUGHEDADA et Priscilla REMBA-MORA

