CONCEPTION ET CONSTRUCTION DE LA TOUR MAHANAKHON À BANGKOK

Kanokpat CHANVAIVIT, Chloé CLAIR

Bouygues Thai, Thailand

André LY

Bouygues International Building, France

Introduction

La Tour MahaNakhon sera en 2016 la plus haute tour de Bangkok (Thaïlande) pour atteindre une hauteur de 314 mètres. La structure verticale est constituée d'un noyau central en béton armé de 23x23 mètres au sous-sol pour se réduire progressivement à 23x14 mètres au sommet de la tour servant ainsi de stabilité aux actions latérales telles que le vent et le séisme. Les charges gravitaires sont principalement supportées par 12 méga-poteaux en béton de 60 MPa de résistance sur toute la hauteur du bâtiment.

La stabilité latérale est renforcée par 3 niveaux de voiles « outriggers » en béton armé reliant le noyau central aux méga-poteaux situés aux niveaux 19-20, 35-36 et 51-52.

Les dalles en béton armé sont supportées dans la plupart des cas par des poutres précontraintes. Environ 30% des planchers sont construits en porte-à-faux afin de créer l'effet de « pixellisation » requis par l'architecture du projet.

La charge totale de la tour MahaNakhon est de 3,000MN qui se décompose en 1600 MN de poids propre, 460 MN de surcharges permanentes, 350 MN de charges d'exploitation et 590 MN de poids propre du radier. La tour est portée par un radier de 8,75 mètres d'épaisseur et 129 barrettes de 1.2x3.0 m dont la pointe se situe à -65.0 mètres, fondés sur la deuxième couche de sable de Bangkok. La structure de la tour est en voie d'achèvement (Fig.1).

Cet article est un résumé des principaux points relatifs à la conception et à la construction de la structure. Il reprend les éléments d'un article publié dans la publication officielle de la Conférence du CTBUH de New-York en 2015. Le lien direct à cette publication est : global.ctbuh.org/paper/2403.

Fig.1. Construction of MahaNakhon tower (Source Bouygues-Thai)

Le radier

La Fig.2 montre le plan du radier avec ses 129 barrettes supportant une charge maximale admissible de 29 MN. Le noyau central et les poteaux sont indiqués respectivement en bleu et rouge.

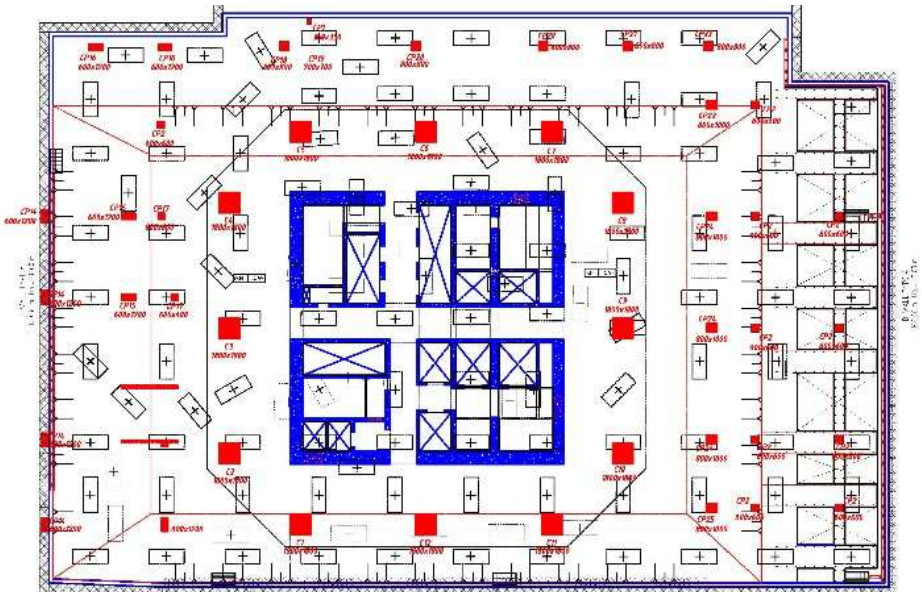

Fig.2. Plan de fondations (Source Bouygues – Thai)

Interaction sol-structure

L'interaction sol-structure a été prise en compte par l'estimation de la raideur d'ensemble des barrettes à l'aide du logiciel PLAXIS. Chaque barrette a été modélisée comme un ressort. La raideur de chaque ressort variait suivant sa localisation en raison d'un effet de groupe induit par l'interférence des piles environnantes. Un processus itératif a été réalisé avec PLAXIS et ETABS pour converger vers une distribution appropriée raideur / charge sur chaque barrette.

Le radier a été dimensionné aux moments et aux efforts tranchants issus du modèle aux éléments finis ETABS avec des éléments de « coque épaisse ». Des vérifications par les diagrammes déformations-contraintes ou par la méthode des bielles et tirants ont été menées en parallèle pour conforter la conception globale et locale. La Fig.3 montre le ferraillage du radier de la tour MahaNakhon.

Fig.3. Aciers du radier (Source image courtesy of PACE Development PLC)

Contrôle qualité du béton

En raison de la forte épaisseur du radier, des bétons spéciaux ont été utilisés pour empêcher tout problème d'effet thermique au jeune âge. Pour réduire la chaleur d'hydratation, des cendres volantes ont été incorporées en substitution au ciment. Ces cendres présentent d'autres avantages pour le matériau béton comme ceux d'assurer une meilleure maniabilité et une moindre ségrégation en raison de leur petite taille et de leur poids plus léger que le ciment. Les autres constituants tels que les agrégats et le sable ont été stockés dans une zone ombragée et ont été arrosés pour contrôler leur température. De la glace a été ajoutée à l'eau pour abaisser la température du béton frais. Immédiatement après le processus de durcissement du béton, une bâche en plastique a été placée par-dessus le radier, puis recouverte par 25mm de mousse polystyrène pour isoler thermiquement le béton.

La différence de température maximale admissible a été limitée à 20°C. Des thermocouples ont été installés à l'intérieur de chaque couche pour surveiller les températures du béton. Ces dernières ont été enregistrées automatiquement toutes les heures pendant au moins 5 jours ou jusqu'à la stabilisation comme le montre la Fig.4.

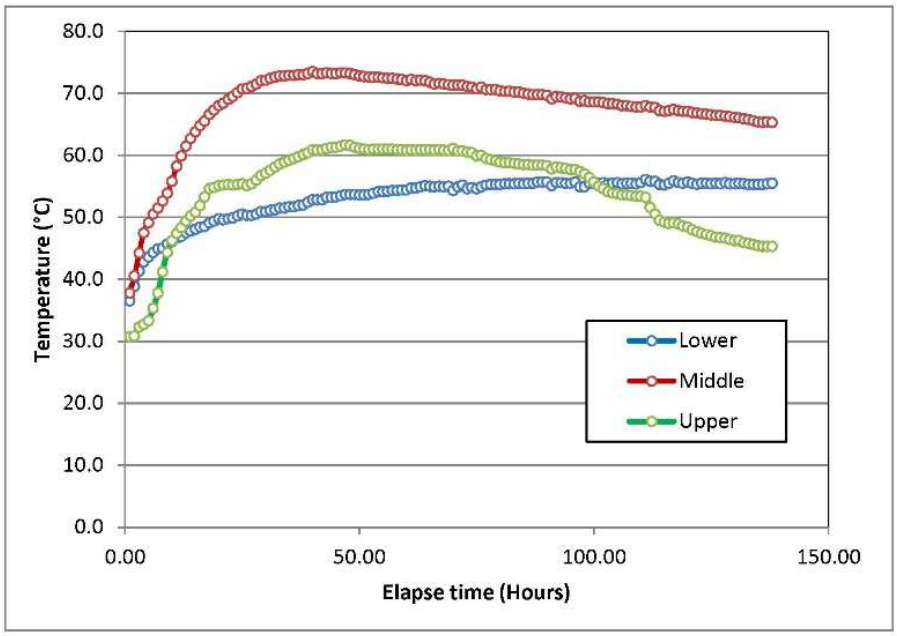

Fig.4. Courbes de température dans le radier (Source Bouygues – Thai)

Phase de coulage

La quantité totale de béton a été d'environ 22 000 m3. En raison de la localisation du chantier au cœur du quartier des affaires au centre-ville de Bangkok, la livraison de béton a été limitée à 4.000 m3 par jour (cf. Fig.6 pour avoir une idée d'un jour de coulage). Les contraintes liées au contrôle de la chaleur du béton et à la capacité de livraison par la centrale de béton, ont conduit à mettre en place un phasage de coulage en 12 couches horizontales. Chaque coulage était d'environ 1 mètre d'épaisseur, comme illustrée sur la Fig.5, incluant des armatures de reprise des efforts de cisaillement. Douze heures de travail continu ont été nécessaires pour chaque coulage.

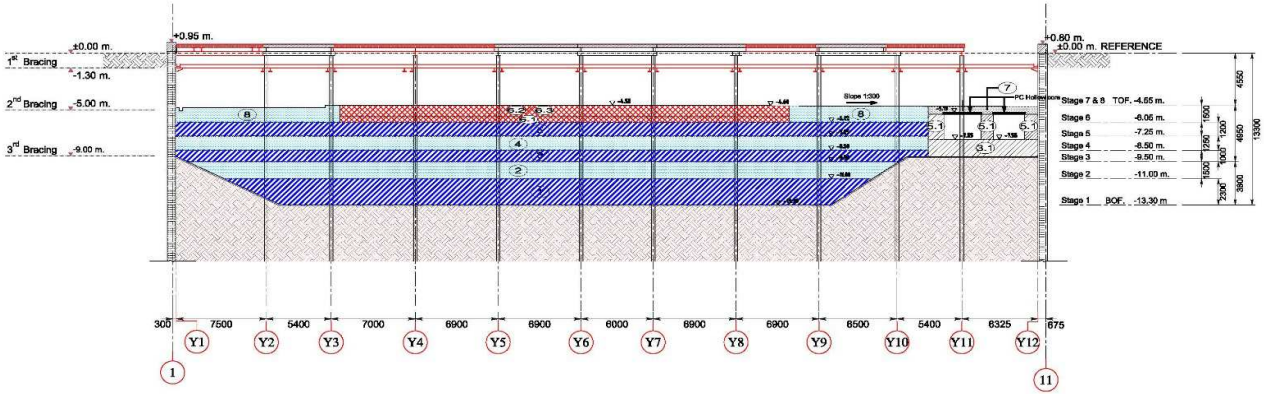

Fig.5. Séquence de coulage du radier (Source Bouygues – Thai)

Fig.6. Camions toupies pour le radier (Source Bouygues-Thai)

Les méga-poteaux et le noyau central

Charges verticales et latérales

Sur la base des études préliminaires, il a été jugé nécessaire de connecter les voiles « outriggers » aux méga-poteaux au plus tôt, afin de réduire le raccourcissement différentiel entre les voiles du noyau et les poteaux.

De plus, la configuration du bâtiment avec ses 3 niveaux de voiles « outriggers » a nécessité de prendre en compte dans la modélisation aux éléments finis l'effet de phasage de construction.

En effet, le phasage avait un impact important sur la distribution des charges dans les poteaux: Les charges permanentes de plancher transitaient par les méga-poteaux au fur et à mesure du coulage des planchers, et ceci avant la connexion des « outriggers » aux poteaux.

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">Flexible foundation</th><th colspan="2">Rigid foundation</th></tr>
<tr><td>Construction sequence FE gravity system models</td><td colspan="2">Model naming "CS"
(C-construction sequence, S-spring support)
Long term spring supports
Stage 1: Raft foundation only
Stage 2: Raft to L19
Stage 3: Raft to L35
Stage 4: Raft to L51
Stage 5: Raft to Roof</td><td colspan="2">Model naming "CF"
(C-construction sequence, F-Fixed support)
Fixed supports
Stage 1: Fixed support to L19
Stage 2: Fixed support to L35
Stage 3: Fixed support to L51
Stage 4: Fixed support to Roof</td></tr>
<tr><td>Wish-in-Place FE lateral system models</td><td>Model naming "US 475"
(U-ultimate lateral forces, S-spring support, short term)

475 year RP seismic with 5% damping ratio with R=4.0
to design
+
Wind loads 50 years return period with 1.5% damping ratio to design</td><td>Model naming "US 2475"
(U-ultimate lateral forces, S-spring support, short term)

2475 years return period seismic with 2% damping ratio without any response modification factor (R=1.0) to check intermediate ductility detail requirements</td><td>Model naming "UF 475"
(U-ultimate lateral forces, F-fixed support)

475 year RP seismic with 5% damping ratio with R=4.0
to design
+

Wind loads 50 years return period with 1.5% damping ratio to design</td><td>Model naming "UF 2475"
(U-ultimate lateral forces, F-fixed support)

2475 years return period seismic with 2% damping ratio without any response modification factor (R=1.0) to check intermediate ductility detail requirements</td></tr>
</table>

Tab.1.Tableau récapitulatif des différents modèles

Le modèle « phasé » montrait ainsi que les poteaux étaient plus chargés qu'avec un modèle « non phasé ». En effet, due à la forte raideur des voiles « outriggers », ces derniers attiraient les charges gravitaires au lieu de les laisser « descendre » dans les poteaux.

Le modèle « phasé » a ensuite été comparé au modèle traditionnel « non phasé », aussi appelé modèle « wish-in-place ». Ce dernier a été utilisé pour analyser la réponse du bâtiment aux charges à court terme comme le vent et le séisme.

Les conditions d'appui ont également été prises en compte selon deux hypothèses : raideurs souples et raideurs dynamiques afin d'envelopper toutes les répartitions de charge possibles. Tous les modèles aux éléments finis développés pour la conception de la Tour Mahanakhon sont précisés dans le Tab.1.

Performance sismique et vent

Le Tab.1 résume les différentes modèles liées aux deux cas de charges latérales pour chaque condition d'appui.

Premier cas:

- Le séisme était pris en compte suivant le spectre de dimensionnement issu des codes thaïlandais avec une période de retour de 475 ans, 5% de taux d'amortissement et un coefficient de comportement R égal à 4.
- Le vent était pris en compte avec une période de retour de 50 ans et 1,5% de taux d'amortissement.

Deuxième cas:

- Le séisme était basé sur l'annexe B des recommandations du CTBUH pour la conception sismique des tours de grande hauteur (2008), pour les régions à faible risque sismique, avec une période de retour augmentée à 2475 ans et un taux d'amortissement de 2,0%, sans coefficient de comportement (R est égal à 1).

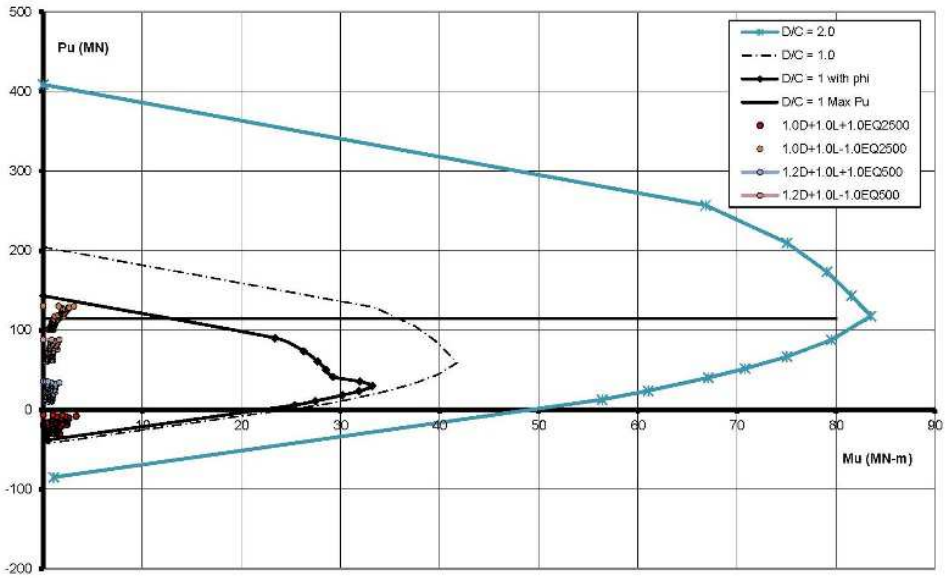

Fig.7. Courbe d'interaction CTBUH Appendix B (Source Bouygues – Thai)

Les résultats de l'analyse sismique ont montré que le ratio demande/capacité était toujours inférieur à 1,0 quel que soit la période de retour (2475 ans ou 475 ans). La Fig.7 montre le diagramme d'interaction du méga-poteau C1. Il apparaissait que l'ensemble des sollicitations dans tous les cas de chargement étaient situées à l'intérieur de la courbe d'interaction représentée en traits pointillés. En effet, le dimensionnement des éléments structuraux ne dépendait pas que des exigences de résistance, mais aussi des exigences d'aptitude au service (déplacement et accélération sous l'action du vent pour les critères de confort). Pour une analyse plus détaillée sur la conception sismique, le lecteur est renvoyé à l'article « MahaNakhon Tower and the Use of CTBUH Seismic Guidelines » publié au congrès CTBUH de 2014 à Shanghai.

Voiles « outriggers »

Pour un grand bâtiment élancé, l'accélération pour le confort humain et les déformations latérales devaient être vérifiées. La présence des 3 niveaux de contreventement (19-20, 35-36 et 51-52) était nécessaire pour améliorer la rigidité de la tour en reliant les parois du noyau central aux méga-poteaux périphériques. Ce mécanisme « push-pull » créait des forces de traction et de compression dans les poteaux sous l'effet du vent. Une « ceinture » en voiles béton armé reliant les poteaux permettait de mobiliser tous les poteaux dans le système de contreventement.

Ce mécanisme a ainsi permis de réduire la période fondamentale de la tour, la partie dynamique due aux charges de vent, les mouvements latéraux et les accélérations, et donc le risque d'inconfort.

Les périodes des 3 premiers modes propres de la tour étaient de 7,05 ; 6,80 et 2,17 secondes.

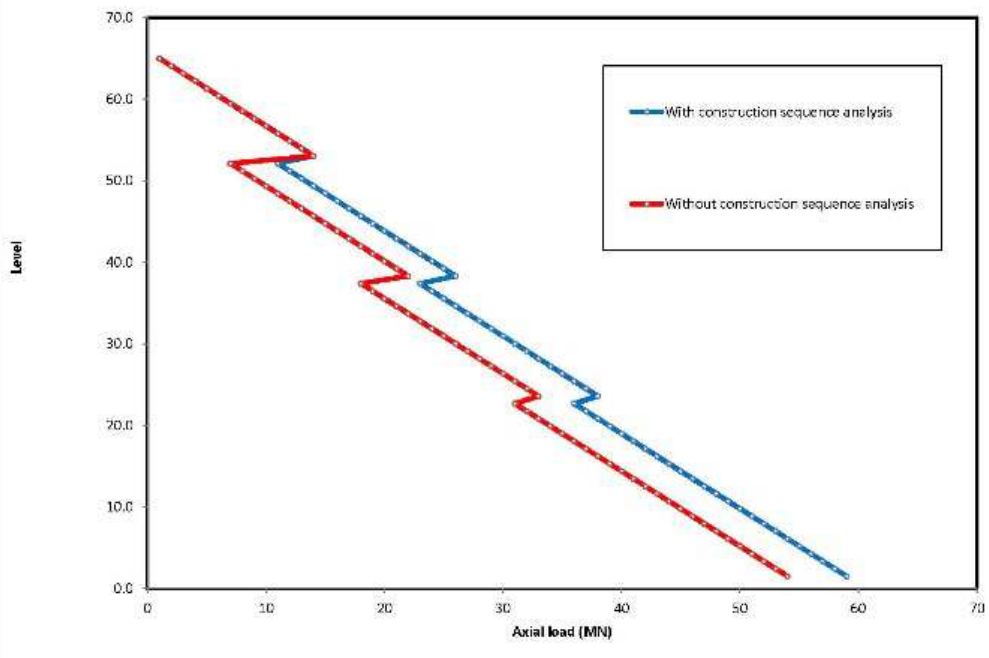

Fig.8. Impact de la séquence de construction sur les poteaux (Source Bouygues-Thai)

Phases de construction pour le système avec contreventement

Pour une telle structure, la répartition des charges provenant d'un modèle « wish-in-place » (non-phasé), aurait conduit à sous-estimer la descente de charges dans les poteaux de 10 % environ. En effet, la forte rigidité des outriggers aurait attiré une partie des charges gravitaires vers eux (voir § « charges verticales et latérales »), sous-évaluant ainsi la descente de charge dans les poteaux (Fig.8).

Report de la connexion des voiles « outrigger » avec les poteaux

Différentes études de sensibilité ont été menées au cours des études avec le logiciel ETABS pour estimer l'impact d'un report de la connexion des poteaux aux voiles « outrigger ».

Ces études ont montré que si on devait repousser la connexion des outriggers aux poteaux vers la fin de la construction, la réduction des efforts transmis aux outriggers ne serait que de 2,6 MN sur les 38,6 MN. Il a ainsi été décidé de ne pas reporter la connexion afin de ne pas impacter le cycle de construction. En effet, comme l'installation du mur-rideau suivait assez rapidement derrière le gros-œuvre, la connexion devrait alors être réalisée dans un espace « clos », rendant l'opération très difficile. De plus, tout report aurait eu un impact très important sur le raccourcissement différentiel entre les poteaux et le noyau central.

Raccourcissement différentiel axial entre les poteaux et le noyau central

Dans le cas d'un report de connexion des voiles « outriggers », une grande partie du poids propre aurait passé directement dans les poteaux, provoquant ainsi un fort déséquilibre au niveau des contraintes dans les méga-poteaux et les voiles du noyau central. Cet écart de contrainte aurait engendré un raccourcissement plus important pour les méga-poteaux par rapport au noyau central.

Les simulations ont ainsi montré que le raccourcissement différentiel dans ce cas aurait été d'environ 100mm et aurait conduit à une inclinaison du plancher inacceptable pour les éléments fragiles. Tandis qu'avec une connexion plus tôt, le raccourcissement différentiel n'était plus que de 5mm.

Dimensionnement des voiles « outriggers »

Les « outriggers » pouvaient être considérés comme des « poutres-voiles » en raison de leur rapport h/l. La méthode des « bielles-tirants » de l'Annexe A de l'ACI318-11 a été utilisée pour dimensionner ces éléments. Les efforts entrants et sortants obtenus à partir d'un modèle aux éléments finis ont permis de construire le modèle bielles-tirants (Fig.9). Une fois, le tracé des bielles-tirants défini, le ferraillage de ces poutre-voiles a été effectué en conséquence.

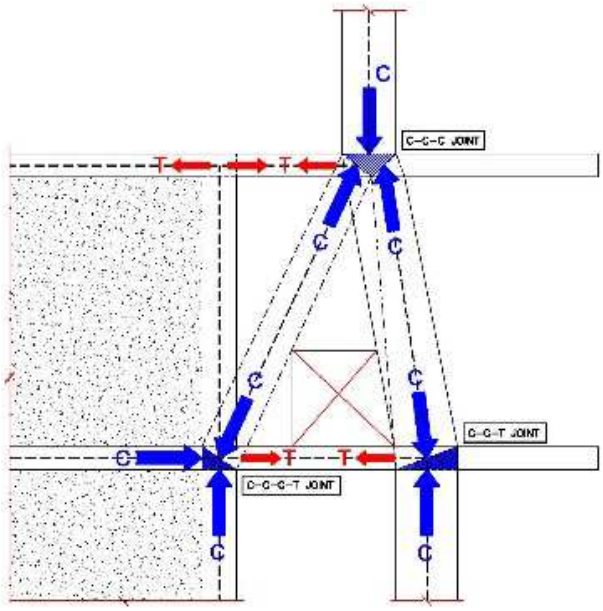

Fig.9. Modèle bielle-tirant. (Source Bouygues-Thai)

Contraintes liées aux « outriggers » pour le cycle de construction

La réalisation des « outriggers » et de la ceinture a impacté de manière significative le cycle de construction. Un voile « outrigger » avec un poids propre de 1,5 MN et un ferraillage très dense a nécessité 1MN de coffrages et un sous-étaiement de 8 à 14 étages. De plus, 48.000 coupleurs ont été nécessaires pour tous les niveaux de contreventement.

Planchers

Dalles en porte-à-faux précontraintes

La tour MahaNakhon présente une caractéristique dite de «pixellisation» qui lui donne une forme iconique du type de ruban d'emballage en trois dimensions autour de sa hauteur. Cette pixellisation est faite à partir de longues surfaces de plancher en porte-à-faux empilées comme le montre la Fig.10.

Fig.10. Pixellisation de la façade (Source image courtesy of PACE Development PLC)

Environ 30% de la superficie totale de plancher du projet MahaNakhon étaient en porte à faux en raison de cette pixellisation. En général, la portée des porte-à-faux dans les étages d'habitation était d'environ 8.0m. A certains endroits, elle allait jusqu'à 10 m. Le recours au béton précontraint a été la clé du succès. Ce système de posttension a été dimensionné et installé par VSL. En raison de la hauteur disponible, les poutres précontraintes appelées « band-beams» étaient relativement larges par rapport à leur épaisseur, comme indiqué dans la Fig.11.

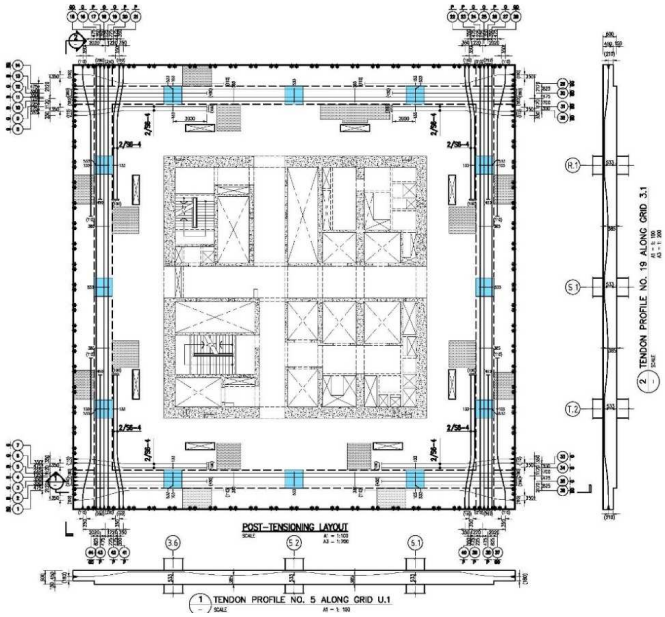

Fig.11. Plan des câbles de PT (Source Bouygues-Thai)

Contrôle de flèche pour la façade

Le mur-rideau de façade a été conçu pour être suspendu de plancher à plancher avec un joint horizontal spécial entre panneaux. Ce joint a imposé des critères les plus sévères pour la conception des planchers. En effet, le mouvement vertical relatif entre panneaux était limité à 25mm. Cependant, 6mm ont été réservés au raccourcissement/dilatation des parois vitrées lié à la température et au retrait/fluage du noyau central et des poteaux. Par conséquent, le mouvement relatif vertical admissible restant entre les panneaux de façade n'était plus que de 19mm.

Préréglage de la tour

Chargement asymétrique de la tour

La configuration de la partie haute de la tour se traduisait par un excentrement du centre de gravité vers l'ouest. L'analyse structurale a montré que due au « chargement asymétrique de la tour » des charges permanentes, la tour « se penchait » horizontalement à long terme d'environ 440mm vers l'ouest. A ceci s'ajoutait le déplacement horizontal dû aux actions du vent de 340mm, pour atteindre 780mm de déplacement total. Cette valeur étant supérieure à la limite pour le fonctionnement de l'ascenseur (H / 500), un procédé de « compensation active » durant la construction a été mise en place pour corriger ce déplacement latéral. L'estimation préliminaire lors de la conception a été réajustée avec des tests de laboratoire et des tests sur site (fluage, surveillance) afin d'affiner cette « correction géométrique » suivant le comportement réel du bâtiment pendant la construction.

Concrete strength (MPa)	ACI 8.5.1 Elastic modulus (MPa)	Laboratory Elastic modulus (MPa)	Applied stresses (40% of compressive strength, MPa)	Elastic strains based on ACI elastic modulus ($x10^{-6}$)	Creep & Shrinkage strains from test results ($x10^{-6}$)	Actual long term creep coefficients (based on ACI elastic modulus)
35	29 910	40 245	14	468	895	1.91
40	31 975	40 632	16	500	840	1.68
50	5 750	44 612	20	559	843	1.51
60	39 162	47 104	24	613	668	1.09

Tab.2. Résultats Module, Fluage et retrait

Essais de fluage

Ce calcul de « compensation active » a été initialement basé sur les courbes de fluages de l'ACI sans données spécifiques disponibles en Thaïlande. Bouygues - Thai a travaillé avec le King Mongkut University of Technology Thonburi pour développer un banc d'essai au fluage et une salle d'essai selon la norme ASTM C512. La température a été régulée à 23 °C ± 1 ° C avec une humidité relative contrôlée de 50% ± 4%. Les résultats des essais de fluage sont résumés dans le Tab.2. Le module d'élasticité de tous les échantillons de béton s'est révélé être plus important que les modèles réglementaires d'environ 15% à 30%, tandis que les courbes de fluage ont été relativement plus faibles que les celles du code.

Méthode de « compensation active » sur site

La verticalité de la tour a été contrôlée par laser. Le suivi et l'ajustement du coffrage glissant a été menée par des opérateurs de Bouygues-Thai. Afin de contrebalancer le déplacement horizontal vers l'ouest à long terme, la tour a été « corrigée » horizontalement vers l'est. Il n'y avait pas de correction pour la direction nord-sud. Un « suivi » a été mis en place pour surveiller les différents points de mesure et leur déplacement vers l'est. La Fig.12 donne la correction nécessaire pour les différents stades du cycle de construction.

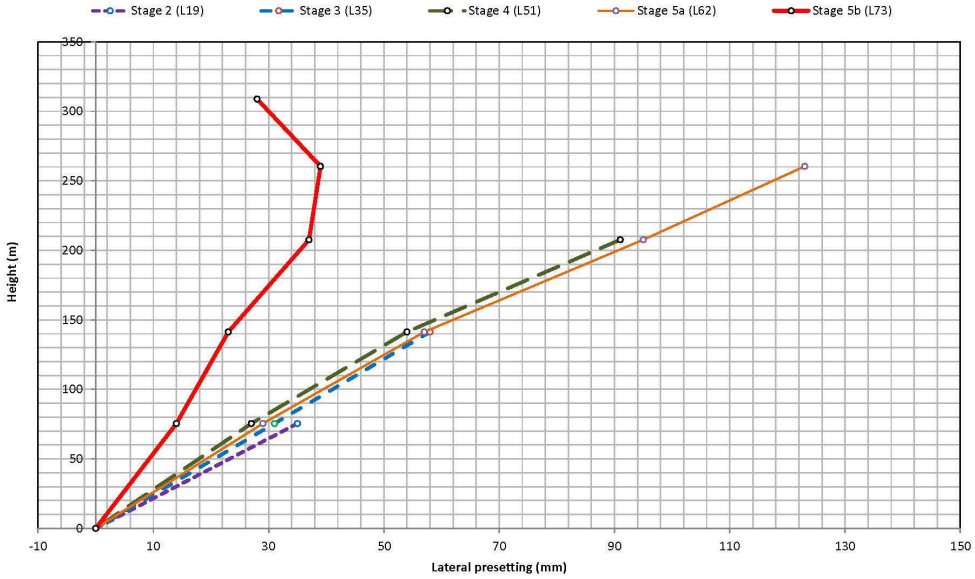

Fig.12. Compensation active latérale (Source Bouygues-Thai)

Les données réelles de la « compensation active »

Les données de la compensation active ont été enregistrées par l'équipe de production. Après le niveau 12, la compensation a commencé à être mise en œuvre. Entre le niveau 12 et le niveau 35, le résultat « moyen » de la correction relevé sur site a été d'environ 50% de la valeur cible comme le montre la Fig.13. Après le niveau L51, le résultat relevé est conforme par rapport à la valeur cible.

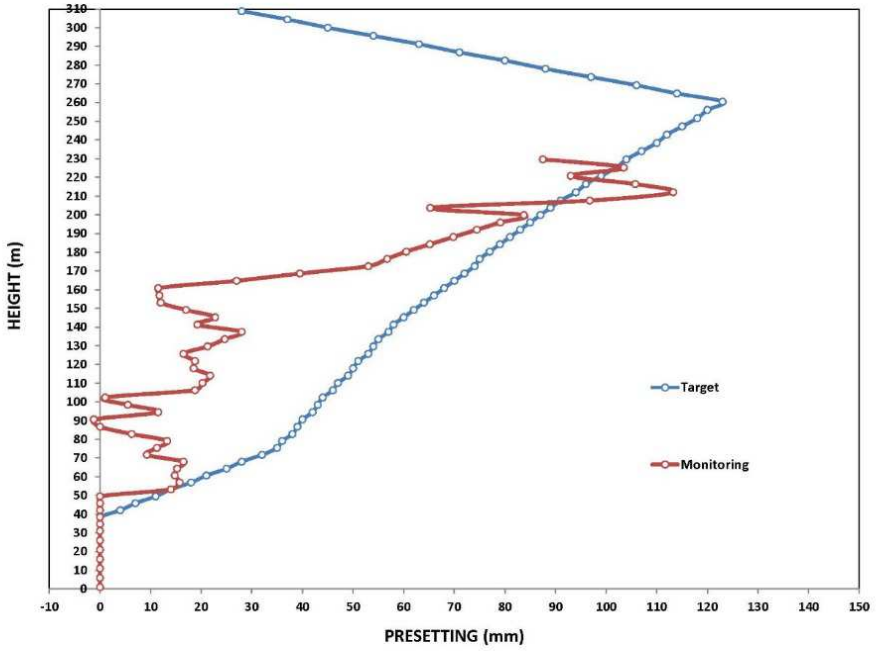

Fig.13. Objectif et suivi de la compensation active (Source Bouygues-Thai)

Le Tab.3 présente la compensation active prévue et les mouvements à chaque niveau par rapport à l'axe de référence. Les chiffres en couleur bleue dans les cellules diagonales donnent la position initiale du plancher lors du coulage du plancher. Les chiffres de couleur noire représentent la position de l'étage « attendue » lorsque les étages supérieurs ont

été coulés. Les chiffres de couleur rouge indiquent la position réelle de l'étage lorsque les étages supérieurs ont été coulés.

Par exemple au niveau 19, après coulage, la compensation était de 13mm vers l'est. Lorsque la dalle L31 a été construite, la position de la dalle 19 était censée passer de 13mm à 10mm, mais les relevées in-situ ne donnaient que 11.9mm légèrement moins important que prévu. Ce fut le même cas lorsque le plancher 35 a été coulé, le plancher au niveau 19 devait passer à 9mm alors que les relevées réelles enregistrées ne donnaient que 10,2mm.

Par contre, les relevées effectuées après le coulage du niveau 35 ont montré que la position des planchers « corrigée » a excédé les valeurs cibles. Cela n'était pas due à un changement des propriétés du béton, mais au fait que les voiles du noyau ont été coulés 10 étages au-dessus du plancher, ce qui était différent de l'hypothèse de l'analyse qui supposait que le noyau et les planchers étaient coulés en même temps.

Les résultats des tests de fluage, meilleurs que prévus ont permis de diminuer de manière significative l'amplitude des déplacements latéraux de la tour. La stratégie de « compensation active » a été basée sur ces essais.

Il a été décidé qu'à partir du niveau 66 le noyau pouvait être construit verticalement.

	Cast L19	**Cast L27**	**Cast L31 Monitoring 1 (Aug 21, 2014)**	**Cast L35 Monitoring 2 (Sep 12, 2014)**	**Cast L43 Monitoring 3 (Nov 10, 2014)**	**Cast L50 Monitoring 4 (Dec 10, 2014)**	**Cast L51 Monitoring 5 (Dec 17, 2014)**	**Cast L62**	**Cast L73**
L73									**N/A**
L62								**N/A**	
L51							**97**		
L50						**89**			
L43					**57**				
L35				**21**			17/14.1		
L31			**21**						
L27		**19**			14.5/17.1	13.3/9.5	14.5/6.3		
L19	**13**		10/11.9	9/10.2	7/3.8		5/-		

Tab.3. Suivi de la compensation active

Conclusions

Cet article a ainsi montré la nécessité au bureau d'étude de travailler en étroite collaboration avec les équipes de production. En adaptant les données réelles et les méthodes utilisées sur le site, les résultats d'analyses sont en effet plus pertinents et plus justes. Cette symbiose entre le chantier et le BE est donc une condition sine quoi non pour arriver à la réussite d'un projet aussi complexe.