



CONCEPTION ET CONSTRUCTION DE LA TOUR DE MAHANAKHON BANGKOK

BOUYGUES-CONSTRUCTION

DESIGN AND CONSTRUCTION OF MAHANAKHON TOWER – BANGKOK **BOUYGUES-CONSTRUCTION**

Docteur Kanokpat CHANVAIVIT⁽¹⁾, André LY^{(2)*}, Chloé CLAIR⁽³⁾

⁽¹⁾Ingénieur Structure - Chef de Service Structure Bouygues Thai (Bangkok)

⁽²⁾Ingénieur Structure - Chef de Service Structure Bouygues Bâtiment International (Paris)

⁽³⁾Directrice Technique de Bouygues Thai (Bangkok)

* Correspondant : a.ly@bouygues-construction.com

1. INTRODUCTION

La Tour Mahanakhon est en 2017 la tour la plus haute de Bangkok (Thaïlande) avec ses 314 mètres. Elle a été construite par les équipes de Bouygues-Thai, la filiale thaïlandaise de Bouygues Construction, suite à un appel d'offre international.

Cette tour est constituée de 12 méga-poteaux en béton armé et d'un noyau central de 23x23 mètres avec une réduction progressive à 23x14 mètres. Le contreventement est assuré par ce noyau central, ainsi que par des poutre-voiles « outriggers » en béton armé reliant le noyau central aux méga-poteaux, situés aux 3 niveaux techniques 19-20, 35-36 et 51-52.

Les dalles en béton armé sont portées 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 descente de charge totale de la tour Mahanakhon est de 3,000MN, qui se décompose en 2190 MN de poids propre, 460 MN de charges permanentes, 350 MN de charges d'exploitation. Ces charges sont reprises 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, ancrées sur la deuxième couche de sable de Bangkok. La structure de la tour est en voie d'achèvement (figure 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.



Figure 1 : MahaNakhon Tower on March 2016 (source PACE Development Corporation PLC)

2. LE RADIER

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

2.1. 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 ainsi été modélisée avec un ressort dont la raideur variait suivant la localisation de chaque barrette. 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 bielle-tirants ont été menées en parallèle

pour conforter le ferrailage du radier. La figure 3 montre le ferrailage du radier par les compagnons de Bouygues-Thai.

2.2. Contrôle qualité du béton du radier

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.

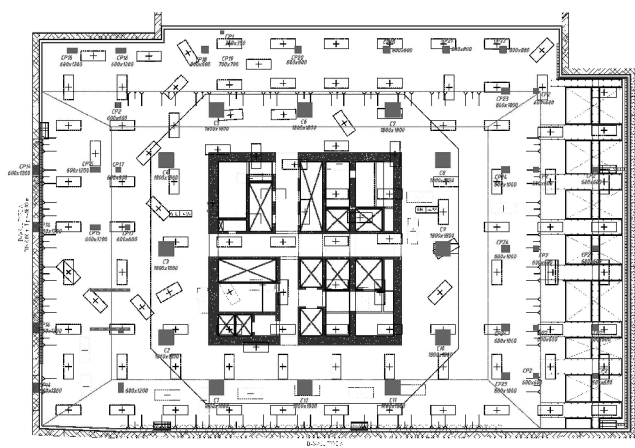


Figure 2 : MahaNakhon mat foundation/Plan de fondations (Source Bouygues-Thai)



Figure 3 : Reinforcement work of MahaNakhon mat foundation/aciers du radier (Source PACE Development PLC)

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 Figure 4.

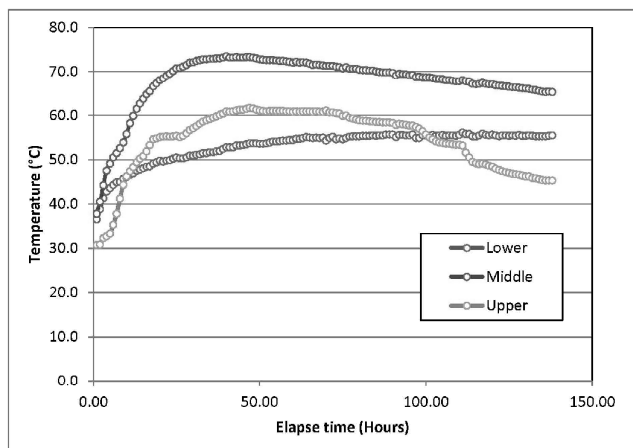


Figure 4 : Concrete temperature monitoring/Courbes de température dans le radier (Source Bouygues-Thai)

2.3. Phase de coulage du radier

La quantité totale de béton pour le radier est 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. Figure 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 0,8 mètre d'épaisseur, comme illustrée sur la figure 5, incluant des armatures de reprise des efforts de cisaillement. Douze heures de travail continu ont été nécessaires pour chaque coulage.



Figure 6 : Concrete trucks on the mat foundation casting date/ camions-toupie pour le radier (Source Bouygues-Thai)

3. LES MÉGA-POTEAUX ET LE NOYAU CENTRAL

3.1. Charges verticales et latérales

Sur la base des études préliminaires, il a été 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 liaison des « outriggers » aux poteaux.

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 ». Ce dernier a été utilisé pour analyser la réponse du bâtiment aux charges à court terme comme le vent

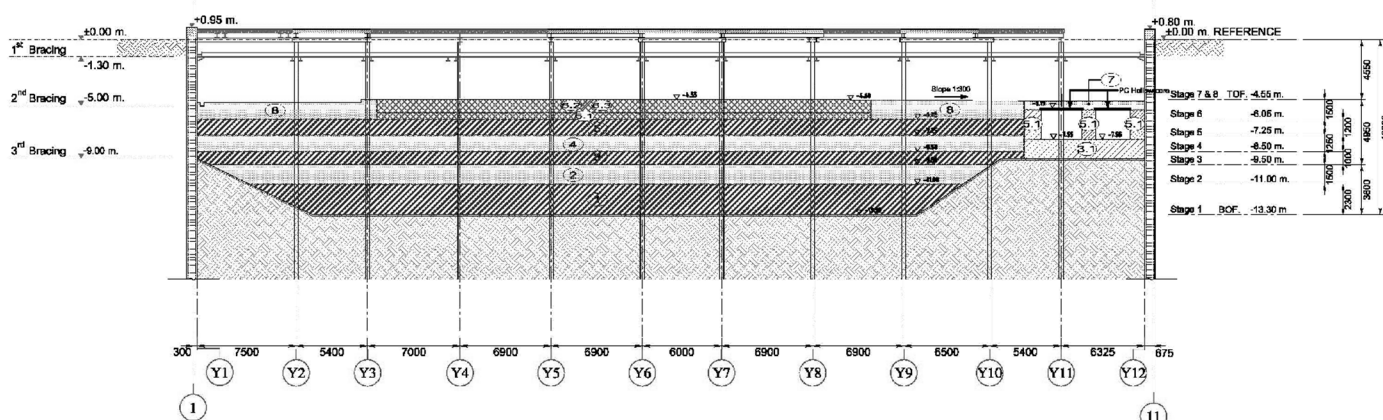


Figure 5 : Casting sequence of mat foundation/séquence de coulage du radier (Source Bouygues-Thai)

	Flexible foundation		Rigid foundation	
Construction sequence FE gravity system models	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		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	
Wish-in-Place FE lateral system models	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	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	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	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

Tableau 1 : Model details and naming system/Tableau récapitulatif des différents modèle FEM

et le séisme. Les conditions d'appui ont également été prises en compte selon deux hypothèses : raideurs souples et raideurs dynamiques des barrettes 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 tableau 1.

3.2. Performance sismique et vent

Le tableau 1 résume les différents modèles liés 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).

Les résultats de l'analyse sismique ont montré que le taux de capacité était toujours inférieur à 1,0 quel que soit la période de retour (2475 ans ou 475 ans). La figure 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 dépendait non

seulement 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.

4. LES 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.

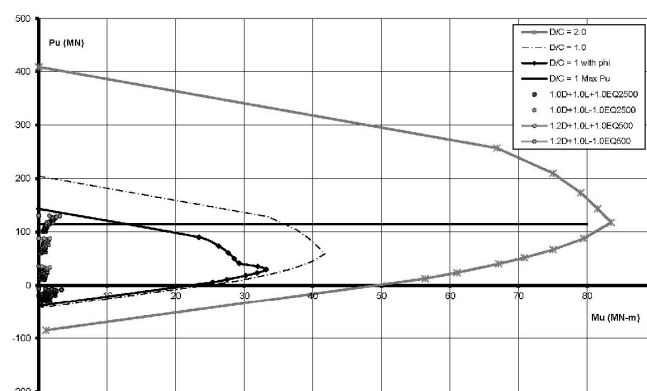


Figure 7 : Interaction diagram with CTBUH Appendix B/Courbe d'interaction CTBUH Appendix B (Source Bouygues-Thai)

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 sont de 7,05 ; 6,80 et 2,17 secondes.

4.1. Phases de construction

Pour une telle structure, la répartition des charges provenant d'un modèle « 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. Voir l'illustration sur la figure 8.

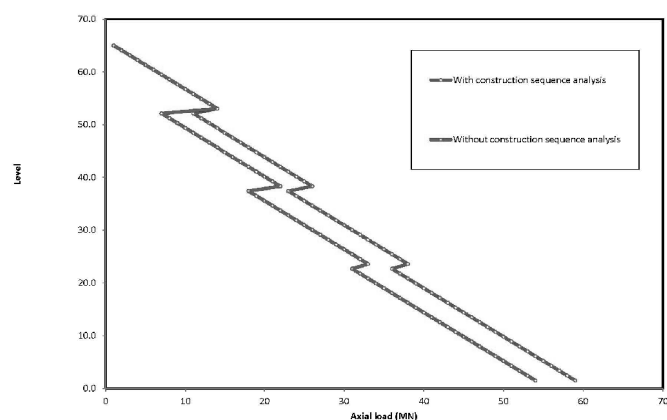


Figure 8 : Effect of a construction sequence in column loads/ impact de la séquence de construction sur les poteaux (Source Bouygues-Thai)

4.2. Report de la liaison des voiles « outriggers » avec les poteaux

Différentes études de sensibilité ont été menées au cours de l'étude avec le logiciel ETABS pour estimer le meilleur moment pour connecter les poteaux aux voiles « outrigger ». Ces études ont montré que si on devait repousser la liaison des outriggers aux poteaux à 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 différer cette liaison 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 liaison 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.

4.3. Raccourcissement différentiel axial entre les poteaux et le noyau central

Dans le cas d'un report de la liaison des voiles « outriggers », une grande partie du poids propre serait 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.

4.4. Dimensionnement des voiles « outriggers »

Les « outriggers » pouvaient être considérés comme des « poutre-voiles » en raison de leur rapport H/L. La méthode des « bielle-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 bielle-tirants (Figure 9). Une fois, le tracé des bielles-tirants défini, le ferrailage de ces poutre-voiles a été effectué en conséquence.

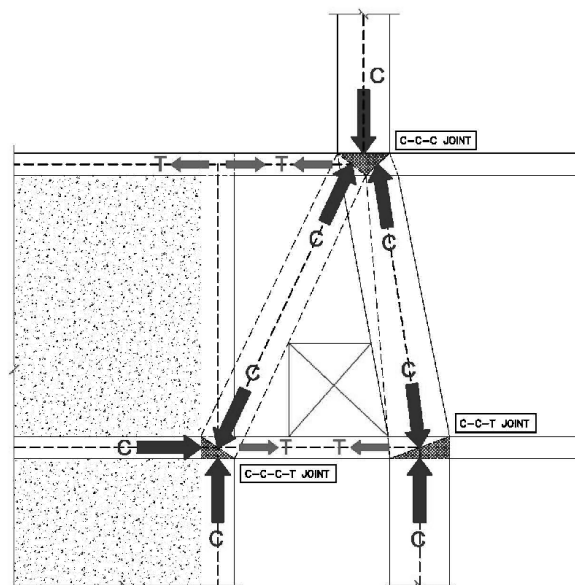


Figure 9 : Strut-and-tie truss model for the level 19-20 outrigger/ Modèle bielle-tirant. (Source Bouygues-Thai)

4.5. Contraintes liées aux outriggers pour le « cycle de la construction »

La réalisation des « outriggers » et de la ceinture reliant les 12 méga-poteaux a impacté de manière significative le cycle de construction. Un voile « outrigger » avec un poids propre de 1,5 MN et un ferrailage très dense a nécessité 1 MN de coffrages et un sous-étalement de 8 à 14 étages. De plus, 48.000 coupleurs ont été nécessaires pour les 3 niveaux de contreventement.



Figure 10 : Pixelation of MahaNakhon tower/Pixellisation de la façade (Source image courtesy of PACE Development PLC)

5. LES PLANCHERS

5.1. Dalles en porte-à-faux précontraintes

La tour Mahanakhon présente une caractéristique dite de « pixelisation » qui lui donne une forme iconique du type de ruban d'emballage autour de sa hauteur. Cette pixellisation est faite à partir de planchers en porte-à-faux comme le montre la Figure 10. 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 niveaux d'habitation était de 8m à 10 m. Le recours au béton précontraint a été la clé du succès. La précontrainte a été dimensionnée et installée par VSL. En raison de la hauteur disponible des niveaux, les poutres précontraintes étaient relativement larges par rapport à leur épaisseur, comme indiqué sur la figure 11.

5.2. Contrôle de déformation de 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.

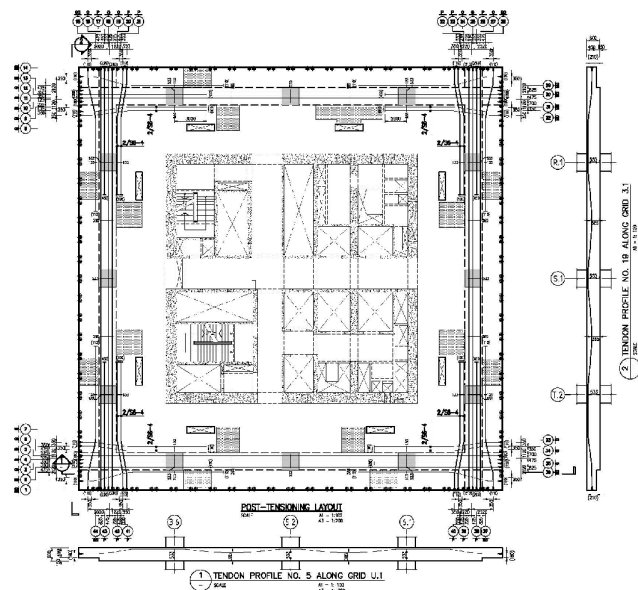


Figure 11 : Post-tensioning layout/ plan des câbles de PT (Source Bouygues-Thai)

Par conséquent, le mouvement relatif vertical admissible restant entre les panneaux de façade n'était plus que de 19mm.

6. COMPENSATION ACTIVE

6.1. 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 ($\times 10^{-6}$)	Creep & Shrinkage strains from test results ($\times 10^{-6}$)	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	35 750	44 612	20	559	843	1.51
60	39 162	47 104	24	613	668	1.09

Tableau 2 : Elastic modulus and creep & shrinkage test results/Résultats Module, Fluage et retrait

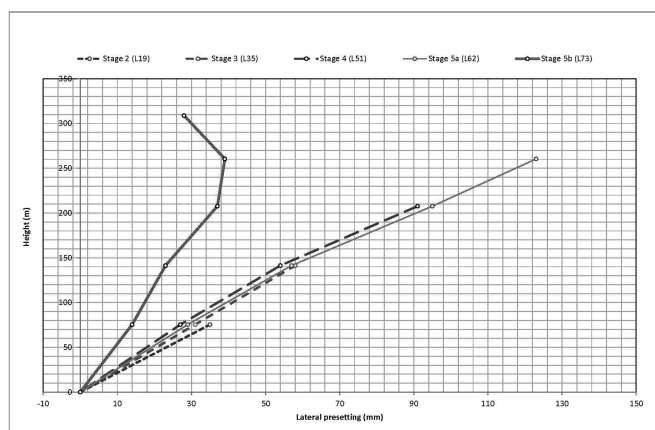


Figure 12 : Lateral pre-setting/ Compensation active latérale
(Source Bouygues-Thai)

6.2. Essai de fluage

Ce calcul de « compensation active » a été initialement basé sur les courbes de fluages de l'ACI par manque de donnée spécifique disponible en Thaïlande. Bouygues-Thai a aussi 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 réglée à $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ avec une humidité relative contrôlée de $50\% \pm 4\%$.

Les résultats des essais de fluage sont résumés dans le tableau 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 celles du code.

6.3. 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

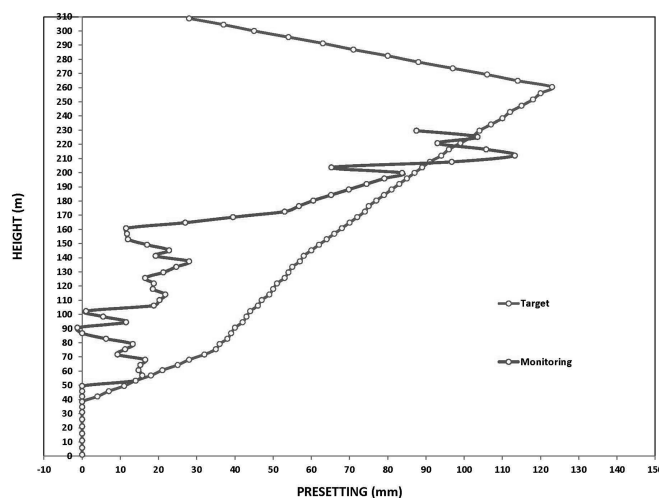


Figure 13 : Target and monitoring pre-setting / Objectif et suivi de la compensation active (Source Bouygues-Thai)

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 figure 12 donne la correction nécessaire pour les différents stades du cycle de construction.

6.4. Les données relevées in-situ

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 Figure 13. Après le niveau L51, le résultat relevé est conforme par rapport à la valeur cible.

Le tableau 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

	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/-		

Tableau 3 : Actual pre-setting monitoring / Suivi de la compensation active



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, ce qui était légèrement moins importants 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.

7. CONCLUSION

Les études et la construction d'un bâtiment de cette hauteur nécessitent non seulement une analyse poussée des différents phénomènes liés aux ouvrages de grande hauteur, mais aussi un bon travail collaboratif entre les équipes de production et le bureau d'étude.

En effet, en adaptant les données réelles et les méthodes utilisées sur le site, les résultats d'analyses sont plus pertinents et plus justes. Cette collaboration a été une des conditions pour arriver à la réussite de ce projet.