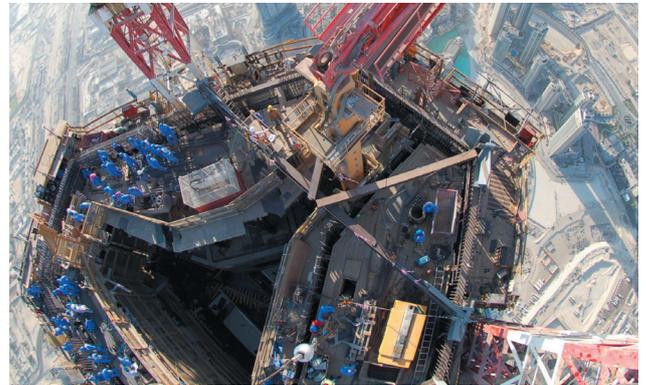


L'ingénierie géodésique appliquée à la construction des hautes tours

■ **Joël VAN CRANENBROECK**

Depuis la construction du Burj Khalifa à Dubai d'autres hautes tours ont vu le jour et le programme de tels ouvrages s'étend encore pour une décennie. Que l'on se questionne sur la valeur économique de tels ouvrages où que l'on ne partage pas cette vision urbanistique de construire des villes verticales, l'ensemble des techniques du génie civil, de l'équipement et de la topographie associée à la construction de ces hautes tours s'en est trouvée largement bénéficiaire. L'objectif de cet article est bien d'exposer la contribution de la topographie et de l'ingénierie géodésique non seulement lors de la construction mais aussi pour l'auscultation et la surveillance de ces immeubles. Si aujourd'hui la combinaison des technologies GNSS et des stations totales sont acceptées, le traitement des données, l'adjonction d'autres capteurs et l'interprétation des données représentent toujours un défi pour les ingénieurs topographes. La cause en est principalement que dans ce segment de marché, aucune tour n'est la simple reproduction de la précédente avec tout ce que cela impose comme nouveautés. CGEOS est engagé comme consultant pour la nouvelle tour de la banque nationale du Koweït et même s'il ne s'agit pas de battre les records de hauteur, l'édification de structures métalliques importantes autour des murs porteurs pose de réels problèmes en terme de verticalité de l'ensemble. Joël van Cranenbroeck fût un précurseur dans l'utilisation des méthodes d'ingénieries géodésiques pour la construction de la majorité de ces hautes tours en débutant avec le Burj Khalifa à Dubai en 2006. Depuis, l'approche méthodologique s'est enrichie avec l'expérience et c'est de cette expérience qu'il s'agit dans cet article.



■ MOTS-CLÉS

Topographie, GNSS, building, monitoring, auscultation, géodésie, ingénierie, Station Totale, Inclinomètre, verticale

Problèmes posés par la construction des hautes tours

Les hautes tours peuvent vaciller et s'incliner sous différentes contraintes induites principalement par la charge du vent, l'ancrage et le mouvement des grues et celles des pompes à béton. Idéalement, un tel mouvement devrait se centrer sur l'axe principal qui en l'absence de ces différentes contraintes laisserait la tour parfaitement verticale, mais des écarts sont également induits par les fluctuations des fondations, le retrait du béton et autres facteurs induits par la construction. Afin de garantir la parfaite érection d'une tour à la verticale lors de la construction, un contrôle complet et rigoureux de chaque nouvel élément érigé au-dessus des murs porteurs existants doit être réalisé.

Ces nouveaux éléments, et par conséquent les structures des coffrages auto-grimpants, doivent être précisé-

ment positionnés par rapport à l'axe principal du cadre de référence des calculs de structure, défini comme étant la "vraie" verticale de la tour.

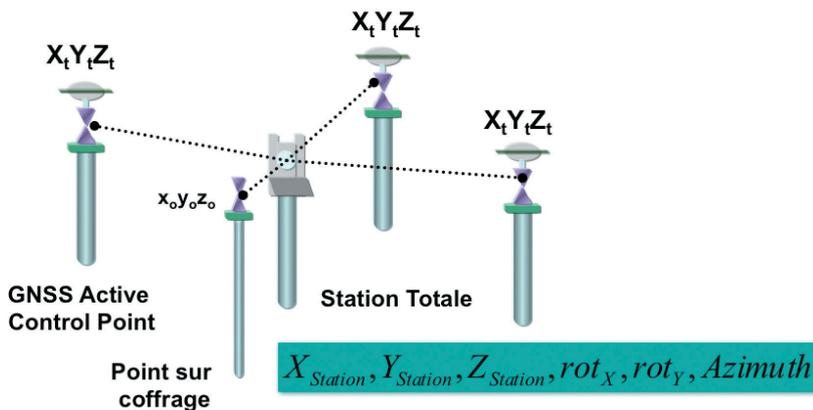
Cela signifie un contrôle continu, précis et fiable au fur et à mesure des différents stades de la construction. Généralement les spécifications en matière géométrique sont dictées par les installateurs des ascenseurs et la pose des parements. Dans le cas du Burj Khalifa, les ascenseurs sont de type "à grande vitesse" pour pouvoir emmener en moins d'une minute les personnes les empruntant du niveau 0 au 123^e étage !

Canevas géodésique

Généralement, les cahiers de charge précisent qu'un canevas de points de contrôle doit être édifié avant les travaux et contrôlés tous les mois. Si cela ne paraît pas poser de problèmes, la difficulté viendra de ce que les coordonnées WGS-84 délivrées par les récepteurs

GNSS doivent être transformées dans le système de représentation cartographique local.

Derrière ce qui peut paraître une opération de routine pour des ingénieurs topographes, se double une difficulté importante qui est celle d'avoir un canevas irréprochable pour pouvoir maîtriser la déviation de la verticale. En effet chacun sait que le GNSS se réfère à une surface ellipsoïdale alors que l'axe principal de ces tours se réfère à une surface physique, celle indiquée par le fil à plomb du maçon (surface géoïdale ou orthométrique). L'autre difficulté réside en ce que ce canevas de points de contrôle sera susceptible de mouvements induits par la construction elle-même sans compter les opérations d'abaissement de la nappe phréatique. Il est donc primordial d'engager dès le départ un dialogue avec les géo-techniciens pour comprendre non seulement la nature des déformations mais aussi de pouvoir les quantifier pour pouvoir



Le principe des "points GNSS actifs" entourant une station totale.

► dériver les méthodes d'observation ainsi que de qualifier l'instrument géodésique nécessaire.

Bien souvent, l'entreprise de construction voudra restreindre le développement de ce canevas de base au périmètre du chantier, alors que pour une tour de plus de 500 mètres de haut, on comprend qu'il faut au moins un réseau de points qui couvre ce rayon avec toutes les difficultés du maintien des repères tout au long de la construction.

Implantation des axes et contrôles – les points actifs GNSS

L'implantation des points et des axes issues des données de la conception (CAD/BIM) se fait généralement en utilisant une station totale dont la position et l'orientation se fait en mesurant des points établis lors du canevas géodésique. Si cette méthode est valable dans les immeubles de faible hauteur, pour les hautes tours, après la centaine de mètres de hauteur dépassée, les ingénieurs topographes se trouvent dans une situation où il n'y a plus moyen de réaliser ces visées.

Dans un bon nombre de cas, il suffit de placer et de déterminer les coordonnées de réflecteurs placés sur des buildings aux alentours de la construction en supposant que ceux ci seront stables et immobiles – ce qui n'est jamais le cas. C'est la raison pour laquelle lors de la construction du Burj Khalifa, nous avons innové en combinant des antennes et des récepteurs GNSS avec l'utilisation de station totale.

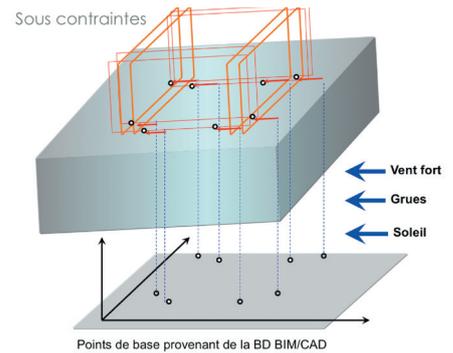
En vissant sur un prisme à 360° degré

une antenne GNSS, l'opérateur d'une station totale peut en la visant, obtenir les coordonnées précises 3D de celui-ci et réaliser un calcul de station en mode "libre". Généralement 3 points "actifs" sont nécessaires mais nous recommandons toujours de disposer d'au moins 4 points pour se ménager des contrôles.

L'utilisation du GNSS précis se réalise dans le mode différentiel et donc une station GNSS de base est indispensable. Celle-ci doit être suffisamment proche du site de construction mais en même temps hors de la zone de déformation. Généralement, on pense que la plateforme supérieure d'une tour en construction dispose d'une belle vue bien dégagée.

En réalité, les fers à béton sont de véritables écrans et les grues ainsi que les pompes à béton sont autant d'obstacles entre les antennes de réception des signaux GNSS et les satellites. Le résultat de ce constat se retrouve dans le traitement différé (post-traitement) des mesures issues des récepteurs GNSS où la fixation des ambiguïtés est souvent impossible si l'on ne considère qu'une approche statique. C'est pourquoi, la méthode de résolution "époque par époque" est de loin préférable, couplée à un filtrage des résultats, pour obtenir et qualifier une précision de quelques millimètres. Ce résultat est bien entendu fonction de la distance entre les récepteurs GNSS situés sur la plateforme supérieure et la station de base.

Si pour le Burj Khalifa on ne disposait que du GPS, l'adjonction des signaux de la constellation GLONASS a contribué significativement à la qualité des



La structure oscille sous l'effet des contraintes extérieures rendant l'implantation classique impossible.

résultats pour d'autres projets. Pour des chantiers situés au Moyen Orient et en Asie (où les projets se situent généralement) la nouvelle constellation BEIDOU en cours de déploiement par la Chine, représente une amélioration importante. Mais ce n'est pas tout, car la différence grandissante entre le niveau où est placé la station de base et les récepteurs GNSS situés sur la plateforme supérieure induisent une difficulté supplémentaire dans la modélisation correcte de l'effet de la troposphère. Ce qui paraît être de la topométrie devient un problème géodésique en plus de l'effet de la différence de la verticale comme invoqué pour l'édification du canevas de base.

Du plan de construction à la réalité

Les coordonnées issues du modèle CAD/BIM se réfèrent au plan de construction théorique, où pour chaque niveau il s'agit d'une projection verticale. Comme ces hautes tours oscillent (et pas nécessairement autour de l'axe principal dus aux différentes sollicitations internes et externes) il convient de prendre en compte la position réelle lors de l'implantation des points et des axes, sous peine de donner des valeurs qui sont déportées significativement. En pratique, la plateforme supérieure peut être déportée et donc les coordonnées des points à implanter seront hors alignement avec les éléments de construction déjà en place.

Pour contrôler et suivre les mouvements de la tour en construction, la mise en place d'inclinomètre de haute précision



Le système des "points GNSS actifs" illustrée par son application pour le Burj Khalifa, Dubai.



Le système des "points GNSS actifs" en oeuvre pour la tour CMA de Riyad, Arabie Saoudite

et de longue stabilité est requise et c'est un véritable réseau qui doit se mettre en place progressivement depuis les fondations jusqu'aux étages supérieurs. Les vibrations provoquées par les engins de construction (grues et pompe à béton) ainsi que toutes les activités inhérentes au placement des murs auto-grimpeurs sont autant de perturbations détectées par des inclinomètres. Il convient donc de filtrer les mesures à bon escient pour retrouver les oscillations géométriques et s'assurer que les inclinomètres ne subissent pas de dérives sans mentionner l'effet des gradients de températures.

Mesure de surveillance

Les fondations doivent être nivelées régulièrement en adoptant des méthodes de la micro-géodésie et si aujourd'hui, on dispose d'instruments automatiques comme le nivellement à

l'aide de jauge de pression (profilomètre), la connection avec les points de niveaux du canevas de base représente en soi des opérations délicates eu égard à la profondeur des fondations.

De plus le retrait du béton est important sur ces volumes mis en place, et pour le Burj Khalifa le retrait estimé était de plus de 65 cm sur une section complète. Cet effet a été remarqué pour la première fois lors de la construction des tours Petronas à Kuala Lumpur et s'est vérifié lors de la construction de la tour 101 à Taipei, Taiwan.

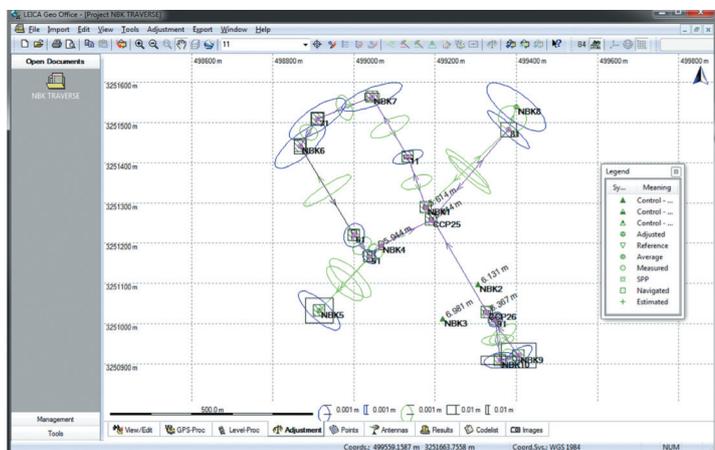
Il s'agit donc d'apporter aux niveaux successifs des corrections millimétriques afin de compenser (d'extrapoler) ce retrait. L'insolation des hautes tours en construction est également un facteur qui doit être analysé et il est étonnant de voir que des mesures réalisées par GNSS arrivent à mettre en évidence le mouvement de l'axe principal en fonction de la position du

soleil. De la topométrie à la géodésie en passant par l'astronomie, ces ouvrages de "génie civil extrême" représentent donc des défis réels pour les ingénieurs topographes.

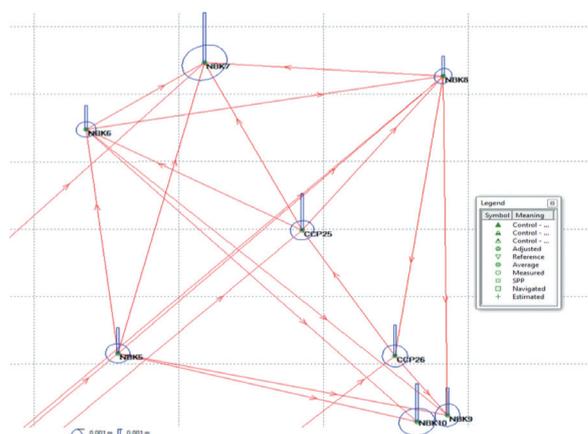
Remarques et observations

Nous avons eu l'occasion de participer à de nombreux chantiers relatifs à la construction de ces hautes tours et principalement ceux du Burj Khalifa à Dubai, la tour Al Hamra au Koweït, le Landmark à Abu Dhabi avec les tours jumelées de ADNOC, la tour CMA à Riyadh, les tours jumelées Lamar de Djeddah, le Shard of Glass de Londres, la tour Lotte de Séoul, la tour Skytree de Tokyo ainsi que d'autres projets comme la Freedom Tower à New York, qui se sont directement inspirés de la méthode exposée ci-avant.

Il est certain que pour une entreprise de construction l'ensemble des inves-



Réseau géodésique de base (Station Totale) développé pour la nouvelle tour NBK au Kuwait.



Réseau géodésique de base pour la nouvelle tour NBK au Kuwait observé par GNSS statique.



Les 3 points actifs GNSS sur la plateforme supérieure de la nouvelle tour NBK au Kuwait.



tissements dans l'instrumentation mentionnée représente un budget souvent mal évalué avec les risques que cela représente de ne pas pouvoir maîtriser le projet au niveau du génie civil. On trouve des buildings à Moscou par exemple où il n'y a pas d'ascenseur et la cause provient de la non verticalité de l'axe principal de la tour.

Disposer d'une instrumentation géodésique est une chose, avoir les compétences pour les mettre en œuvre en est une autre et il devient rare de trouver des ingénieurs topographes qui parviennent non seulement à mettre en œuvre ces outils et les logiciels, mais qui parviennent à innover lorsque les difficultés se présentent.

Le prix des récepteurs et des antennes GNSS devient de plus en plus abordable sans concession (que du contraire) par rapport à la qualité des mesures. Des logiciels "libres" comme la librairie RTK-LIB, fournissent des résultats comparables avec leurs équivalents commerciaux de nouveau avec la même qualité au niveau des résultats. Nous avons ainsi comparé les résultats obtenus avec la librairie RTK-LIB et le logiciel développé par Leica Geosystems LGO sans trouver la moindre différence et en disposant de fonctions plus avancées quand aux paramètres de traitement et pour l'analyse des résultats.

Des stations totales équipées avec des mesureurs de distance sans contact suffisent largement. Les dispositifs de mesure automatique (station totale motorisée) sur les réflecteurs facilitent les opérations mais souvent les topographes opérant sur ces chantiers préfèrent viser manuellement les prismes. Il n'est donc pas indispen-



Peter Bruce, Chief Surveyor GNSS operations, sur la tour NBK au Kuwait. (à droite)

sable de gonfler le budget instrument pour acquérir le nec plus ultra. Les inclinomètres à double axe sont certainement la partie de l'instrumentation qui a suscité le plus d'investigation. Nous avons constaté par exemple lors de plusieurs projets que le NIVEL200 de Leica Geosystems présentait des dérives. Celles-ci sont somme toute assez compréhensibles, puisque le capteur du NIVEL200 n'est autre que le même qui sert de compensateur pour les stations totales. Si pour

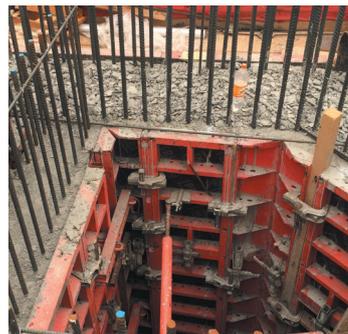


Control des coffrages des murs porteurs à l'aide d'une station totale utilisant les points actifs GNSS - Tour NBK au Kuwait

mettre en station et pour une période de temps relativement court ce type de compensateur suffit largement, il n'en va pas de même pour les mesures de surveillance à long terme. La calibration et le placement de ces inclinomètres représentent aussi une mise en œuvre délicate. Les températures rencontrées peuvent osciller entre quelques degrés en hiver au Koweït et plus de 50° degrés Celsius en été. Le NIVEL200 n'est pas compensé pour cette plage de température.

RESULTS OF GNSS CONTROL NETWORK INTO KTM COORDINATES SYSTEM 10/09/2014										
Point ID		Easting	Northing	Alt	α Easting	α Northing	α Alt	α Pos	α H	Orient.
BBH1	10/09/14 07:56	493809,778	3245814,453	13,363	0,002	0,003	0,004	0,001	0,001	- 8° 07' 07.7"
CCP25	10/09/14 07:56	499190,101	3251257,582	5,644	0,002	0,005	0,005	0,001	0,001	48° 37' 07.5"
CCP26	10/09/14 07:56	499327,762	3251028,536	6,367	0,002	0,004	0,005	0,002	0,001	- 16° 07' 44.8"
NBK10	10/09/14 07:56	499360,495	3250908,547	6,595	0,003	0,005	0,006	0,002	0,002	74° 36' 00.0"
NBK5	10/09/14 07:56	498915,199	3251032,787	7,097	0,002	0,004	0,004	0,001	0,001	- 70° 47' 09.5"
NBK6	10/09/14 07:56	498867,416	3251441,318	6,304	0,002	0,003	0,004	0,001	0,001	64° 01' 16.5"
NBK7	10/09/14 07:56	499043,825	3251563,652	4,470	0,003	0,007	0,008	0,003	0,002	50° 21' 13.2"
NBK8	10/09/14 07:56	499400,044	3251538,791	4,597	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	34° 08' 36.3"
NBK9	10/09/14 07:56	499405,911	3250919,812	7,203	0,002	0,004	0,004	0,002	0,001	16° 24' 13.8"
RESULTS OF GNSS CONTROL NETWORK INTO KTM COORDINATES SYSTEM 10/09/2014										
EXCLUDING POINTS CCP25, CCP26 AND NBK10 OF TRANSFORMATION										
Point ID		Easting	Northing	Alt	α Easting	α Northing	α Alt	α Pos	α H	Orient.
BBH1	10/09/14 07:56	493809,767	3245814,473	13,327	0,002	0,003	0,004	0,001	0,001	- 8° 07' 07.7"
CCP25	10/09/14 07:56	499190,102	3251257,577	5,648	0,002	0,005	0,005	0,001	0,001	48° 37' 07.5"
CCP26	10/09/14 07:56	499327,762	3251028,538	6,369	0,002	0,004	0,005	0,002	0,001	- 16° 07' 44.8"
NBK10	10/09/14 07:56	499360,496	3250908,548	6,593	0,003	0,005	0,006	0,002	0,002	74° 36' 00.0"
NBK5	10/09/14 07:56	498915,199	3251032,787	7,097	0,002	0,004	0,004	0,001	0,001	- 70° 47' 09.5"
NBK6	10/09/14 07:56	498867,416	3251441,318	6,304	0,002	0,003	0,004	0,001	0,001	64° 01' 16.5"
NBK7	10/09/14 07:56	499043,825	3251563,652	4,470	0,003	0,007	0,008	0,003	0,002	50° 21' 13.2"
NBK8	10/09/14 07:56	499400,044	3251538,791	4,597	0,001	0,003	0,003	0,001	0,001	34° 08' 36.3"
NBK9	10/09/14 07:56	499405,911	3250919,812	7,203	0,002	0,004	0,004	0,002	0,001	16° 24' 13.8"
Point ID		Δ Easting	Δ Northing	Δ Alt						
CCP25	10/09/14 07:56	0,000	0,005	-0,004						
CCP26	10/09/14 07:56	0,000	-0,002	-0,002						
NBK10	10/09/14 07:56	-0,001	-0,001	0,002						

Résidus obtenus après transformation 3D entre les points de base déterminés par station totales et observés par le GNSS statique.



Mesures de contrôle sur la position des coffrages avant le bétonnage. Une fois le bétonnage effectué, des mesures sont effectuées à nouveau pour vérifier la position effective des murs porteurs.

Prospectives

Comme nous l'avons évoqué, une des tâches principales des ingénieurs topographes engagés dans de tels projets est la mise en place des coffrages auto-grimpants et leur contrôle. Cela représente beaucoup de points de mesure dans des situations qui ne favorisent pas des longues opérations étant donné l'instabilité des supports.

Nous avons commencé une réflexion sur la possibilité d'équiper les structures de ces coffrages auto-grimpants avec des capteurs (inclinaison) permettant une mise en place plus simple, plus rapide et donc plus économique. L'adoption de ces nouveaux "coffrages intelligents" réduirait une partie des interventions des équipes de topographes en facilitant également le travail des ouvriers. Intervenir sur des plateformes qui peuvent être étroites et dangereuses n'est pas sans risque et nous pensons que c'est probablement dans ce domaine que nos méthodes peuvent évoluer.

L'usage des scanners laser (et surtout à courte distance) peut également être engagé et intégré dans les méthodes de travail bien qu'aujourd'hui il n'y ait eu à notre connaissance déjà des projets en bénéficiant.

Un des points que nous n'avons pas évoqué et qui s'est présenté sur plusieurs chantiers c'est tout simplement l'impossibilité d'opérer le GNSS pour cause d'obstructions induites par la présence d'autres tours. Dans ces cas nous avons recours systématiquement aux stations totales, mais disposant de fonctions particulières faisant appel à des commandes permettant de traiter directement la sortie du/des capteurs d'images. Les stations totales sont disposées au niveau du sol et les télescopes visent au zénith sur des prismes

disposés autour de la plateforme supérieure. On les a transformées en plomb laser intelligent !

Enfin, il reste beaucoup à développer dans l'analyse des données et principalement dans la constitution de modèle de déformation dynamique et en temps réel, intégrant les données géométriques mais aussi les données géotechniques.

Conclusion

L'engouement pour l'édification des hautes tours va probablement encore durer une bonne dizaine d'années au cours desquels il ne sera pas surprenant non seulement d'atteindre la hauteur du kilomètre (Tour du Roi à Djeddah) mais bien d'atteindre ou de dépasser les 2000 mètres. Il ne nous appartient pas de juger l'à propos de tels projets mais d'en retirer – comme toute construction hors norme – de nouveaux défis et de contribuer au progrès de l'ingénierie géodésique.

Au cours de ces nombreuses missions au "pays des hautes tours" nous avons rencontré des ingénieurs topographes remarquables et qui opéraient dans des conditions à peine imaginables. Les températures maximales avoisinent les 48 degrés Celsius et le taux d'humidité varie régulièrement. Là où pour des raisons sociales, les ouvriers sont en pause pendant les heures les plus chaudes, les ingénieurs topographes en profitent pour contrôler les mesures et installer de nouveaux points de contrôle. Le plus remarquable c'est que la contribution de la topographie et de la géodésie est non seulement respectée mais suscite le plus grand respect de la part des ingénieurs et des architectes, ce qui représente avouons le une belle récompense lorsque l'on sait que pour bien d'autres missions, le topographe

entre souvent par les fondations et les quitte par la porte de service. ●

Contact

Joël VAN CRANENBROECK,
Managing Director de CGEOS
joel@creative-geosensing.com

ABSTRACT

Since the construction of the Burj Khalifa in Dubai, other towers have sprung up and the program of such iconic building also extends for a decade. That one wonders about the economic value of such works and wherever you do not share this vision of urban construction of vertical cities, the entire civil engineering techniques, equipment and surveying associated with construction of these towers are found largely beneficial. The objective of this paper is to present briefly the contribution of surveying and geodetic engineering not only during construction phases but also for the monitoring of these buildings. If today the combination of GNSS technologies and total stations are accepted, data processing, the addition of other sensors and data interpretation are still a challenge for survey engineers. The reason is mainly due to the fact that no tower is the same than the other one and for each new tower it's simply a new challenge. CGEOS is hired as a consultant to the new tower of the National Bank of Kuwait and even if that tower is not going to beat another height record, the building of large metal structures around the core walls poses real problems in terms of verticality for the whole structure. Joël van Cranenbroeck was a pioneer in the use of geodetic engineering methods for building the majority of these towers by starting with the Burj Khalifa in Dubai in 2006. Since then, the methodological approach has been enriched with the experience and that paper is reporting about practical experience.