

La mesure du mont Blanc



© BF

Bernard FLACELIÈRE - Michel KASSER - Vincent GAILLARD - Farouk KADDED - Paul CHAMBON - Delphine GUILLON

Galop d'essai chez les Helvètes, le 6 septembre

Des cordées louvoient dans l'obscurité entre les crevasses, les crampons crissent sur la neige glacée, la pose du piolet rythme le pas et bientôt l'éclairage de la frontale ne sera plus utile. Il est près de 7 heures et une halte s'im-

Depuis 2001 et tous des deux ans l'altitude du mont Blanc est mesurée par les géomètres-experts de Haute-Savoie (initiative de la chambre départementale) et par leurs confrères invités d'autres régions de France, accompagnés par les sociétés partenaires comme Leica Geosystems, Exagone Teria et Covadis. Également un modèle 3D de la calotte au-dessus de 4800 m est relevé. Cette année l'Association française de topographie, en la personne du rédacteur en chef de votre revue, a été invitée à participer à la mesure. Comme l'organisateur de l'événement nous l'a confié : c'est une "belle aventure humaine, sportive, technique avec cette capacité unique à fédérer le meilleur de nous tous". Emmenons donc le lecteur à l'assaut du point culminant de l'Europe occidentale et laissons parler certains protagonistes de l'expédition du 9 septembre 2015. Ses résultats, et c'est une première, seront comparés à ceux du 31 mai qui précède.

MOTS-CLÉS

GNSS, Mont-Blanc, Géomètres-experts, Alpinisme, Altitude.



© Pascal Tournaire

Figure 1. Une cordée dans la voie des trois monts.



© BF

Figure 2. L'arête sommitale, voie des Bosses.



pose au voisinage de l'arête neigeuse, maintenant ensoleillée, qui butte sur les rochers roux. Thermos et fruits secs sortent des sacs à dos et les langues se délient. Guides de haute montagne, alpinistes confirmés ou montagnards débutants, la vingtaine de participants vont apprendre à se connaître.

Nous sommes en Suisse à Saas Fee sur l'arête est de l'Allalinhorn, un sommet de 4027 m du canton du Valais. Le but de cette ascension dominicale est de s'entraîner, de réviser les notions d'encordement et de marche en crampons et surtout de s'acclimater à l'altitude.

La montée sur l'arête neigeuse se déroule sans encombre, mise à part la gêne de nombreuses cordées Suisses de cette fin de semaine. Elles occasionnent un bouchon au pied de la partie délicate de la voie, un raide ressaut rocheux que l'on franchit crampons aux pieds. L'arête finale nous accueille, avec une vue en balcon sur le Cervin, et en répétition pour le grand jour la banderole est déployée. Verdict des guides : *"ce sera tout bon pour le mont Blanc"*. Mais il reste maintenant à concocter les équipes, d'abord celle qui arrivera via l'aiguille du Midi et son téléphérique, le refuge des Cosmiques à 3594 m, l'épaule du mont Blanc du Tacul, l'épaule du mont Maudit, le col de la Brenva pour arriver au mont Blanc. C'est ce qu'on appelle la voie des trois monts (Figure 1). La deuxième équipe,

comprenant l'auteur de ces lignes, montera au refuge du Nid d'Aigle depuis les Houches par le téléphérique et le train du mont Blanc, puis gagnera le refuge de Tête Rousse à 3167 m après 2 heures de marche. Elle enchaînera le lendemain la voie normale par le refuge du Goûter, le dôme du Goûter et l'arête des Bosses (Figure 2), cette voie est aussi appelée la voie Royale. Les deux équipes redescendront par cette même voie normale.

Le sommet par l'arête des Bosses, le 9 septembre

La nuit est courte au refuge de Tête Rousse car un départ vers 3 heures est

programmé. Les gestes tâtonnent à la recherche des textiles multi-couches, superposition de vêtements nécessaires à la lutte contre le froid, le petit déjeuner est vite avalé, pour ceux qui peuvent. Le thermos est rempli, les vêtements supplémentaires sont tassés au fond du sac à dos, le matériel topographique est réparti. La nuit est claire. Il s'agit maintenant de rejoindre la rive droite du grand couloir du Goûter, puis de le traverser. L'endroit est réputé pour les blocs cyclopéens qui y dévalent quand le redoux les descelle de leur gangue de glace. Ecouter, observer puis y aller, traverser sans courir mais sans traîner non plus. Étonnamment il n'y a pas un pouce de neige alors qu'en d'autres années nous marchions sur un sentier de neige. Nous voici sur l'arête rocheuse qui va nous conduire au refuge du Goûter et il faut rester concentré, car le risque existe, aussi les groupes sont toujours encordés. Déjà 2 heures de montée puis le cheminement butte sur l'ancien refuge, nous suivons alors vers la droite sur une centaine de mètres des cordes de sécurité qui bordent le précipice pour arriver au nouveau refuge du Goûter. Une halte bien méritée dans le sas d'accueil nous permet de nous réchauffer et de regagner de l'énergie. Mais ne tardons pas, nous avons rendez-vous au sommet à 10 h pour les mesures. Maintenant nous traçons vers le dôme du Goûter en gravissant des pentes débonnaires de neige, la nuit va laisser place à la lumière et nous passons la barre des 4000 m. Une chance, il n'y a pas de vent



Figure 3. La mesure du sommet.

© BF



lors de la halte au voisinage du dôme. Nous en profitons pour toiser avec respect le reste du chemin, le refuge bivouac (ou abri) Vallot et son observatoire voisin, l'arête des Bosses et l'arête sommitale qui se profilent. Deux heures après le refuge du Goûter nous passons au voisinage de Vallot à 4362 m. Nous gravissons ensuite les ressauts successifs de l'arête des Bosses. L'itinéraire est varié avec des portions assez raides et de fines arêtes. Deux murs doivent être surmontés et l'ascension continue par une longue arête de plus en plus effilée menant au sommet.

Au sommet du mont Blanc

Les cordées arrivent aussi de la voie des trois monts, la canne supportant le récepteur GNSS est déjà plantée à refus dans la neige au point sommital. Leica Geosystems s'est déjà activé pour lancer l'enregistrement qui durera 1 h 50 mn ainsi que la mesure TERIA en temps réel (Figure 3). Un rempart de sac à dos ceinturé de cordes entoure la zone du sommet pour empêcher les curieux de se rendre à tout prix sur celui-ci et ainsi perturber les mesures. Les équipes se congratulent et on remercie les guides de nous avoir mené à bon port. Il n'y a que la moitié de fait dit l'un d'eux, et il a raison car la descente est également source d'inquiétude, surtout la zone du Goûter.

Mais profitons du moment présent : certains se reposent et jouissent d'un paysage à couper le souffle, d'autres commencent le levé de la calotte. Avec un compagnon qui brandit la canne surmontée du récepteur, j'opère au contrôleur et tous les 3 mètres, le long de profils parallèles à l'arête sommitale, nous nous arrêtons pour enregistrer un point de détail. D'autres prennent la relève, l'hélicoptère chargé des prises de vues nous survole, la banderole est déployée (Figure 6), on ne s'ennuie pas au sommet du mont Blanc. Bientôt certains guides commencent à sonner l'heure du départ, certainement pour les passagers dont ils estiment que la descente sera longue. Les participants les plus vaillants, ou les plus jeunes, restent sur place pour compléter les travaux.

Le bêtisier du mont Blanc

La lecture de la revue de presse est un pur délice pour les géomètres, les topographes et les alpinistes. En effet perles et pépites étincelles au détour de chaque page.

Dans "20 minutes" 09/09 : *"Le vent, les précipitations et les passages répétés des alpinistes auraient en revanche une réelle incidence sur l'altitude de la calotte sommitale"*. Que les alpinistes arrêtent de marcher pour ne pas tasser le mont Blanc.

Dans "Le Parisien" 11/09 : *"La baisse du toit de l'Europe entre 2013 et 2015 a, en tout cas, un point positif "Les alpinistes doivent maintenant faire un 1,29 m de moins pour atteindre le sommet. Cela fait donc moins d'effort. Or c'est toujours le dernier mètre qui est le plus difficile"*, plaisante Jean Marc Peilleux, le maire de Saint-Gervais... Il faut donc mettre à jour les durées d'ascension.

Dans "FranceSoir.fr" 10/09 : *"Pour cette nouvelle mesure, prise en deux temps, les scientifiques ont chaussé leur chaussure mardi 8"*. Avec une seule chaussure, ça va moins bien marcher, forcément.

Dans "Tribune de Genève" 11/09 : *"Pour obtenir ces chiffres, l'expédition se rend à pied au point culminant, y dépose un GPS de haute précision qui se coordonne avec le réseau français GPS TERIA, mis en place par les géomètres-experts. Ce qui permet d'obtenir le différentiel entre le niveau de la mer et l'altitude du Mont-Blanc. Tout simplement !"*. Heureusement que la chose est simple, car il faut y aller à pied.

Dans "l'Essor Savoyard" 10/09 : *"Composée de 23 alpinistes aguerris, l'expédition de géomètres-experts de Haute-Savoie envoyée hier, mercredi 9 septembre 2015, par l'Institut national de l'information géographique et forestière, au sommet du mont Blanc est revenue avec la nouvelle altitude du toit de l'Europe occidentale..."*. Les GE aux ordres de l'IGN, retour à l'envoyeur ?

Repris par "Weekly.fr" : *"C'est pourquoi une expédition d'experts-géomètres de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) part à l'assaut du sommet régulièrement pour suivre ces variations"*. C'est sûrement difficile à comprendre pour un journaliste la différence entre OGE et IGN.

Dans "l'Essor Savoyard" 10/09 : *"Les pluies fortes et le vent faible permettent à la neige de s'accumuler sur le sommet..."*. Parapluie de rigueur au sommet, temps breton.

Dans "Yahoo ! Actualités" 10/09 : *"Lors de sa toute première mesure, le toit de l'Europe se trouvait 83 cm plus haut qu'aujourd'hui, c'était en 1685"*. Les historiens du centimètre à la rescousse, c'était 2426 toises donc 4728 m environ.

Dans "Yahoo ! Actualités" 10/09 : *"Combien mesure le Mont-Blanc ? La réponse est 4808,73 mètres. Soit 2 centimètres de moins qu'en 2013..."*. Et nous étions à 4810,02 m, bravo Yahoo !

La descente

Le chevauchement des arêtes des Bosses, à la descente, est un enchantement, abri et observatoire Vallot sont enchâssés sur leurs rochers et brillent de mille feux, les abîmes italiens et français se découvrent à chaque détour d'arête. Après des fruits secs et quelques en-cas grignotés devant l'abri Vallot nous continuons la descente neigeuse ponctuée par un arrêt bien mérité au refuge du Goûter où nous remettons la table, façon de parler. Mais il reste la dangereuse descente de l'arête rocheuse du Goûter suivie par la traversée du couloir. Redoublons donc de prudence, restons encordés et casqués car la fatigue aidant les pieds sont moins sûrs. Arrivés au

voisinage du refuge de Tête Rousse, certains guides nous quittent car ils sont appelés à d'autres fonctions, aussi nous descendons tranquillement sur le sentier encombré de gros blocs pierreux et de sympathiques chamois curieux. Au refuge du Nid d'Aigle où nous passerons la nuit, les alpinistes arrivent entre 17 h et 19 h, pour ma part ce fut un honnête horaire intermédiaire mais avec un sacré mal aux pieds. Déjà, des conciliabules entre Farouk Kadded et Paul Chambon indiquent que les données des stations de références de la vallée arrivent par courriel et que les calculs seront bientôt menés dès que les stations RGP auront délivré les leurs. Pendant ce temps-là goûtons donc un repos bien mérité, avec vue sur glacier de Bionnassay.



La conférence de presse, le 10 septembre

Avec une rigueur toute professionnelle la conférence de presse programmée à 11 heures se met en place. Les VIP, les invités, la presse commencent à monter du terminus du TMB (le train du mont Blanc) et arrivent au refuge après quelques minutes de marche. La salle à manger du refuge, débarrassée de ses tables accueille tout ce beau monde qui presse les alpinistes participants à l'expédition contre la banderole rapportée du sommet (Figure 4). Les calculs sont terminés et après les introductions de rigueur, Vincent Gaillard, l'organisateur annonce l'altitude calculée le matin même, 4808,73 m (soit 1,29 m de moins que deux ans auparavant) et surtout dévoile l'expédition confidentielle de 4 géomètres-experts alpinistes du 31 mai 2015 venus à ski par le versant italien. Cette mission a permis de mesurer le mont Blanc pour la première fois à la sortie de l'hiver et a affiché 4807,88 m. Malgré la canicule de cet été le sommet s'est donc engraisé de 0,85 m. Ceci est confirmé par la mesure du volume de la calotte au-dessus de 4800 m, elle mesurait 18 120 m³ en septembre contre 13 395 m³ fin mai. Les températures étant toujours négatives, même en été, à cette altitude, il n'y a quasiment pas de fonte au mont Blanc, ou alors de seulement quelques millimètres quand il fait très chaud en plaine indique

Christian Vincent, glaciologue au laboratoire de glaciologie de Grenoble. "En 2004, des scientifiques avaient mesuré que la glace en profondeur au sommet du mont Blanc était à -17°C, ce qui correspond approximativement à la température annuelle moyenne de l'atmosphère à cette altitude. L'altitude du mont Blanc est essentiellement dictée par l'accumulation de neige, elle-même liée aux précipitations et au vent", a ajouté Christian Vincent. L'arête sommitale change ainsi de forme en fonction des conditions météorologiques. En 2009, le sommet était 34 mètres plus à l'est qu'en 2003. L'amplitude maximale constatée depuis 2001 est de 40 mètres. "Entre le 31 mai et le 9 septembre, il y a 10 mètres d'écart", stipule Vincent Gaillard. "Durant l'été, le sommet est revenu côté Saint-Gervais". Sur la terrasse du refuge, les conversations vont bon train, les journalistes questionnent les différents protagonistes de l'expédition pendant que boissons et petits plats circulent.

Après ces agapes bien méritées tous les protagonistes quittent le site du Nid d'Aigle et redescendent dans la vallée. Guère le temps de se doucher et de se changer, nous sommes déjà conviés à un "pré-apéro" au café Élévation, place de la gare à Chamonix, un bon moment de convivialité autour de breuvages rafraîchissants. À 18 h 00 sur l'auto-

radio de mon véhicule, connecté sur France-Inter, un roulement de tambour annonce l'altitude du mont Blanc. Puis la soirée se termine sur un événement prestigieux, un repas de grande qualité au restaurant le Matafan (du bien nommé hôtel du mont Blanc), entrecoupé de discours et d'interventions.

Je laisse la plume à Michel Kasser (HEIG-VD) qui saura nous rappeler l'histoire des mesures de l'altitude du mont Blanc. Puis Vincent Gaillard (OGE Anncy) nous montrera la face cachée de l'expédition, celle de la préparation et de la logistique, matérielle, financière et médiatique puis déroulera les archives des mesures. Place à la technique avec les contributions de Farouk Kadded (Leica Geosystems) et Paul Chambon (Exagone Teria) de fidèles partenaires de l'opération mais participants également. Pour terminer honneur à Delphine Guillon (OGE Lille), la seule féminine de cette expédition et première géomètre-expert à participer aux mesures. Débutante en alpinisme elle nous racontera sa fantastique expérience. ●

Bernard FLACELIÈRE, AFT

ABSTRACT

Since 2001 and every two years the altitude of Mont Blanc is measured by Chartered Surveyors of Haute-Savoie and their invited colleagues from other parts of France, accompanied by partner companies as Leica Geosystems, Exagone Teria and Covadis. A 3D model of the icecap above 4800 m is surveyed as well. This year the French Association of Surveying, in the person of the editor of your magazine, was invited to participate in the survey. As the organizer of the event told us: it is a "great adventure combining human, sports and technology with the unique ability to bring the best of us all." Let's take then the reader to conquer the highest peak in Western Europe and let tell some protagonists of this party, dated September 9 2015. Its results and this is a first, will be compared to those obtained in May 31st.



Figure 4. La conférence de presse au Nid d'Aigle.

© Pascal Tournaire

Historique des mesures de l'altitude du mont Blanc

Il semble que Jean-Christophe et Nicolas Fatio de Duiller furent les premiers à avoir mesuré la hauteur du mont Blanc en 1685, et leurs calculs de n'avèrent pas très éloignés de la réalité : 2426 toises au-dessus de la Méditerranée, soit 4728 mètres. Plusieurs savants en cours du XVIII^e s'essayèrent à cette entreprise et parvinrent à des résultats assez uniformes : de Luc 4 660 m, Pictet 4730 m, et finalement de Saussure 4775 m.

La découverte *in situ* du massif du mont Blanc a commencé avec les croquis de Pierre Martel édités en 1744, relatant le voyage aux Glacières. Malgré une diffusion limitée, ce document suscita la curiosité des esprits cultivés d'Angleterre et de Suisse.

1778 – C'est un sujet britannique, le cartographe William Faden, qui fait apparaître pour la première fois le patronyme mont Blanc sur une carte géographique (de la Suisse !)

1786 – Le genevois Horace-Bénédict de Saussure (*figure 6*) publie la première carte particulière du massif, consacrant définitivement le mont Blanc dans la



(Domaine public)

Figure 6. Portrait d'Horace-Bénédict de Saussure par Juehl.

cartographie alpine ; cette année-là le docteur Michel Paccard et son guide chamoniard Jacques Balmat atteignent pour la première fois le sommet, au matin du 7 août 1786.

Il faudra attendre la 2^e moitié du XIX^e et les cartographies de l'Écossais Forbes, alpiniste, homme de science, glaciologue et cartographe, pour arriver à une altitude précise de 4810 m, confirmée par les travaux de Favre et de Violet le Duc.

Le Capitaine Mieulet de Service Géographique de l'Armée a exécuté le lever topographique à l'échelle 1/40 000 du mont Blanc en 1863. À l'époque, l'altitude de la mire en bois, fichée sur le sommet, était de 4809,9 m. Cette cote figure en rouge sur la minute originale du lever. La cote neige était à l'époque voisine de 4807 mètres. L'erreur sur cette détermination ne peut être évaluée que de façon sommaire, aux alentours de 2 à 3 mètres, et elle est surtout due à des phénomènes de réfraction, toujours mal modélisée sur des distances aussi grandes.

De 1892 à 1925, les cousins Joseph et Henri Vallot procèdent au lever topographique détaillé de la chaîne du mont Blanc à l'échelle du 1/20.000^e, à partir de points trigonométriques répartis sur l'ensemble du massif ; l'altitude du mont Blanc, "sur l'observatoire Janssen, sommet de la tourelle, niveau de la neige au sommet" est de 4 807,2 m

Voici quelques extraits du guide Vallot 1924

L'observatoire Janssen fut monté au sommet du Mont-Blanc en 1893 "la construction était à deux étages et

Voici donc différentes mesures connues depuis le XVIII^e siècle :

Date	Détermination	Valeur en m
1775	Mesures trigonométriques effectuées par Shuckburgh, cotées depuis Genève	4787
	Après correction de la planimétrie par les IG (Ingénieurs Géographes) en 1840	4799,5
	Après adoption du coefficient de réfraction des IG (1840)	4806,5
1787	Nivellement barométrique par H.B de Saussure à partir de Genève et Chamonix	4775
1821-1823	Nivellement trigonométrique lors des opérations Austro-Piémontaises de Carlini et Plana	4801,9
	Recalculé avec les altitudes des IG	4811,6
1827-1829	Nivellement trigonométrique du Commandant Filhon, utilisant la triangulation de 1803-1804 du Commandant Coraboeuf	4810,9
1863	Levé topo du Capitaine Mieulet	4807
1892-1894	Nivellement trigonométrique de H. et J. Vallot	4807,2
1980	Restitution photogrammétrique spéciale de l'IGN	4807
1986	Positionnement GPS par l'IGN.	4808,4

▶ avait 7 mètres de haut, permettant d'accéder au toit en forme de terrasse. Cependant, l'observatoire s'enfonçait progressivement dans la neige. Chaque année, une couche nouvelle de neige durcie de près d'un mètre d'épaisseur s'ajoute au sommet du Mont-Blanc : mais le sommet ne s'exhausse pas, car le névé se tasse de la même quantité. "En 1900, la terrasse supérieure était descendue au niveau de la neige du sommet".

"En 1908, le sommet de la tourelle dépassait seul de quelques décimètres" "il fut constaté que l'observatoire était non seulement englouti et inhabitable, mais disloqué par la pression des glaces, une crevasse s'était formée dessous."

La mesure IGN effectuée en 1986 date des débuts du GPS géodésique, avec des récepteurs SERCEL. Elle a été effectuée par des mesures simultanées à Chamonix, à l'Aiguille du Midi et sur le mont Blanc. Il est raisonnable de penser

que sa précision était de l'ordre de 1 mètre : les récepteurs mesuraient sur une seule fréquence, il y avait peu de satellites, les orbites précises n'étaient pas accessibles, et le géoïde était encore assez mal connu.

C'est le 8 septembre 2001 qu'un groupe de géomètres-experts principalement Savoyards, avec le concours de Leica et de l'IGN, est allé porter les couleurs de l'OGE sur le toit de l'Europe, initiant une série régulière d'événements du même type au cours des années suivantes. Environ 100 min de mesures avec des récepteurs 2-fréquences ont pu être exploitées, avec un groupe de 4 stations temporaires (Les Houches, Contamines, plus les deux points du RBF Combloux et Montroc), 2 stations du RGP plus distantes (Lyon et Modane), et enfin le point fondamental suisse de Zimmerwald. Les calculs ont été menés avec le logiciel GPS de l'Institut Astronomique de Berne, en portant une extrême attention à la correction

troposphérique, et en optimisant au mieux les éléments de connaissance du géoïde. À l'arrivée, la détermination altimétrique a pu être fournie à mieux que 10 cm, à 4810,40 m.

L'exploitation de ces mesures altimétriques précises, initiées en 2001, n'a bien évidemment aucune incidence sur la connaissance des mouvements tectoniques verticaux des Alpes centrales (estimés à 2 mm/an dans cette région), puisque le sommet du mont Blanc n'est pas rocheux. C'est la surface naturelle de la neige qui est mesurée à chaque fois, son altitude varie selon les chutes de neige, et donc le moment de l'année, les températures, le vent, etc. Des variations interannuelles de l'ordre du mètre peuvent donc aisément être expliquées ainsi. ●

Michel KASSER

professeur de géodésie à la Haute École d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (HEIG-VD).



Figure 6. Au sommet du mont Blanc, la banderole

Organiser la mesure et le suivi du mont Blanc

Préambule historique

"Mesurer le mont Blanc : simple ! On pose un GPS et voilà !"... ce pourrait être la pensée d'une personne initiée aux techniques de mesures GPS.

Les plus belles choses sont les plus simples, encore faut-il les organiser et les penser. Géomètre-expert à Annecy et ingénieur ESGT, je vous propose une balade dans l'univers de la mesure du mont Blanc : historique de nos mesures, organisation, récapitulatif des mesures... L'altitude du mont Blanc a toujours fasciné les scientifiques. Une année après la première ascension du mont Blanc par le Docteur Michel Paccard et le guide Jacques Balmat, Horace Benedict de Saussure en effectue en 1787 la première mesure. Ce scientifique genevois trouva une altitude de 4775 m, pas si loin que cela de la mesure réelle. Une mesure plus précise établie en 1863 donne l'altitude de 4807, qui sera confirmée à plusieurs reprises. 230 années plus tard, nous mesurons toujours cette belle bosse, toit de la France et l'Europe, mondialement connu, qui domine la belle vallée de Chamonix.

Depuis 2001, les géomètres-experts de la Haute-Savoie organisent l'expédition et mesurent le mont Blanc.

Définition du Projet mont Blanc 2015

Tous les 2 ans, les géomètres-experts se remettent en question, essaient de faire mieux, d'innover, d'aller plus haut tout simplement, pour nous, pour nos sponsors, pour les scientifiques. En voici un rappel des principales dernières opérations, au-delà du résultat :

2009 : 5^e mesure – en partenariat avec Annecy 2018 et un impact médiatique énorme au niveau national avec une large diffusion sur le réseau télévisé et notamment TF1.

2011 : 6^e mesure - première mesure avec le réseau Teria, réseau de géo-référencement mis en place par l'Ordre des géomètres-experts, en direct du journal

de TF1 avec la présence de 2 journalistes de TF1 au sommet.

2013 : 7^e mesure - ouverture de l'ascension aux géomètres-experts non Haut-Savoyards, confirmation sur le réseau Teria et élaboration d'un film support pour la profession et nos partenaires.

Les géomètres-experts de la Haute-Savoie observent une constance : une attente accrue de l'altitude du sommet, notamment de la part des médias, qu'ils soient écrits ou télévisés. Encore une fois les géomètres-experts de la Haute-Savoie relèvent le défi en intéressant un maximum de personnes de la profession et en créant une dynamique, autour d'une mesure et d'une idée inédite.

En 2015, nous proposons de mesurer le mont Blanc, deux fois, à deux époques différentes et de tout simplement comparer ces mesures.

- Le premier mont Blanc, dit en mode hivernal, fin mai 2015, se fera juste après les chutes de neige et avant la fonte. Cette opération sera faite en mode réduit pour limiter l'impact budgétaire.
- Le second mont Blanc, dit en mode estival, en septembre 2015, juste après la période estivale et de "sécheresse". Cette opération, classique, verra à nouveau l'ouverture aux géomètres-experts d'autres régions, afin de fédérer la profession.

Le fil rouge 2015 est simple : comparer ces 2 mesures. Ceci n'a jamais été fait et personne ne connaît le résultat potentiel, d'ailleurs on le verra fort étonnant !

Organisation

L'organisation s'opère avec une équipe de 5 géomètres-experts Haut-Savoyards. Nous travaillerons pendant 6 mois à l'organisation et planification de l'événement. Les tâches principales sont les suivantes :

- Recherche des sponsors et partenaires techniques

- Définition d'un budget
- Axe de communication : toujours proposer mieux
- Volonté de s'ouvrir à l'extérieur
- Recrutement des personnes externes par appel à candidature
- Travail équipe avec les partenaires techniques et OGE pour la communication
- Choix itinéraire, coordination avec le guide de haute montagne, chef d'expédition, Serge Bazin.

Axe de communication

L'axe de communication est important pour un tel événement et nous avons décidé de communiquer sur les valeurs de l'OGE : Technicité – Précision - Garantie – Engagement. Ces termes seront repris sur notre banderole. Tout ceci est résumé en un seul mot : Géomètre-expert.

Un projet Humain - Sportif - Scientifique

22 personnes au sommet :

- 6 géomètres-experts de la Haute-Savoie
- 6 géomètres-experts
- 6 guides de Haute Montagne
- 1 photographe professionnel
- 3 partenaires techniques

Des partenaires : Ordre des géomètres-experts – UNGE, Réseau TERIA-Exagone, Leica Geosystems, Covadis, IGN

Un budget, une organisation, du temps...

Mont Blanc I – 29-30 mai 2015 – Mesure "hivernale". Effectuée en toute discrétion par la voie dite de Gonella, versant Italien, fin mai 2015, en ski de randonnée, elle nous a permis de mesurer l'altitude à une époque inédite. Cette expédition, en mode léger, est constitué de 6 personnes : 2 guides, 2 géomètres-experts Haut-Savoyards, un ingénieur de Leica Geosystems et un photographe professionnel.

Mont Blanc II – 8-9 Septembre 2015 –

► **Mesure "estivale".** 22 personnes iront au sommet par 2 itinéraires différents, afin d'assurer la mesure, et répartir les effectifs en fonction des niveaux d'alpinisme de chacun. Cette méthode a permis d'ouvrir le mont Blanc à la profession et de fédérer celle-ci.

Au préalable un week-end d'entraînement a été effectué au Buet (3096 m) fin août, et permettra de connaître les membres de l'expédition.

Les participants venant des 4 coins de France, nous avons décidé d'enchaîner dans la même semaine le week-end d'acclimatation avec le mont Blanc.

Le samedi 5 et dimanche 6 septembre, nous gravissons en Suisse le beau sommet de l'Allalinhorn (4027 m).

On enchaîne alors le mont Blanc le mardi et mercredi, la météorologie étant favorable.

Mardi 8 : Montée en refuge : 2 itinéraires en fonction des conditions : voie normale par le refuge de Tête Rousse et voie des 3 monts par le refuge des Cosmiques.

Mercredi 9 : sommet du mont Blanc en fin de matinée et redescente au refuge du Nid d'Aigle pour exploiter dans la soirée les résultats et préparer la conférence du lendemain.

Résultats des mesures

Une conférence de presse est organisée au Nid d'Aigle : ambiance montagne avec alpinistes de l'expédition en tenue, présence du bureau du conseil supérieur, médias nationaux tant journaux que chaînes TV, scientifique, élus.

Nous mesurons l'altitude mais aussi le volume de glace au-dessus du plan de comparaison 4800 m. Cette donnée est importante pour la communauté scien-

tifique, glaciologue et météorologue. En voici les mesures depuis le début de mesures en 2001 :

Date	Altitude	Volume en m3 Calotte sommitale au dessus de 4800m
01/09/01	4810,40	-
01/09/03	4808,45	14598
01/09/05	4808,75	14248
01/09/07	4810,90	24062
01/09/09	4810,45	21626
01/09/11	4810,44	21281
01/09/13	4810,02	20213
01/06/15	4807,88	13395
01/09/15	4808,73	18120

Tableau 1. Altimétrie du sommet et volume de la calotte sommitale

Les mesures 2015 et la comparaison hivernale / estivale ont tenu toutes leurs promesses.

Le mont Blanc est plus bas en sortie d'hiver qu'en période estivale.

85 cm de différence altimétrique, plus haut en septembre qu'en mai, alors que l'été a été caniculaire.

Même, Christian Vincent, glaciologue et ingénieur ESGT, n'en revient pas.

A quelques mois de la COP21, ce résultat surprenant montre bien que le réchauffement climatique n'a pas d'impact à cette altitude de 4800 m. Seul le vent, lié aux précipitations et à la cohésion de la neige, forment les paramètres de la calotte et altitude du mont Blanc. L'altitude du mont Blanc varie, tel le poids d'un homme, entre 4807 m et 4811 m. Et même si une droite de régression linéaire semble se dégager de ces jeunes données (figure 7), il convient d'être prudent dans une extrapolation.

Les géomètres-experts établissent par ses mesures régulières une banque de données, et travaillent donc pour nos futures générations.

En l'an 5000, nos arrière-petits-enfants auront au moins la certitude que le mont Blanc mesurait 4808 m environ et non pas 4820 m ou 4797 m !

Évolution planimétrique – Déplacement planimétrique

Ci-dessous le graphique des déplacements horizontaux du sommet du mont Blanc au fil des années (figure 7).

En rouge, figure l'arête du mont Blanc telle qu'elle a été modélisée en 2007.

Si le sommet se déplace de manière importante sur cet axe avec une amplitude maximale de 34,30 m entre 2003 et 2009, son déplacement perpendiculaire est insignifiant.

Ce graphe permet de certifier que seul le vent façonne la belle arête sommitale de plus haut sommet d'Europe.

Conclusion

Au-delà des conclusions et débats scientifiques, nous tenons à rappeler que ce mont Blanc est un vrai défi tant humain, sportif, environnemental, que scientifique mais aussi technique pour le matériel. Même si cela n'est jamais arrivé, nous ne sommes jamais sûrs d'arriver en haut du sommet et de le mesurer, la météorologie, les conditions en montagne auront toujours raison. Rappelons aussi que monter au mont Blanc est un vrai engagement, qu'il est nécessaire de connaître le milieu de la montagne et plus particulièrement celui de l'alpinisme. Certes le mont Blanc n'est pas une course compliquée, mais ce n'est pas non plus une simple balade dans la neige, les conditions pouvant devenir rapidement délicates... Enfin, le mont Blanc fait rêver, et les géomètres-experts le mesurent. ●

Vincent GAILLARD, OGE, Anancy

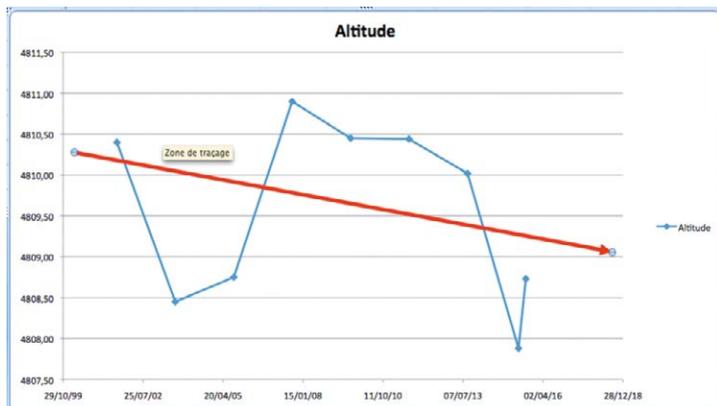


Figure 7. Évolution de l'altitude du mont Blanc

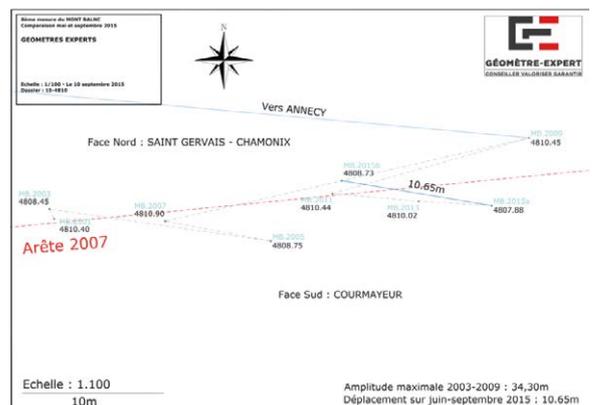


Figure 8. Déplacements du sommet

La neuvième mesure par Leica Geosystems

Interview de Farouk Kadded (Chef de produits TPS/GNSS/Drone & Responsable de l'Assistance Technique chez Leica Geosystems)

XYZ : Cela fait 9 fois que vous mesurez le mont Blanc, quelles sont les questions qui reviennent le plus souvent ?

FK : Je réponds souvent à 3 questions.
1.- On mesure avec quoi ?

Pour avoir participé à l'ensemble des campagnes de mesures du mont Blanc depuis 2001, j'ai pu constater l'évolution tangible du matériel. Chaque nouvelle campagne a marqué les nouveautés matérielles aussi bien sur le plan ergonomique (taille, poids et design) que sur le plan algorithmique ou logiciel.

Nous avons par exemple débuté la première campagne en 2001 avec 15 kg d'équipements Leica Geosystems alors que nous n'avons eu besoin que de 5 kg de matériels (voir figure 9) pour cette dernière mesure.

En 2001 puis 2003, aucun calcul temps réel ne fonctionnait entre le sommet et le pivot de vallée installé 4000 m plus bas. En 2015, la résolution des ambiguïtés a été faite en 10 s seulement avec le réseau TERIA avec des stations 3000 m plus bas.

Les dernières campagnes ont largement mis en valeur ces avancées technologiques. Cette année, j'utilisais ma 4^e génération de capteurs GPS. Après avoir débuté avec le fameux GPS500, puis le Système 1200 (GPS 1200) et la gamme Viva, j'utilisais pour la toute première fois en conditions extrêmes, la nouvelle gamme Captivate où l'ergonomie, la lisibilité avec des grands écrans, et une tablette PC connectée à internet en 3G permettait par exemple de faire du calcul post-traitement le soir au refuge (Figure 14).

2.- On mesure quoi ?

Une question que tout le monde se pose est "on mesure quoi" ?

Nous mesurons la neige dure affleurant



Figure 9. Le matériel de positionnement au sommet du mont Blanc



Figure 10. Le MNT du sommet en 3D

du sommet. Il ne s'agit donc pas des centimètres de neige fraîche mais bien de la neige dure, tassée. Nous arrivons au sommet après des heures d'efforts et le sommet étant quasiment plat, il nous est parfois difficile de trouver le point haut à vue d'œil. Donc nous installons le GPS n°1 sur le point haut apparent et nous démarrons la mesure statique d'enregistrement de données brutes pour réaliser une observation minimum d'une heure (figure 11). En septembre 2015, 1 h 50 mn d'observations ont été réalisées en statique à la cadence d'une seconde. Ensuite avec le GPS n°2 sur une canne nous faisons un relevé de points régulièrement espacés, nous pouvons voir en direct le MNT du sommet en 3D. (voir figure 10). Ces mesures aussi se font en enregistrement de données brutes pour un calcul *a posteriori*. Nous réalisons aussi

plusieurs mesures en temps réel avec le réseau TERIA connecté au réseau GSM, ainsi nous obtenons l'altitude du sommet "apparent" en temps réel. Cette année 2015, 2 satellites GALILEO ont pu être captés venant s'ajouter aux autres constellations.



Figure 11. Farouk au sommet du mont Blanc, lance les enregistrements.

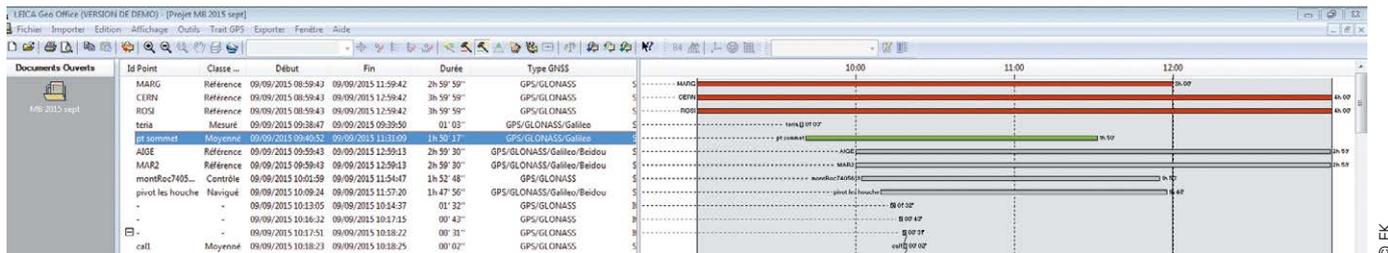


Figure 12. Calculs LGO - Copie d'écran de la page de calculs dans LGO



3.- Comment se fait le traitement ?

Nous réalisons le traitement des données, le soir même, au refuge du Nid d'Aigle 2500 m plus bas.

Le traitement consiste à calculer en post-traitement le point statique grâce aux données du RGP et stations Suisses les plus proches. Pour ce faire, nous utilisons le logiciel Leica Geo Office, et en parallèle Exagone calcule aussi sur sa plate-forme de calcul en ligne. Nous confrontons les résultats et ceci donne la valeur 3D du point fixe du sommet.

Avec ce point nous pouvons calculer l'ensemble des 300 points relevés formant la calotte du sommet. Une fois tout ceci calculé, nous pouvons vérifier quel est le point le plus haut et déterminer le véritable sommet. Ces valeurs obtenues *a posteriori* sont très proches du temps réel (inférieur à 10 cm en altitude).

Une fois redescendu en vallée les données sont envoyées à l'IGN pour

un calcul avec un logiciel scientifique "Bernese". Une fois que les données des éphémérides précises sont disponibles (sous quelques semaines), l'IGN calcule le point statique d'1 h 50 mn. Le résultat de l'IGN est proche des résultats du jour J (<10 cm en Z), cela montre une bonne homogénéité des résultats entre un logiciel dit "de production" comme Leica Geo Office (Figure 12) et Bernese qui est un logiciel dit "scientifique".

XYZ : Effectivement, les résultats des post-calculs précis de l'IGN avec les écarts-types σ estimés sont de 4808.82 m, σ 0.01m par Bernese, 4808.77 m, σ 0.02m par le PPP tandis que l'on obtient 4808.73 m, σ 0.03m par Leica Geo Office. Une moyenne pondérée sans trop tenir compte des systématiques nous donne 4808.80 m, $\sigma < 0.01m$, on est bien dans le décimètre pour du calcul en temps légèrement différé. ●

Lien vers la vidéo mont Blanc 2015 de Leica Geosystems et son QR code :

https://www.youtube.com/watch?v=ILYzmRoVV9s&list=PL0td7rOVk_IXTbIsEzJPE8ZB-KJZ4ajsJ



Le lecteur intéressé par la bibliographie récente sur la chaîne du Mont-Blanc trouvera page 78, à la rubrique Ouvrages "À qui appartient le Mont-Blanc ?" et "Les Alpes d'Helbronner, mesures et démesure" qui enthousiasmeront le passionné.



Figure 13. Les meilleurs moments de la mesure du mont Blanc



Le Réseau Teria partenaire de la mesure du mont Blanc depuis 2011

Comme tous les deux ans, depuis 2011, le réseau Teria et la société Exagone sont partenaires de l'évènement de la mesure du mont Blanc. Cette année le thème choisi était "l'évolution du mont Blanc au cours de l'été". Pour cela deux expéditions ont eu lieu, une en juin à la fin de l'hiver et cette dernière en septembre.

Lors des ascensions, une mesure en temps réel de quelques secondes est effectuée avec le réseau Teria afin de valider dans des conditions exceptionnelles les corrections apportées par le réseau Teria. A chaque fois, les résultats ont été excellents. Déjà lors des deux dernières expéditions, l'écart constaté était inférieur à 5 cm en altimétrie entre la mesure temps réel et la mesure post-traitement effectuée avec deux heures d'enregistrement continu.

Pourtant, obtenir un écart si faible sur des mesures de quelques secondes à cette altitude reste un défi technique. La modélisation troposphérique étant difficile à effectuer compte tenu que les stations de référence du réseau Teria se situent à un niveau inférieur à 2000 m et

que la mesure se fait à plus de 4800 m d'altitude !

Le réseau Teria sera dans les prochains mois constitué de plus de 200 stations GNSS, réparties entre le territoire métropolitain et l'ensemble des pays frontaliers, relié à deux centres serveurs afin de garantir un niveau de disponibilité le plus haut possible. Par ailleurs la société Exagone est certifiée ISO-9001 depuis 2011 pour l'exploitation et la maintenance du réseau Teria mais a également obtenu la certification ISO 14001- environnement en décembre 2014.

La mesure du Mont-Blanc est un laboratoire à ciel ouvert pour éprouver de nouvelles technologies et déjà lors de l'expédition de 2011 avaient lieu les premières mesures en recevant les corrections par satellite.

C'étaient les prémices du nouveau service : TERIASat.

Ce service permet aux utilisateurs du réseau Teria de travailler dans les zones dites blanches, non couvertes par les opérateurs téléphoniques en intégrant simplement un petit boîtier de réception de corrections par satellite qui se



Figure 14. Paul Chambon recevant le signal TERIASat en 2011.

connecte par wifi aux équipements de terrain des utilisateurs.

Exagone se positionne dès aujourd'hui sur de nouveaux marchés et conforte avec cette solution sa position de leader d'administrateur de réseau GNSS. ●

Paul CHAMBON

responsable technique chez Exagone.

Une géomètre-expert au mont Blanc

Je dois vous avouer que retranscrire autant d'émotions par de simples mots s'avère quelque peu difficile. Tout commença par un message vocal de Vincent Gaillard, message encore sauvegardé au moment où je rédige cet article, et que j'ai probablement réécouté au moins une dizaine de fois, avant l'euphorie, c'est le commencement de la grande aventure ! Certes, nous étions tous réunis au départ pour un même objectif : "mesurer le mont Blanc". N'est-ce pas le graal pour un géomètre-expert ? Mais cette expérience ne réside pas en une simple mesure GPS, encore faut-il

l'atteindre. Voici le récit de mon ascension en toute humilité.

Mardi 8 septembre 2015 sur le parking des Houches. Premier "check-up" par Christophe, mon guide. Après avoir vidé la moitié de mon sac (adieu serviette, trousse de toilette...), je pars avec le minimum vital et je compris le lendemain la nécessité d'alléger le sac de tout superflu. Nous nous dirigeons vers le refuge de Tête Rousse qui fut l'occasion de faire plus ample connaissance avec mes compagnons de cordée Christophe et Philippe et aussi avec quelques

bouquetins. S'en suivit l'arrivée au refuge de Tête Rousse à 3167 m. Et là, le drame... aucune eau potable au robinet ! Le thermos et le réchaud dans le sac de Christophe prennent alors tout leur sens ! Relativisons, on réapprend l'essentiel : un toit pour dormir, de bons plats concoctés par la gardienne du refuge et de franches rigolades autour d'une partie de belote, bref, une ambiance "refuge" comme on les aime.

Lendemain matin, le mercredi 9 septembre 2015. Driing ! Levée 2h00. J'ai été épargnée par les ronflements...



ouf ! Autant vous l'avouer, à 2h01, je suis partagée entre un sentiment d'excitation et d'appréhension. Les conditions climatiques sont bonnes.

3 h 00. Top départ. Encordée, à la frontale, je passe le couloir du Goûter avec en fond sonore quelques bruits d'éboulements, des moments de doutes qui furent rapidement évincés par la sérénité de mes compagnons de cordée. Après 2 h d'ascension, nous arrivons au refuge du Goûter à 3817 m. Tout va bien physiquement, le moral est là. Cette pause restera l'un des plus beaux moments. Bonheur simple et partagé avec Christophe et Philippe autour d'un thé.

6 h 00. C'est parti, nous chaussons les crampons et nous nous dirigeons vers le mont Blanc, il reste 2/3 d'ascension sur la neige. Et là c'est magique ! Un sentiment d'adrénaline me submerge à la vue des premières lueurs du soleil sur le mont Blanc. Ma motivation est soudainement décuplée. Je prends le temps de savourer la magie des paysages que nous offre la montagne sous son plus beau visage, d'immortaliser quelques clichés et de profiter simplement de l'instant présent aux côtés de Christophe Profit.

C'est la dernière ligne droite avant le sommet. On a passé l'altitude 4300 m, le manque d'oxygène se fait sentir surtout dans les derniers mètres sur l'arête sommitale. Chaque pas est mesuré, chaque respiration devient plus profonde, pour enfin atteindre le sommet tant convoité. Un pas après l'autre, le mental prend le relais, les derniers mètres se sont accomplis à une vitesse avoisinant 1 km/h (figure 16).

Il est 10 h 00 le mercredi 9 septembre



Figure 15. De gauche à droite, Philippe Manfred, Delphine Guillon et le guide Christophe Profit.

2015. Hourra, après 8 h d'effort et 1642 m de dénivelé, le mont Blanc ! Félicitations, embrassades et larmes de joie avec les autres ascensionnistes. Je vous laisse imaginer 16 géomètres-experts mesurer la calotte glaciaire, encordés, sur le toit le plus haut d'Europe. On redevient soudainement béat devant une canne et un récepteur GPS ! Les conditions optimales nous ont permis de rester 1 h 30 au sommet et de réaliser des mesures, reprendre quelques forces et surtout admirer le panorama à 360°, sans oublier la bande-roule de Philippe, les clichés de Pascal, les films tournés depuis les hélicoptères dignes de VIP !

Il faut bien redescendre un jour... la descente vers le refuge du Nid d'Aigle (2437 m et 9 h de descente) fut tout aussi belle avec mes compagnons de cordée (figure 15). C'est en écrivant cet article

que je prends soudainement conscience des dénivelées et temps de marche étrangement occultés pendant l'effort.

Cette aventure fut une révélation. Quelle joie d'admirer les premières lueurs du soleil, d'apprivoiser les crampons et piolet à la lampe frontale, de découvrir l'ambiance chaleureuse des refuges accompagnée de 21 "gentlemen", d'être bercée par ce sentiment d'adrénaline qui fut à son apogée dans les derniers mètres, pour enfin, se laisser à rêver au sommet. L'émotion partagée avec Christophe, Philippe, Guillaume et Louis restera inoubliable, des sourires, des rêves, une complicité et surtout une profonde admiration.

Cette aventure n'aurait pu se faire sans les conditions climatiques optimales et sans ce groupe solidaire, les 16 géomètres-experts de tous horizons, la chambre de la Haute-Savoie, nos guides Serge, Christophe, Gérôme, Louis, Jean-Luc, Hélias, les partenaires LEICA GEOSYSTEMS, TERIA, GEOMEDIA, XYZ et notre photographe Pascal, qui ont partagé ensemble cette belle ascension en toute humilité.

Ah, j'oubliai... la mesure du mont Blanc ? 4808,73 m. A travers ce récit, j'ai simplement souhaité, chers lecteurs, qu'un simple chiffre perçu par 60 millions de Français restera pour 22 ascensionnistes le synonyme d'une belle aventure humaine. ●

Delphine GUILLON, OGE, Lille



Figure 16. La cordée de Delphine près du sommet

L'ingénierie géodésique appliquée à la construction des hautes tours

■ **Joël VAN CRANENBROECK**

Depuis la construction du Burj Khalifa à Dubaï 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 est acceptée, 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, fondateur de CGEOS, fut 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 Dubaï 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. Il est l'auteur d'un brevet sur "Surveying Procedure and Systems for a High Rise Structure" WO/080092 A1 déposé lors du projet du Burj-Khalifa par Leica Geosystems.

■ 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 d'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.

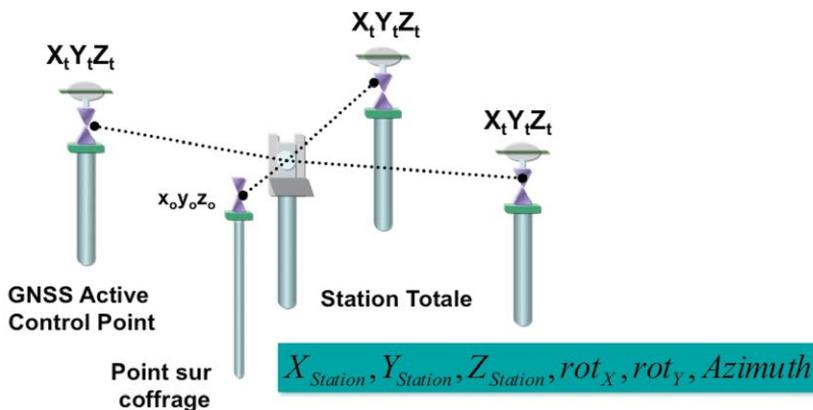
Ces nouveaux éléments, et par conséquent les structures des coffrages auto-grimpants, doivent être précisément positionnés par rapport à l'axe principal du cadre de référence des calculs de structure, défini comme étant la "vraie" verticale de la tour.

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. Ceux-ci sont de l'ordre de +/-1 cm / 10 m pour les cages d'ascenseur et pour la pose des parements. Si l'on veut garantir ce type d'exigence, nous devons assurer au moins un écart-standard sur la position des points inférieur à 5 millimètres. 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 ! Ces ascenseurs sont à doubles cabines (avec ce que cela suppose de contrainte dans les niveaux inter-étages) et ceux-ci sont toujours mus par des câbles ! Même guidés par des rails, la verticalité des cages d'ascenseur est une des contraintes majeures.

Canevas géodésique

Généralement, les cahiers des charges précisent qu'un canevas de points de contrôle doit être édifié avant les travaux et contrôlé 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



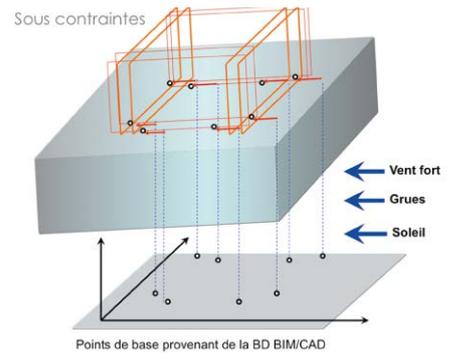
Le principe des "points GNSS actifs" entourant une station totale.

▶ 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).

Dans la transformation des coordonnées issues des traitements des observations du GNSS, la qualité des points de contrôle va être prépondérante pour pouvoir modéliser la déviation de la verticale. Généralement, lorsqu'un ingénieur topographe réalise cette opération de "calage" sur des points de contrôle, le récepteur GNSS utilisé se déplacera dans le polygone

définis par ces points de contrôle sans beaucoup de variation en altitude. Dans le cas présent, une tour qui s'élance à plus de 500 mètres de haut représente un contraste sérieux et au cours de la progression de l'ouvrage il faudra mettre à jour cette transformation en disposant de points de contrôle au niveau supérieur. Ceux-ci sont déterminés par les méthodes de géodésie classique (station totale et niveau). A Dubaï l'effet de la déviation de la verticale représentait déjà 4 cm en X et 7 cm en Y à plus de 300 mètres de haut.

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-techni-



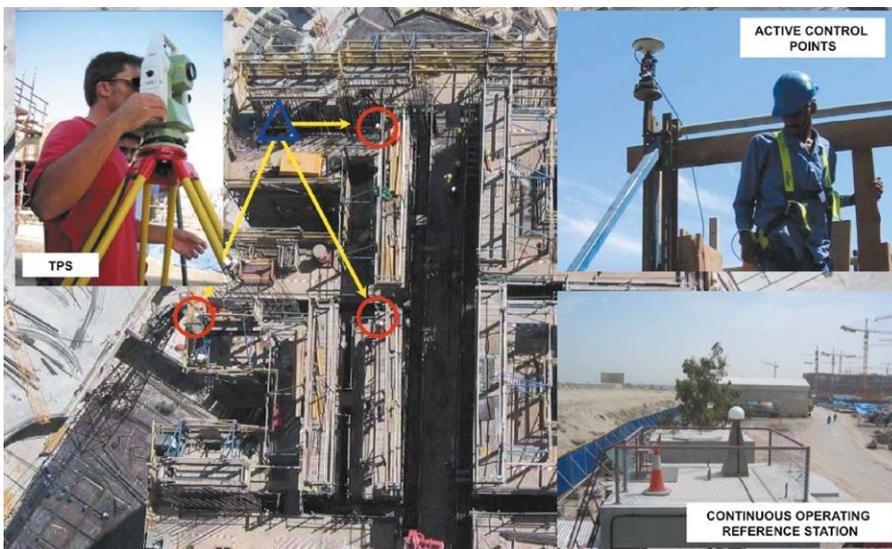
La structure oscille sous l'effet des contraintes extérieures rendant l'implantation classique impossible.

ciens pour comprendre non seulement la nature des déformations mais aussi de pouvoir les quantifier pour pouvoir 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.

Ce canevas de points de contrôle est réalisé à l'aide d'une station totale et d'un niveau numérique (avec mires en invar et crapaudine) et ensuite ré-observé à l'aide de récepteurs GNSS en mode statique et post-traitement. Il s'agit d'un réseau de polygones fermés et dans le cas de cheminements non contrôlés, on utilise la méthode des doubles centrages forcés comme on le pratique dans les opérations de nivellement. Le traitement des observations se fait en appliquant la méthode des moindres carrés avec un minimum de contrainte.

Les résidus issus de la transformation des coordonnées WGS-84 dans le canevas "local" (grâce à quelques points fournis par la municipalité et un point de niveau) doivent être de l'ordre de quelques millimètres. On ne peut en effet contraindre les résultats obtenus dans un cadre réalisé bien souvent pour des opérations de cartographie urbaine.



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



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 pour la construction du Burj Khalifa, nous avons innové en combinant pour la première fois des antennes et des récepteurs GNSS avec l'utilisation d'une station totale opérant sur la plate-forme supérieure de la construction.

En vissant sur un prisme à 360 degrés une antenne GNSS, l'opérateur d'une station totale peut en mesurant la position de ces prismes, obtenir les coordonnées précises 3D de sa station en mode "libre". Généralement 3 points "actifs" sont nécessaires mais nous recommandons toujours de disposer d'au moins 4 points pour se

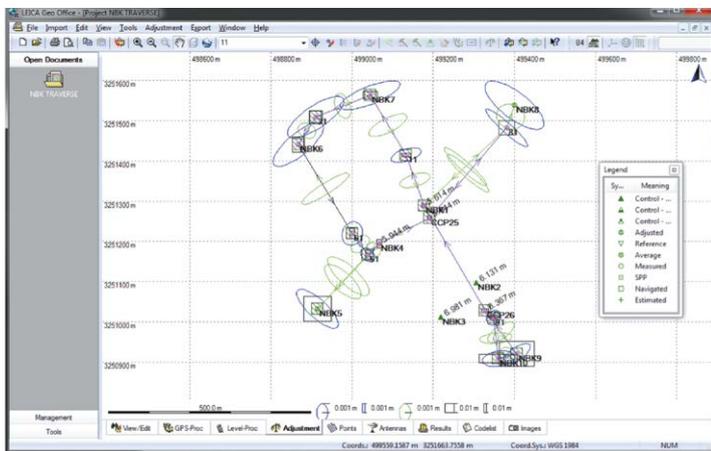


Le système des "points GNSS actifs" en œuvre pour la tour CMA de Riyad, Arabie Saoudite

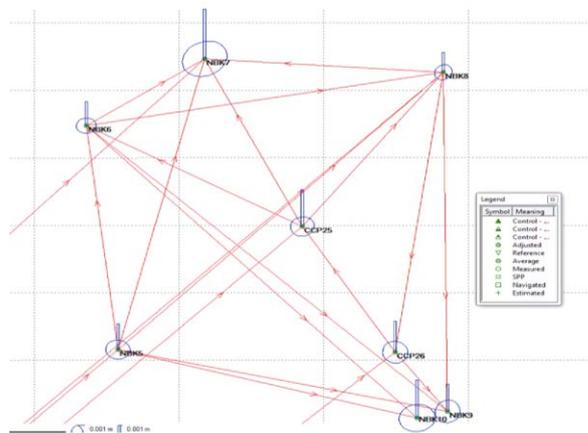
ménager des contrôles. Ces calculs se réalisent au bureau et donc en post-traitement car les coordonnées mesurées sur la tête des murs porteurs doivent être comparées au modèle CAD ou BIM du design de l'ouvrage. L'utilisation du GNSS précis se réalise dans le mode différentiel et donc une station GNSS 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 plate-forme 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



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



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



Les 3 points actifs GNSS sur la plate-forme supérieure de la nouvelle tour NBK au Koweït.

la distance entre les récepteurs GNSS situés sur la plate-forme 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 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 placée la station de base et les récepteurs GNSS situés sur la plate-forme 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 plate-forme supérieure peut être déportée et donc les coord-

onnées 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 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. Il s'agit alors de calculer de proche en proche les inclinaisons mesurées par les inclinomètres (deux axes) et multipliées par les hauteurs correspondantes pour les reporter sur les coordonnées à implanter et à contrôler. Ces valeurs représentent les variations de la position de l'axe principal de la tour en construction et peuvent atteindre +/- 20 cm (dans le cas du Burj Khalifa). 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 une opération délicate 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



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



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

de construction l'ensemble des investissements 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 indispensable 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 mettre en station et pour une période de temps relativement courte ce type de compensateur suffit large-

ment, 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.

Prospectives

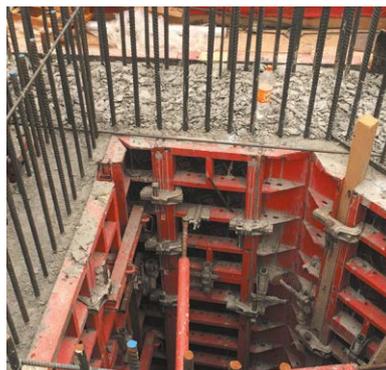
Comme nous l'avons évoqué, une des tâches principales des ingénieurs topographes engagés dans de tels projets est la mise en place des coffrages auto-grimpants et leur contrôle. Cela représente beaucoup de points de mesure dans des situations qui ne favorisent pas des longues

RESULTS OF GNSS CONTROL NETWORK INTO KTM COORDINATES SYSTEM 10/09/2014										
Point ID		Easting	Northing	Alt	σ Easting	σ Northing	σ Alt	σ Pos	σ H	Orient.
BEH1	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	3250960,547	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"
NBK7	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"
NBK6	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	4,587	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	σ Easting	σ Northing	σ Alt	σ Pos	σ H	Orient.
BEH1	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	3250960,548	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 stations 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.

► 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 plates-formes 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 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 plate-forme 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 modèles 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 2 000 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.