

Le mont Blanc mesuré au LiDAR héliporté



Figure 1. Vue du sommet lors de l'arrivée sur la zone d'acquisition.

■ Mathieu PEYRÉGA

Nous présentons une mesure de l'altitude du sommet du mont Blanc et du volume de sa calotte par méthode LiDAR héliporté de très haute densité. Cette méthode alternative aux expéditions d'alpinistes et aux techniques topographiques classiques permet une mesure de précision équivalente. Le bilan d'incertitude est présenté et rappelle que la source d'erreur principale est la propagation troposphérique, commune à la méthode GNSS terrestre mise en œuvre depuis une vingtaine d'années pour le suivi de ce sommet emblématique. Cette mesure réalisée à une quinzaine de jours d'intervalle de l'expédition traditionnelle permet également de donner une indication sur la stabilité à court terme des valeurs calculées.

Organisation et acquisition

L'expédition des géomètres-experts qui allaient bientôt effectuer la campagne de mesure 2021 du mont Blanc ne le savait pas encore, mais il y avait fin août comme un petit goût de "Tintin et l'Étoile mystérieuse" dans l'air. Les coups bas de la *GOLDEN OIL* en moins évidemment, mais la volonté de réaliser comme eux cette mesure du géant blanc et de contribuer à la science était bien là. Le réchauffement atmosphérique rapide qui est rapporté dans les premières pages de l'aventure du célèbre reporter belge est malheureu-

sement présent lui aussi, pour d'autres raisons. Et puis comme dans la bande dessinée, nous avons les moyens de projection aéroportés.

En cette fin d'été 2021, l'entreprise Sixense Mapping a été chargée par un de ses clients d'une mission de mesure héliportée sur une partie du glacier de Miage. Un relevé LiDAR de 2 200 ha, à but scientifique. Lors de la préparation de ce vol, la proximité du mont Blanc et les communications de l'ordre des géomètres-experts aperçues dans la presse et alertant sur leur expédition à venir nous ont donné l'idée et l'envie de tenter cette mesure nous aussi.

■ MOTS-CLÉS

LiDAR, hélicoptère, GNSS, mont Blanc, Sixense Mapping

Le sommet est éloigné de seulement 4 km de la partie la plus haute de notre zone principale de relevé. Lors de la préparation de la mission, nous avons estimé que le supplément de temps de vol serait d'environ 15 minutes. Cela représente approximativement 40 litres de Jet A1, le carburant de l'hélicoptère Écureuil AS350-B3 qui nous emporte avec notre système de mesure. Les questions environnementales font évidemment partie des sujets auxquels nous sommes attentifs pour nos missions. Le surcoût CO₂ est raisonnable et la décision est finalement prise d'essayer. Dans le désordre des raisons : pour comparer nos mesures avec celles des systèmes plus traditionnels ; pour tester les limites de notre système ; pour offrir aux scientifiques des données que nous espérons riches et exploitables. Cette partie de la mission a été dimensionnée pour essayer de dépasser 1 000 points/m² sur le sommet, avec la meilleure précision absolue possible ; un système parfaitement étalonné, des passages à 100 m du sol, deux pivots GNSS stationnés de façon étagée en altitude vers 2 500 m et 3 100 m d'altitude, afin de surveiller autant que



Figure 2. Lors de la mise en place du pivot "haut" sous les dômes de Miage.



possible l'erreur d'origine troposphérique qui existe dans ce type de mesure et dont l'amplitude croît avec le dénivelé entre stations.

Le 1^{er} septembre 2021, la météo est comme prévue excellente et la mission déclenchée.

La mission principale se déroule de façon nominale. Le vol a commencé par la dépose des deux pivots GNSS "toutes constellations". Un premier situé vers le mont Joly et le second sous les dômes de Miage (figure 3), restés en place respectivement 2 h 45 et 2 h 25, ce qui



Figure 3. Mise en place du pivot "haut" sous les dômes de Miage (bis).

permet une détermination précise en post-traitement de leur position puis de la trajectoire de nos capteurs. Les points stationnés n'ont pas été matérialisés.

Bien que l'hélicoptère soit en cette fin de vol allégé d'une partie importante du carburant emporté, l'évolution à cette altitude fait tout de même face aux limites des performances de la machine (figure 1). Le vent est fort et la navigation difficile, mais l'acquisition est toutefois un succès. Les équipements ont été utilisés proches de leurs limites en température et altitude d'emploi spécifiées.

Le bilan est à notre connaissance l'enregistrement de la source d'information la plus dense jamais produite sur le toit de l'Europe occidentale, avec un niveau d'exactitude totalement équivalent aux autres techniques de relevé. Toutes ces données sont à disposition des scientifiques.

- 17 minutes supplémentaires de vol réalisées spécifiquement (transit aller-retour depuis la zone principale et pose-récupération du second pivot comprise) ;
- 66 millions de points enregistrés au total dont 11 millions de points au-dessus de 4 788 m ;
- 3 x 273 clichés de 100 MPixel chacun, géoréférencés et orientés (caméras nadirale, oblique avant, oblique arrière) ;
- densité de 500 à 1 500 points/m² selon les zones (1 000 points/m² sur le sommet) ;

- exactitude de mesure de la chaîne complète estimée à 5 cm (1 sigma, soit 68 % de probabilité).

Nous avons essayé autant que possible de cadrer l'erreur d'origine troposphérique en effectuant nos calculs de trajectoire et de pivots de différentes manières ; en activant différents modèles des estimateurs d'erreur d'origine troposphérique (part ZWD) proposés dans les logiciels ; en éliminant volontairement le pivot le plus haut ou le plus bas ; en post-traitant nos pivots avec différents logiciels (dont le logiciel scientifique Bernese *via* IGN). Les écarts entre les différents résultats de la chaîne complète sont restés inférieurs à 1,5 cm. La quantité de vapeur d'eau dans l'air est à l'origine de la partie du délai troposphérique la plus difficile à modéliser ; or à une altitude donnée, cette quantité de vapeur est limitée par la pression de vapeur saturante qui décroît très vite avec la température et donc avec l'altitude. Même si les conditions du jour étaient relativement chaudes avec -5,3°C à 4 900 m au moment de la mesure, la part "marginale" de l'erreur troposphérique pour les derniers 1 800 m de dénivelé, avec un pivot déjà haut, est plus faible que celle des couches inférieures. Comme les résultats comparatifs obtenus par élimination d'un des pivots semblent aller dans le sens de conditions conformes aux modèles, nous considérons que l'estimation classiquement utilisée dans les basses couches de 3 cm/1 000 m de dénivelé reste applicable et est probablement même un peu pessimiste.

Système de mesure mis en œuvre

Le système de mesure utilisé pour cette mission a été développé et intégré par Sixense Mapping. Il est utilisable pour réaliser des missions très variées de types corridors ou relevés surfaciques avec une gamme étendue de hauteur de travail possibles, de 100 m du sol jusqu'à plus de 2 000 m du sol.

Le savoir-faire de Sixense Mapping en la matière combine aujourd'hui les compétences de la société *Helimap System SA* qui a rejoint le groupe



Figure 4. Vue des optiques LiDAR et caméras sous la nacelle de mesure.

Sixense en 2020 et de la partie Sixense Mapping "historique" anciennement filiale de VINCI Construction Terrassement. Avant leur rapprochement, les deux entités exerçaient déjà ce type d'activité depuis une quinzaine d'années avec une expertise reconnue, particulièrement pour la haute précision et la mise en œuvre à bord d'hélicoptères de systèmes sur-mesure.

Le système utilisé pour la mission est de type emport externe (visible sur la figure 2 à l'avant gauche de l'appareil.) et constitué pour l'essentiel d'un capteur LiDAR Riegl VQ-780i, d'une centrale inertielle Ixblue AIRINS 3 de technologie FOG, d'un récepteur GNSS "toutes constellations" Novatel PwrPak 7®, de caméras Phase One iXU-RS1000 50 mm (nadir visible et NIR) et 70 mm (obliques latérales et longitudinales) ainsi que de dispositifs de mise en œuvre et d'interface homme machine et d'enregistrement sur disques SSD. L'ensemble est intégré et maintenu dans le respect des normes aéronautiques, et intégralement certifié par l'EASA (figure 4).

La mise en œuvre du système ne nécessite en elle-même qu'un seul opérateur, mais pour des raisons de sécurité (vol sous régime VFR, avec donc une surveillance visuelle du trafic et des obstacles), il y a généralement deux opérateurs à bord. C'était le cas pour ce vol où l'équipage était constitué de trois personnes : un pilote (Arnaud Sage – Hélicoptères de France) et deux "personnels spécialisés" selon la terminologie EASA (Julien Franche et Mathieu Peyréga – Sixense Mapping) possédant l'ensemble des compétences et autorisations nécessaires pour ces activités de relevé aérien (dans et hors du spectre visible) et de mise en œuvre de laser (ici de classe 3B

dont l'emploi dans le respect de la sécurité des personnes au sol nécessite des précautions particulières).

Dans le cadre de cette mission, nous avons utilisé des pivots GNSS de même marque que le récepteur de bord, de manière à minimiser certaines sources d'erreur (biais d'architectures RF pour la constellation GLONASS entre autres). Cette partie matérielle est soutenue au bureau par des moyens informatiques performants et une chaîne de traitement à jour utilisant les dernières versions des logiciels de calcul et surtout des procédures abouties issues de l'expérience du groupe. En particulier les principaux paramètres d'étalonnage (bras de levier IMU-centre de phase GNSS, angles de montage précis entre la centrale inertielle et chaque capteur et paramètres optiques intrinsèques des caméras) sont surveillés régulièrement. Le cœur de mesure "rigide" du système n'est par principe jamais démonté et, lorsque cela doit être le cas, un vol dédié est systématiquement réalisé de manière à réétalonner les éléments susceptibles d'avoir changé. Les bras de levier entre les centres de mesure sont hautement répétables et connus par construction. La synchronisation et la stabilité des horloges des différents capteurs sont maîtrisées. Les fréquences de mesure (en particulier trajectographiques) sont adaptées aux dynamiques observées en vol. L'antenne GNSS de bord et des pivots mis en œuvre ont des paramètres de calibration (PCO et PCV) connus et exploités par les logiciels utilisés. La maîtrise de ces nombreux détails permet de réaliser un géoréférencement direct avec une précision et une exactitude que nous savons estimer de façon fiable.

Justification de l'estimateur d'exactitude annoncé

Des missions préalables très récentes conduites à des points de vols similaires (hormis l'altitude, évidemment) et incluant des points de contrôle, ainsi que les indicateurs de qualité obtenus lors du traitement de cette mission nous confortent totalement dans l'exactitude estimée annoncée. Rien d'anormal sur le fonctionnement du système ne nous contraint à douter *a priori* de la

qualité éprouvée du géoréférencement de nos données ni de mettre en doute le modèle d'estimateur d'erreur que nous utilisons habituellement et qui est présenté sommairement ci-après.

Nous disposions également d'une dizaine de points de contrôle sur la zone toute proche du glacier de Miage dont les altitudes s'échelonnent entre 1 553 m et 2 698 m. Cette partie du vol était réalisée avec des paramètres totalement différents (800 m à 1 000 m du sol) mais l'adéquation entre ces points de contrôle et nos résultats (meilleure que 10 cm pour l'écart le plus grand) apporte également une forme de contrôle externe à nos mesures.

Les différents postes d'erreurs considérés indépendants pris en compte sont détaillés ci-après.

■ Erreur intrinsèque du distancemètre

La conformité des spécifications contractuelles du capteur Riegl VQ-780i utilisé a été testée sur banc lors de sa livraison. Les performances du distancemètre ont été mesurées, pour une cible située à une distance de mesure de 130 m environ, de réflectance supérieure à 80 %, perpendiculaire au faisceau et de taille supérieure à celle de la tache laser. Dans ces conditions, la fiche de réception indique une exactitude meilleure que 4 mm (figure 5).

Dans le cadre de la mesure du sommet, les réflectances de la neige et de la glace dans la longueur d'onde de l'instrument (laser Nd-YAG à 1064 nm) sont conformes aux conditions de la mesure sur banc, de même que la dimension de la cible par rapport au diamètre de la tache laser (2,5 cm à 100 m au critère $1/e^2$). Seul l'angle d'incidence du faisceau par rapport au sol au moment des tirs n'est pas maîtrisé.

Nous retenons finalement une erreur liée au distancemètre de 5 mm à 1 sigma (la pente attendue sur la zone du sommet doit être limitée et le sommet ne doit pas être situé dans les zones en bord de fauchée). Les effets atmosphériques sur la mesure des distances sont faibles à une portée d'une centaine de mètres. Ils sont tout de même pris en compte dans nos calculs, grâce à une sonde de température, pression et humidité dont



Measurement Accuracy and Precision:

reflectance of target plate	nominal distance	measured distance	specified accuracy	1 σ standard deviation	specified precision	OK
$\rho \geq 80 \%$	129,259 m	129,263 m	+/- 20 mm	2,6 mm	+/- 20 mm	<input checked="" type="checkbox"/>
$\rho \approx 10 \%$	131,324 m	131,327 m	+/- 20 mm	6,5 mm	+/- 20 mm	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 5. Extrait du document de réception de l'instrument VQ-780i utilisé.

les mesures sont utilisées pour corriger les vitesses de phase et de groupe, et donc de distance.

■ Erreur sur la position du pivot

Les estimateurs fournis par les différents logiciels (Novatel Grafnet et Bernese) après ajustement de réseau sont similaires. Nous retenons le plus grand des deux (issu de Bernese) à savoir 12 mm à 1 sigma.

■ Erreurs angulaires sur le calcul de trajectoire

Les spécifications de la centrale inertielle utilisée indiquent une précision à 1 sigma des angles de roulis et de tangage de 0,0025° et 0,005° pour le cap. Ces précisions sont totalement conformes aux estimateurs affichés par le logiciel de calcul de trajectoire pour ce vol, et confortées par deux autres indicateurs. D'une part la séparation entre un calcul dit *forward* (utilisant les mesures dans le sens chronologique) et un calcul dit *backward* (utilisant les mesures dans le sens rétrograde) permet à partir d'un même jeu de données de réaliser deux calculs relativement indépendants (tout au moins du point de vue de certains filtres de résolution des ambiguïtés). D'autre part, la procédure d'ajustement nuage-nuage entre les différents passages effectuée *via* le logiciel RiPrecision (figure 6) applique une déformation 6-DOF de la trajectoire initiale, de manière à minimiser les écarts entre les éléments correspondants.

L'amplitude des déformations générées à cette étape (angulaires et linéaires, cf. figures 6 et 7) est de l'ordre de grandeur attendu.

Nous retenons finalement pour le roulis et le tangage une erreur angulaire de 0,004° qui inclut une marge supplémentaire destinée à prendre en compte :

- l'erreur résiduelle du modèle de déviation de la verticale utilisé dans les calculs. En effet, la centrale inertielle effectue ses mesures par rapport à la gravité locale réelle, mais le calcul de trajectoire doit fournir des angles corrigés *via* le modèle de déviation de la verticale de manière à avoir en sortie des angles qui correspondent à un trièdre de navigation dont la verticale est la normale à l'ellipsoïde dans le système RGF93. Nous utilisons aujourd'hui le modèle de potentiel EGM2008 et un calcul de la déviation *via* le développement en harmoniques sphériques du gradient. L'ordre de grandeur de cette déviation peut selon les zones atteindre voire dépasser celui de la précision théorique de la centrale inertielle. Au voisinage du sommet, le modèle estime ainsi les composantes nord-sud et est-ouest, respectivement à $\chi \approx 8,1''$ et $\xi \approx 8,3''$, c'est-à-dire quasiment la précision nominale de l'équipement. Pour être rigoureux, et compatible avec un calcul dans RGF93, il faudrait utiliser un modèle de gravité dédié, mais contrairement au NGS américain, l'IGN ne publie pas encore de modèle national de gravité ni de déviation de la verticale.

Nous espérons que cela viendra un jour et, en attendant, nous utilisons le modèle global indiqué précédemment, en appliquant les conversions de systèmes de références nécessaires. La dérivation des valeurs de déviation depuis la grille RAF20 est possible près de la surface, mais d'une part n'est pas supportée par le logiciel utilisé et, d'autre part, ne prendrait pas en compte l'évolution (certes faible) avec l'altitude ; or c'est bien dans les vols les plus éloignés du sol que cette modélisation a l'impact le plus important ;

- la résolution des mesures angulaires du miroir du LiDAR (sur l'axe de roulis) qui est de 0,001° ;

- l'exactitude de l'étalonnage des angles de montage mécanique.

Pour le cap, nous retenons 0,008° principalement pour prendre en compte la précision et la stabilité de détermination des angles de montage.

Avec une distance de mesure de 100 m, une pente du terrain de 35° et une demi-ouverture de balayage de 30°, ces erreurs angulaires se propagent en erreurs linéaires de la façon suivante (pire cas) :

Tangage :

$$\epsilon_{\theta} = 100 \cdot \sin(0,004^{\circ}) \cdot \tan(30^{\circ} + 35^{\circ})$$

Roulis :

$$\epsilon_{\phi} = 100 \cdot \sin(0,004^{\circ}) \cdot \tan(30^{\circ} + 35^{\circ})$$

$$\text{Lacet : } \epsilon_{\psi} = 100 \cdot \sin(0,008^{\circ}) \cdot \tan(30^{\circ}) \cdot \tan(30^{\circ} + 35^{\circ})$$

Comme 3 passages indépendants (axes croisés et espacement temporel suffisant) ont été réalisés et moyennés entre eux *via* l'ajustement nuage-nuage, nous appliquons finalement un facteur $1/\sqrt{3}$ destiné à intégrer l'effet de moyenne sur ces termes d'origine angulaire.

■ Erreur en position sur le calcul de trajectoire

Pour cette partie, nous avons retenu un modèle classique (et réaliste) du type 1 cm + 1 ppm issu principalement de l'origine GNSS différentiel du calcul de la trajectoire. La ligne de base était au plus de 8 km. Une moyenne des trois passages étant réalisée par l'ajustement nuage-nuage (figure 7), nous appliquons donc également un facteur $1/\sqrt{3}$ sur ce terme.

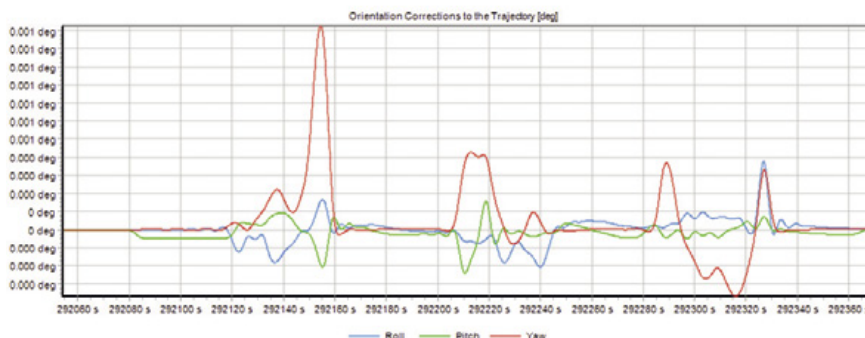


Figure 6. Ajustement angulaires réalisés par la procédure d'ajustement nuage-nuage.

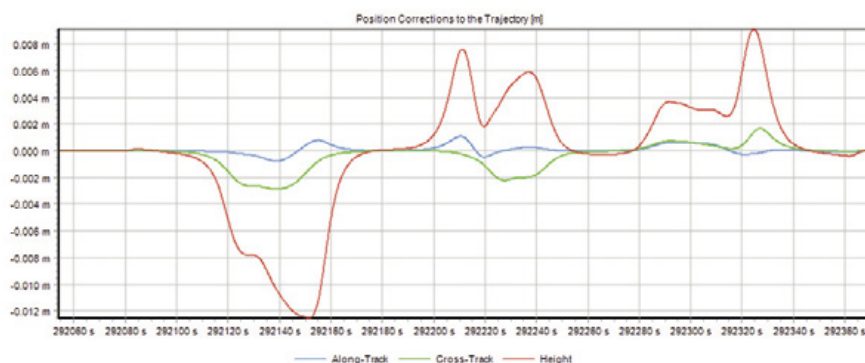


Figure 7. Ajustements linéaires réalisés par la procédure d'ajustement nuage-nuage.

■ Erreur d'origine troposphérique pour les derniers 1 800 m de dénivelé

De façon plus ou moins arbitraire, nous estimons ce terme à 4,5 cm en cohérence avec les modèles classiques (3 cm/1 000 m), mais légèrement diminué pour prendre en compte les résultats de tests effectués et qui nous ont semblé aller dans le sens d'un terme relativement bien modélisé. C'est ce terme qui joue le rôle le plus important dans l'estimateur final. Nous disposons d'enregistrements synchronisés à 2 Hz des paramètres atmosphériques principaux (température, pression, humidité) qui permettent peut-être d'encore mieux estimer cette erreur, mais c'est aujourd'hui hors de notre champ de compétence.

■ Bilan

Les postes d'erreur pouvant raisonnablement être considérés comme indépendants, nous obtenons en moyenne quadratique une valeur de 5 cm que nous avons retenue comme estimateur final de l'exactitude de mesure.

Un peu de géodésie avant d'aller plus loin

L'ellipsoïde et le géoïde sont deux surfaces de référence utilisées pour mesurer deux grandeurs différentes, que le grand public confond d'ailleurs souvent sous un même terme "altitude". Les géomètres le savent bien, et nous aussi, la référence d'altitude légale et usuelle en France est l'altitude normale, dite du Nivellement général de la France NGF-IGN69. C'est selon cette convention qu'on mesure l'altitude du mont Blanc.

Stricto sensu, cette dernière n'est accessible que par des techniques de nivellement direct et, pour simplifier, elle représente le dénivelé par rapport à un point de référence situé proche du niveau moyen de la mer, à Marseille. Heureusement, la France est dotée d'une infrastructure géodésique moderne et de grande qualité, maintenue par l'IGN. Dans cette infrastructure se trouve entre autres une grille de conversion permettant de transformer des mesures de hauteur ellipsoïdale vers la référence d'altitude NGF-IGN69. C'est par ce moyen que toutes nos mesures de hauteur, dont la mise en référence est essentiellement issue de calculs "GNSS", ont été converties.

Entre la dernière campagne de mesure, réalisée à notre connaissance en 2017 et celles de 2021, l'IGN a mis à jour la grille. De RAF09 en 2017 puis RAF18b, la version actuellement en service est RAF20. Elle a été publiée la veille de notre acquisition. Au niveau du

sommet, l'écart entre la grille RAF20 et RAF09 (mesure 2017) est de 2,9 cm. Cela signifie que, même si physiquement le sommet n'avait absolument pas bougé depuis 2017, et si les mesures avaient donné exactement la même hauteur ellipsoïdale, l'altitude calculée avec la nouvelle grille serait environ 3 cm plus élevée que celle de 2017. Ce "détail" sera évidemment à prendre en compte dans la comparaison des résultats pour l'altitude, et encore davantage pour le volume de glace de la calotte. Il y a en effet une forme de discontinuité dans le calcul de la série liée à ce changement, et dans une moindre mesure du changement de réalisation du référentiel géodésique légal (RGF93), passage du RGF93(v2) vers le RGF93(v2b). Les modifications des coordonnées de stations permanentes environnantes qui ont été utilisées pour le rattachement (DEQU et ROSI) étant encore plus faibles (subcentimétriques).

Résultats

Même si les photographies numériques fournissent des données riches, nous avons principalement exploité les données LiDAR pour la production des résultats et la rédaction de cet article. Les photographies ont été utilisées uniquement pour guider le filtrage du nuage et conforter l'analyse en matière de microreliefs.

Malgré la colorimétrie relativement uniforme, la bonne gestion des

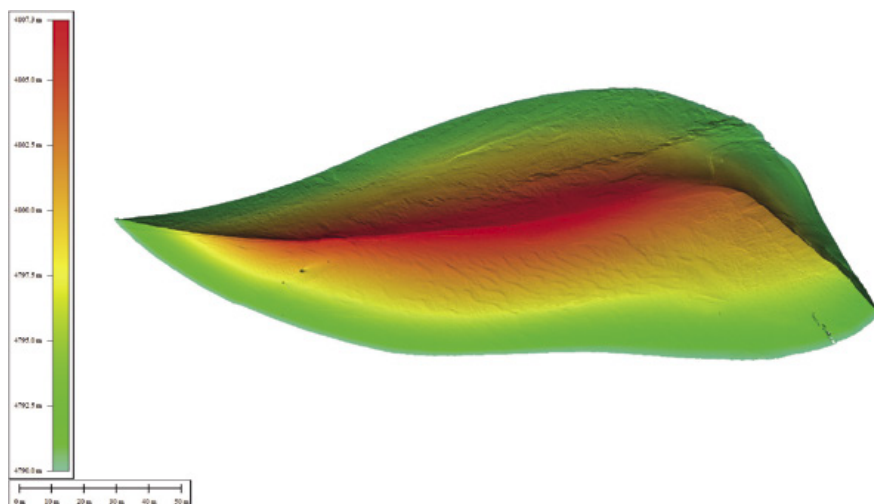


Figure 8. Visualisation du MNT de la calotte pour les altitudes supérieures à 4 790 m (RGF 93 CC46 et NGF-IGN69 via RAF20).

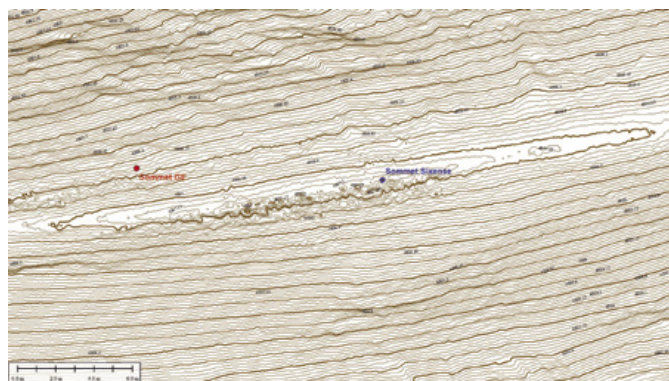


Figure 9. Détail des isohypses sur l'arête sommitale et position "des sommets" (RGF 93 CC46 et NGF-IGN69 via RAF20).

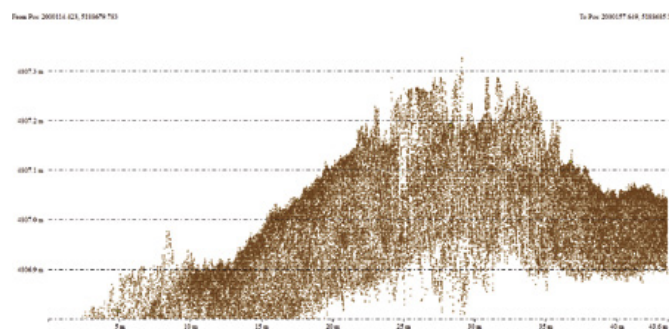


Figure 10. Coupe transversale dans le nuage de points, le long de l'arête sommitale (NGF-IGN69 via RAF20).

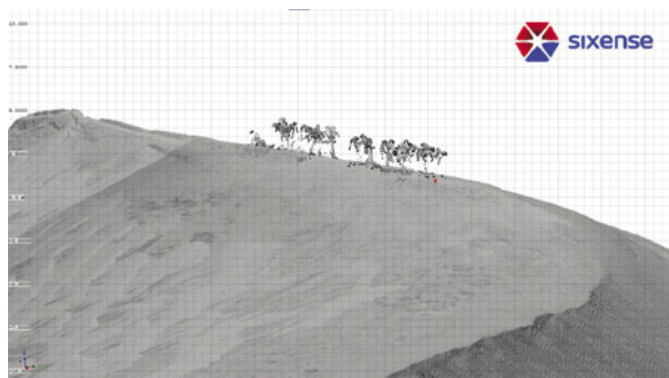


Figure 11. Vue d'ensemble du nuage brut sur l'arête sommitale.

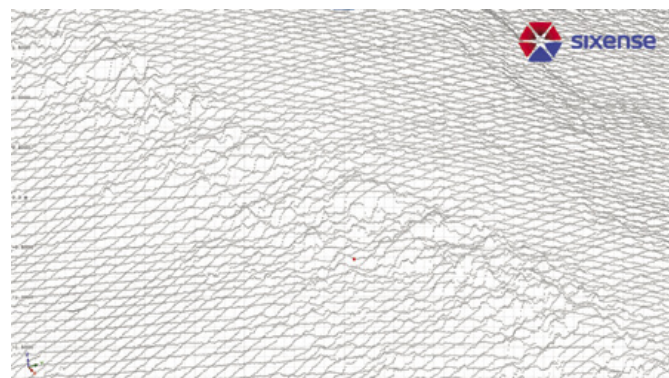


Figure 12. Détail du nuage sur des microreliefs sommitaux illustrant la densité d'échantillonnage.



paramètres de prise de vue et l'échantillonnage sur 14 bits du capteur permettent de restituer des nuances qui rendent ces dernières totalement exploitables pour des opérations de photogrammétrie classiques.

■ Altitude du sommet

La densité des mesures LiDAR sur l'arête sommitale atteint 1000 points par m² et permet donc la capture des points les plus hauts. Il y avait une dizaine d'alpinistes au sommet lors des mesures, des bâtons plantés verticalement, des cordes et des piolets. Il a donc été nécessaire de filtrer le nuage de points pour en retirer autant que possible les éléments anthropiques. Quelques points dépassent 4 807,3 m, mais ils sont relativement isolés. Il s'agit soit de microreliefs, avec des durées de vie probablement courtes face aux éléments et aux crampons des alpinistes, soit de points imparfaitement filtrés. Nous avons choisi de les ignorer et de retenir l'altitude NGF-IGN69 de 4 807,27 m qui correspond à un groupe de points denses et contenus dans une

isohypse 4 807,20 m de dimension relativement étendue. Nous publions cette altitude avec une résolution centimétrique afin de rester dans la lignée des valeurs publiées jusqu'à présent, sans toutefois oublier le bilan de précision décrit précédemment et donc le fait que la vraie valeur, le jour de la mesure, se situe très probablement à quelques centimètres de cette dernière (figures 8 à 12).

La méthode de mesure révèle en tout cas ce dont nous doutions assez peu, c'est-à-dire la part d'interprétation à choisir une valeur unique, mathématique, d'autant plus sur une matière "fragile" comme la neige glacée du sommet, piétinée quotidiennement par des dizaines d'alpinistes (figures 13 et 14).

Nous avons retenu la valeur de 4807,27 m en référence NGF-IGN69 via RAF20 comme altitude du sommet, mesurée le 1^{er} septembre 2021 vers 11h30 CET.

Les mesures réalisées par l'expédition des géomètres-experts entre le 16 et le 18 septembre ont été publiées depuis notre mesure. La valeur qu'ils ont

annoncée est de 4 807,81 m et la comparaison avec la nôtre permet d'apporter une information d'un type nouveau sur la stabilité "court terme" de l'altitude et de la position planimétrique du sommet. C'est en effet à notre connaissance la première fois que deux mesures de précision équivalentes et indépendantes sont effectuées à un intervalle aussi proche d'une quinzaine de jours.

Pendant la rédaction de cet article, nous avons pu échanger avec M. Farouk Kadded et M. Jean des Garets de l'expédition 2021 et il est nécessaire de préciser une différence de méthodologie. La mesure réalisée par les géomètres-experts est faite sur la surface glacée, après avoir déblayé 30 à 40 cm de neige "fraîche", alors que notre mesure est réalisée directement sur l'interface air-neige, le LiDAR ne permettant pas de distinguer la couche superficielle de la couche transformée sous-jacente. Cette différence de méthodologie amplifie donc encore l'écart obtenu, puisqu'avant le déblaiement réalisé par les géomètres, la surface affleurante se trouvait encore 30 à 40 cm plus haut !



Figure 13. Arête sommitale au moment de la mesure, vue des microreliefs.

L'amplitude de l'écart nous a initialement un peu surpris et a conduit en interne à une réanalyse approfondie de nos données, qui n'a pas permis de déceler de faute. La présence des points de contrôle sur le glacier de Miage et qui avaient été relevés de façon indépendante par notre client initial excluant de toute façon une erreur d'une telle amplitude dans notre valeur. Il nous a également été permis de vérifier les données et le calcul de l'expédition des géomètres-experts et nous avons pu avec un logiciel différent de ceux utilisés, retrouver la valeur annoncée au centimètre près, avec un estimateur de précision de 47 mm à 1 sigma !

D'après ces résultats, la surface air-neige a donc varié de 80 à 100 cm en une quinzaine de jours, avec formation de quelques décimètres de glace par rapport au niveau de notre mesure. Les bases de données météorologiques consultées font état de précipitations en vallée de 45 à 53 mm entre les deux mesures, mais cela ne reflète évidemment pas les conditions au sommet. La lecture de l'article de Jean Corbel [Glaciers et climats dans le massif du Mont-Blanc. In : Revue de géographie alpine, tome 51, n° 2, 1963. pp. 321-360 : <https://doi.org/10.3406/rga.1963.3132>] donne toutefois des indications sur les précipitations annuelles au sommet (estimées à une trentaine de mètres de neige) ainsi que sur les gradients de précipitations avec l'altitude. Les ordres

de grandeurs rapportés sont totalement compatibles avec l'écart entre les deux mesures de 2021. L'interprétation fine de ce résultat, si elle est possible, appartient toutefois aux spécialistes en météorologie, glaciologie et nivologie.

L'amplitude obtenue sur ces quinze jours, et celle également avec la mesure non publiée jusqu'ici de 2019, incitent en tout cas à rester prudents sur l'analyse de l'évolution des valeurs de la série qui est encore courte et surtout avec une fréquence à l'évidence trop faible pour capturer le minimum ou maximum saisonnier avec une précision meilleure que le mètre...

■ Position planimétrique et déplacement horizontal

En projection Lambert CC46 sur RGF93v2b, la position du point retenu pour le sommet est :

E : 2000147,27

N : 5188683,17

L'expédition des géomètres-experts nous a également transmis ses résultats planimétriques (cf. position représentée dans la figure 9) et le déplacement obtenu sur cette durée de quinze jours est de 12,84 m, principalement en direction de l'est.

■ Volume de la calotte au-dessus de 4 800 m

Pour les expéditions précédentes, nous avons eu confirmation que deux méthodologies co-existent : surface affleurante ou surface glacée, selon que la mesure a été faite à la station-scan robotisée Leica MS50 ou bien à la canne GNSS. Dans le premier cas, la surface mesurée est similaire à celle de notre LiDAR, dans l'autre cas, elle est dépendante des conditions de neige. Certaines expéditions ont mesuré directement la surface, et dans d'autres cas, la canne s'enfonçait de 30 cm environ. En 2021, une mesure terrestre avec une canne qui s'enfon-

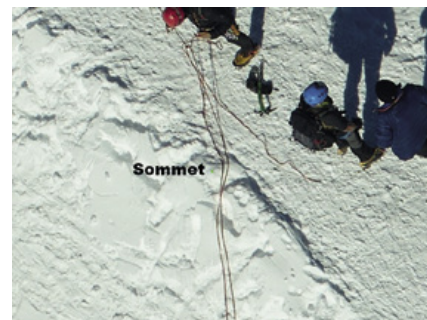


Figure 14. Sommet "Sixense" (point vert) reprojété dans une des images nadirales à partir de sa position extraite du LiDAR.

çait a eu lieu, mais complétée par une reconstitution photogrammétrique faite à partir de la caméra intégrée au Leica GS18i. Ainsi, une information complète sur le manteau neigeux doit pouvoir être extraite !

D'autre part, la discontinuité introduite par le changement de grille de conversion altimétrique nécessite pour comparer les résultats obtenus avec ceux des années précédentes de prendre en compte les 2,9 cm déjà évoqués (même si cette valeur est *a posteriori* négligeable par rapport aux variations rapides de l'altitude et du volume ; nous étions entrés dans ces détails lors de la rédaction initiale pendant laquelle nous avions – à tort – en tête que les deux équipes obtiendraient des valeurs très proches).

Nous produisons tout de même deux séries de valeurs, la première correspond aux mesures 2021 avec la méthodologie la plus récente. La seconde est faite par rapport à l'altitude de 4 800,029 m et permet de comparer directement les volumes avec ceux des campagnes précédentes.

Quelle que soit la méthode de mesure retenue, une façon de s'épargner cette gymnastique serait à l'avenir de prendre une référence en hauteur ellipsoïdale. Même si les réalisations successives de RGF93 introduisent elles aussi des discontinuités, elles ont jusqu'ici

	Référence NGF-IGN69 via RAF20 volume au-dessus de 4 800 m	Equivalent référence NGF-IGN69 via RAF09 volume au-dessus de 4 800,029 m
Nominal	14 542 m ³	14 410 m ³
h - 5 cm	14 313 m ³	14 180 m ³
h + 5 cm	14 774 m ³	14 640 m ³



toujours été de plus faible amplitude que celles de la grille "RAF".

Enfin, de manière à prendre en compte l'incertitude sur les mesures altimétriques et à la répercuter sur le calcul du volume, nous avons, pour chaque série, produit des valeurs à +5 cm et -5 cm (intervalle d'incertitude à 68 % sur les mesures altimétriques). Les 5 cm de précision altimétrique se transforment en une imprécision d'environ 1,5 % sur le volume de la calotte (3 cm correspondent à 1 % et 2 cm à 0,6 %). La majeure partie de l'erreur étant d'origine troposphérique, une façon d'améliorer la précision relative de la mesure du volume serait de recalculer le nuage relativement à une zone fixe sur une partie rocheuse proche, ce qui serait possible à réaliser avec la technique que nous avons mise en œuvre.

Conclusion

Il perdure cette légende urbaine au sujet d'un examen scolaire du grand physicien Niels Bohr. Elle raconte qu'ayant été chargé par ses professeurs de la tâche de mesurer la hauteur d'un immeuble à l'aide d'un baromètre, il aurait par pure impertinence proposé un grand nombre de méthodes, tout en prenant soin d'éviter celle attendue par ses maîtres (basée sur la différence de pression entre le haut et le bas). De la période d'oscillation d'un pendule constitué par le baromètre au bout d'un fil au rapport des ombres portées, en passant par la durée de chute libre de l'instrument. Même l'échange du baromètre avec le concierge contre la précieuse information est évoqué.

D'une certaine façon, notre mission s'inscrit dans cette lignée de décisions impertinentes dont nous pensons qu'elles font avancer la connaissance. Quand on y pense, mesurer à quelques centimètres près l'altitude du mont Blanc depuis un hélicoptère requiert une invraisemblable accumulation par l'humanité de savoirs et de savoir-faire (même si un autre physicien moustachu et impertinent prénommé Albert est à lui seul à l'origine d'une bonne partie de la physique pointue qui a permis la naissance du laser, de l'effet photo-électrique de nos capteurs CMOS, des corrections relativistes utilisées dans les récep-

teurs GNSS et notre centrale inertielle ; en somme aux principaux rouages de notre système de mesure). Nous aussi sommes donc montés d'une certaine façon sur les épaules de ces géants, une aventure moins sportive, mais tout aussi exaltante, nous avons choisi une autre voie que la voie jusqu'ici normale, avec d'autres difficultés, mais avons également atteint le sommet. Pour être tout à fait honnêtes, et pour mettre toutes les chances de notre côté, nous avons tout de même choisi un pilote qui a été durant dix-huit ans gardien du refuge des Cosmiques et qui aurait peut-être pu nous indiquer l'altitude recherchée sans trop d'erreurs tellement elle est proche de celle que cette génération apprenait déjà dès l'école primaire ! ●

Remerciements

Nous tenons à remercier Mme Flory Panissod du cabinet Arpentage à Saint-Gervais pour nous avoir confié la mission initiale, sans laquelle cette mesure n'eût été possible. Nous remercions également les membres de l'expédition 2021 avec qui nous avons pu échanger *a posteriori* pour produire cet article. Les mesures collectées sur le sommet du mont Blanc sont également à disposition des équipes scientifiques (géomètres-experts, glaciologues...).

Contact

Mathieu PEYRÉGA

mathieu.peyrega@sixense-group.com

ABSTRACT

We present a survey of mont Blanc altitude and ice cap volume through very high-density airborne LiDAR method. This technique is an alternative to alpine expeditions and traditional ground-based surveying while providing an equivalent accuracy level. Accuracy model is exposed and shows that the main error source is the tropospheric propagation which is shared with traditional GNSS techniques used for the past twenty years in the monitoring of this iconic summit. This survey performed fifteen days before the traditional expedition also gives an indication on short term stability of the computed values.

NDLR : mesure terrestre du mont Blanc le 16 septembre 2021

Le 29 septembre, c'est conférence de presse à Saint-Gervais-les-Bains (Haute-Savoie). Elle est menée par Jean des Garets, vice-président de la chambre départementale des géomètres-experts et responsable, avec Denis Borel, de l'opération 2021 de la mesure du mont Blanc.

La revue XYZ et son rédacteur sont conviés en visioconférence et c'est un plaisir de retrouver à l'écran les professionnels connus de nous tous. Les vingt années de mesure obligent, une rétrospective est montrée, avec historique et résultats. "Au plus haut en 2007, le mont Blanc atteignait 4 910,90 m et, au plus bas en 2019, 4 806,06 m". L'ascension a mobilisé une trentaine de personnes, au sommet pendant 2 à 3 heures, dont les géomètres-experts, les guides de haute montagne, les scientifiques et les techniciens de la mesure dans des conditions météorologiques optimales. Sont cités lors de la conférence les confrères, les partenaires, les sponsors et collaborateurs de la chambre départementale : l'Ordre des géomètres-experts, l'UNGE (le syndicat de la profession), les sociétés Leica Geosystems, Géomédia et Teria et l'Institut national de l'information géographique et forestière qui valide scientifiquement le calcul. Le résultat finalement annoncé pour 2021 est de 4 807,81 m tandis que celui de 2019, resté confidentiel, était de 4 806,03 m. L'article "Le mont Blanc mesuré au LiDAR héliporté" montre bien la difficulté d'obtenir des mesures comparables alors que les altitudes et les positions horizontales varient au fil des semaines.



Farouk Kadded de Leica Geosystems

© Fabien Laurens