



Mont Blanc

Il mesure en réalité

Tout le monde a appris que le mont Blanc culmine à 4807 m. Faux : grâce à des techniques de pointe, une expédition a mesuré le toit de l'Europe avec une précision jamais atteinte, rendant au massif 3 mètres et des poussières qui lui appartiennent.

Quand les ingénieurs s'en mêlent, tous les repères se brouillent : on ne peut même plus faire confiance à la tranquille immuabilité des montagnes. Prenez le mont Blanc, par exemple : tout le monde a appris, sur les bancs de l'école, qu'il mesurait 4807 mètres. Des entreprises ont même adopté ce chiffre mythique comme enseigne. Eh bien !

tout est à revoir. Les livres scolaires, les enseignes... et les cartes. 4810 m et 40 cm, à 5 cm près : le résultat date du mois de septembre dernier, et la précision est la meilleure jamais atteinte.

DES SIÈCLES DE RELEVÉS

Tout commence par un coup de pub, lorsque les géomètres-experts de Haute-Savoie décident de redorer leur blason. Car leur mé-

tier ne se limite pas à mesurer la surface d'un studio ou à calculer l'inclinaison d'une conduite d'eau. Et même ces mesures, simples en apparence, font aujourd'hui appel à des techniques de pointe. Mais comment montrer cela au public ? Pourquoi pas en déterminant la hauteur du mont Blanc ? Le toit de l'Europe...

Mesurer une montagne, on sait faire. Voilà des siècles que la hauteur du mont Blanc est régulièrement revue. Chaque nouveau résultat différait du précédent : parfois plus, parfois moins (voir tableau, page 125). On a commencé tout d'abord par la trigonométrie, en mesurant l'angle apparent entre le sommet et la base. On a essayé le nivellement barométrique,



4 810,40 m!

en relevant la différence de pression atmosphérique entre vallée et mont. On a effectué des levées topographiques en modélisant par triangulation, de point en point, le chemin qui conduit au sommet. On a mis à profit la restitution photogrammétrique, cette technique couramment utilisée pour dessiner les cartes : deux photos aériennes du même paysage pris sous deux angles permettent d'en reproduire le relief en stéréoscopie. Les derniers calculs, effectués par l'Institut géographique national (IGN) dataient de 1986, et donnaient à l'époque déjà 4808 m. Mais avec un risque sur vingt que l'erreur sur ce nombre dépasse les 2 mètres, le résultat n'avait rien de révolutionnaire.

Mais revenons-en à l'été dernier. Pour mener à bien leur petit exploit, les géomètres-experts font appel aux ingénieurs de Leica Geosystems, qui emportent avec eux un récepteur GPS de précision et son antenne. Les Savoyards s'adjoignent aussi, comme caution scientifique, les géodésiens de l'IGN.

TECHNOLOGIE DE POINTE

Ceux-ci vont en profiter pour effectuer une série de mesures de la pesanteur, au moyen d'un appareil appelé gravimètre. Cette grosse boîte enveloppée dans un matériau isolant et les panneaux solaires qui l'alimentent en électricité pèsent plus de 15 kg... et l'appareil est sensible aux chocs : pas question de le heurter durant

Record battu!

Record de précision : les ingénieurs (ici, l'un des membres de l'équipe au sommet, avec l'antenne satellite) ont effectué des mesures avec une marge d'incertitude de seulement 5 cm.

l'ascension. Pourquoi un tel barada? Faut-il autant de matériel pour mesurer la hauteur d'une montagne? Oui et non. Tout repose, en fait, sur deux problèmes : la forme de la Terre et la définition de l'altitude.

Dès l'Antiquité, les mathématiciens savaient que la Terre n'était pas plate. Le premier à en avoir calculé le rayon (et à mériter ainsi, deux siècles avant J.-C., le titre de premier géodésien de l'histoire) est le célèbre astronome, mathématicien et géographe grec, Era-

tosthène. Directeur de la grande bibliothèque d'Alexandrie, il mesura l'ombre d'un bâton dans cette ville, puis à Syène (aujourd'hui Assouan), et estima la distance entre les deux cités grâce à la vitesse moyenne d'un chameau. Alors que le rayon de notre planète à l'équateur est de 40075 kilomètres, Eratosthène trouva pour ordre de grandeur... quatre dizaines de milliers de kilomètres!

LE CASSE-TÊTE DE L'ALTITUDE

Bien plus tard, au XVII^e siècle, le physicien Newton supposa avec raison que la Terre était aplatie aux pôles : de sphère, elle devint ellipsoïde. Cette figure géométrique était bien utile pour calculer les projections des cartes et y reporter les coordonnées d'un point. Mais elle s'avéra, elle aussi, incorrecte. Avec la fin du XIX^e siècle et la fondation de l'Association internationale de géodésie, une nouvelle figure naquit : le géoïde est "tout simplement" la forme que prendrait notre planète si elle n'était recouverte que d'eau. Une forme de patate mal taillée (voir schéma page ci-contre), dont le rayon peut varier de plus de 100 m!

Tout cela conduit à une question centrale : qu'est-ce qu'une altitude, alors que la surface des océans n'est pas sphérique, que le niveau



elle n'est pas la plus utile. Car connaître la hauteur relative de deux points n'est finalement pas très important. « Ce qui compte, poursuit Alain Harmel, c'est de savoir si ça monte ou si ça descend! En hydraulique, par exemple, on sait qu'il vaut mieux construire un château d'eau au-dessus d'un vil-

te, et le chariot suspendu suivra le chemin qui le conduira non vers le point le plus bas, mais vers celui où la gravité est la plus forte. Pour les ingénieurs, l'altitude n'est plus une hauteur, mais une valeur de la pesanteur. Or le géoïde, par sa définition même, est une surface sur laquelle la gravité est identique en tout point (on parle de "surface équipotentielle") : il est donc devenu la référence, l'altitude zéro des géodésiens.

On connaît relativement bien la forme du géoïde aujourd'hui. Les chercheurs en géodésie spatiale le mesurent notamment en étudiant les orbites des satellites de notre planète : si le géoïde était parfaitement sphérique, les trajectoires des satellites seraient de simples ellipses. Chaque déformation de celles-ci traduit donc les irrégularités dans le champ de gravité de la Terre, irrégularités qui provien-

Quelle pourrait être la hauteur de la mer à l'intérieur du mont Blanc ?

moyen des mers varie d'un point à l'autre? « C'est là qu'est le nœud du problème, sourit Alain Harmel, du Service de géodésie et nivellement de l'IGN. Au départ, la référence était le niveau moyen de la mer à Marseille, calculé sur dix ans à la fin du XIX^e siècle. » Autant dire qu'une telle valeur n'est pas universelle du tout. Et surtout,

lage plutôt qu'en dessous. » Tendons un fil entre deux maisons, au-dessus d'une vallée : si un chariot suspendu placé au milieu ne bouge pas, on peut considérer que le fil est horizontal, que les deux maisons sont à la même altitude. Tout est donc une question de gravité. Car l'attraction terrestre diminue quand l'altitude augmen-



Dix-neuf quittèrent le refuge, deux seulement parvinrent au sommet. Leur couverture de survie sur le dos, les grimpeurs attendent la fin des mesures.

ment essentiellement des mouvements de convection internes au manteau terrestre. Seulement voilà : quelle serait la hauteur de la mer à l'intérieur du mont Blanc ? Une bonne approximation se fonde sur le modèle de l'IGN appelé "quasi-géoïde 1998" (QGF98), construit par interpolation à partir de 557913 mesures de gravité effectuées sur le territoire français !

Mais l'idéal serait de pouvoir modéliser l'attraction terrestre au sein même du mont Blanc.

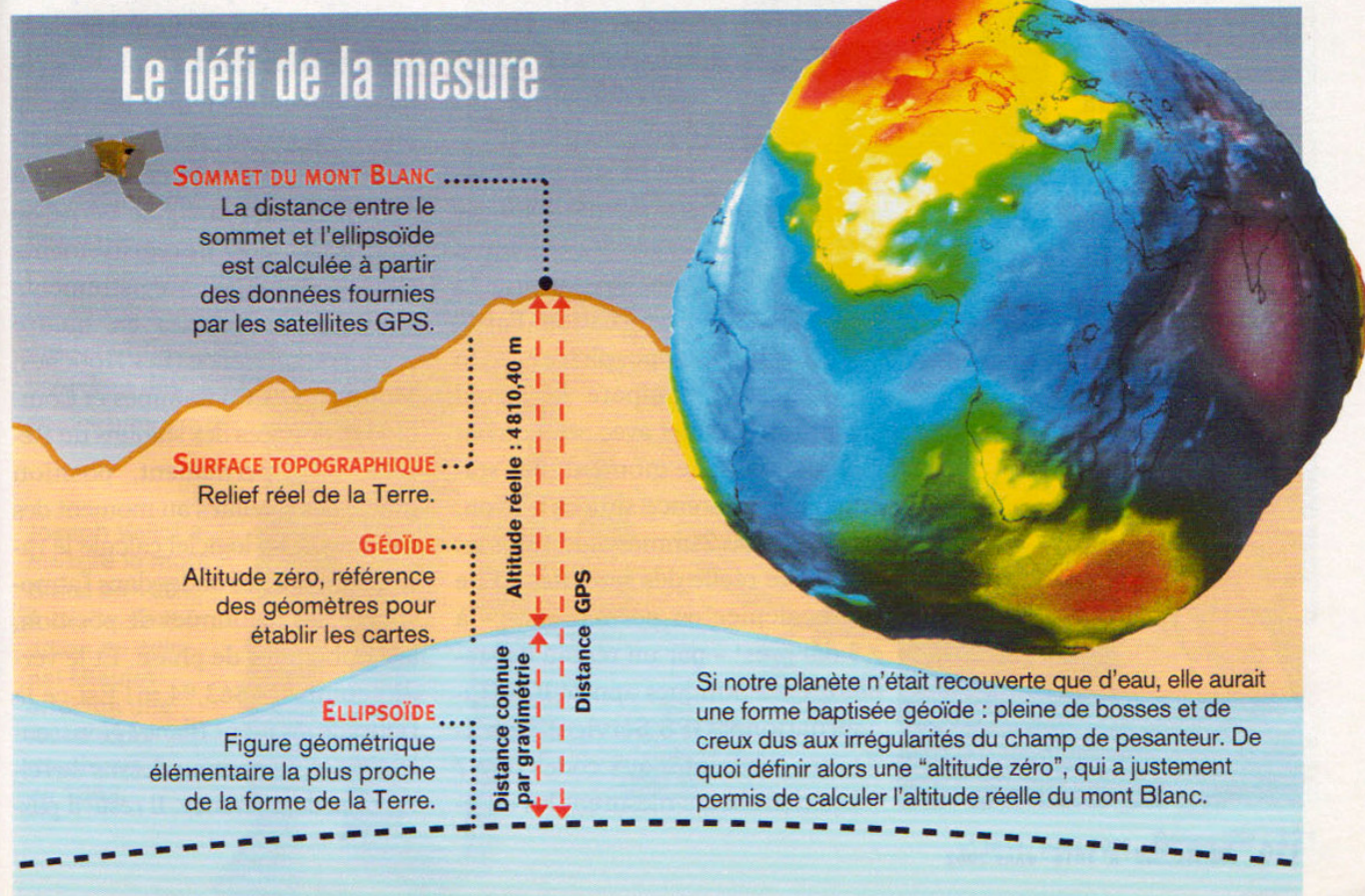
Voilà pourquoi le 5 septembre dernier, quelques jours avant l'expédition qui doit conduire géomètres-experts et ingénieurs au sommet, les géodésiens de l'IGN mesurent la gravité en plusieurs points du tunnel du Mont-Blanc fermé à la circulation après le terrible incendie de mars 1999. Le lendemain, les mesures gravimétriques sont faites à l'aplomb du tunnel : sur la terrasse de l'aiguille du Midi, aux coordonnées bien connues. L'objectif est de mesurer ensuite la gravité au sommet du mont Blanc, et de déduire l'altitude de zéro des précédentes mesures, la densité des roches étant supposée identique dans tout le massif.

Vendredi 7 septembre, dix-neuf personnes se retrouvent au pied du téléphérique des Houches : trois guides de haute montagne dont deux sont techniciens géomètres, un cadre du conseil général de Haute-Savoie, les ingénieurs de Leica Geosystems, ceux de

l'IGN et les géomètres experts de Haute-Savoie. L'expédition entame l'ascension mécanique à 8h30, grim pant jusqu'à Bellevue (1850 m) pour apprendre que le tramway à crémaillère du Mont-Blanc, qui monte au Nid d'Aigle (2372 m), est en panne !

LE GPS PLANTÉ AU SOMMET

L'équipe grimpe à pied, et poursuit sa route jusqu'au refuge du Goûter (3817 m) pour un repos salvateur. Samedi 8 septembre : le réveil sonne à 2 heures du matin. Départ pour le sommet. Mais les conditions météo sont mauvaises, un vent glacial souffle à 50 km/h et, à 300 m du but, la plupart des membres de l'expédition doivent finalement renoncer. Le gravimètre, trop lourd, trop fragile, redescend avec eux, après qu'une mesure eut été effectuée au refuge Vallot (4362 m). Qu'importe ! Deux grimpeurs ont atteint le sommet, leur précieux récepteur GPS sur le dos. Ils fichent les antennes dans la neige, et la collecte commence : pendant cent deux minutes et trente



secondes, l'appareil relève les signaux des satellites qui filent dans le ciel, à plus de 15 000 km au-dessus du mont Blanc.

UNE ERREUR INACCEPTABLE

Propriété de l'armée américaine, le GPS (Global Positioning System) permet à n'importe qui, moyennant un récepteur léger et peu coûteux, d'obtenir sa propre position sur l'ellipsoïde de référence. Son principe? Chaque satellite émet des micro-ondes, sur deux fréquences différentes appelées L1 et L2. Le moment précis de leur émission et la position du satellite dans le ciel sont encodés dans chaque signal. Sur terre, le récepteur collecte ces signaux, mesure le temps qu'ont mis les ondes pour lui parvenir et en déduit la distance qui le sépare de chaque satellite. Une simple triangulation permet alors d'afficher les coordonnées du récepteur sur l'écran. Simple, trop simple pour les géodésiens, car en réalité se pose tout une série de problèmes. Tout d'abord, la vitesse de propagation

du signal GPS est perturbée par son passage dans les couches atmosphériques inférieure (la troposphère) et supérieure (l'ionosphère). Or, si la vitesse des ondes n'est pas connue précisément, le calcul de la distance du satellite en est faussé. Ensuite, la position réelle des satellites dans l'espace peut varier de plusieurs kilomètres par rapport à leur position théorique : volant à une altitude moyenne de 20 200 km au-dessus du plancher des vaches, ils sont soumis aux attractions lunaires et solaires, aux marées océaniques et terrestres, au vent solaire qui les repousse littéralement... et aux corrections d'orbite apportées de temps à autre, sans prévenir évidemment, par les militaires américains. Enfin, les codes standard délivrés par les satellites ne permettent pas d'obtenir une précision inférieure au mètre. Que toutes ces incertitudes se cumulent, et l'erreur finale atteint 5 m. Inacceptable pour les arpenteurs du mont Blanc.

Ils ont donc fait appel à plusieurs astuces pour améliorer la précision des mesures. La perturbation des ondes par l'ionosphère? On la résout en comparant les fréquences L1 et L2, qui ne subissent pas les mêmes changements et permettent donc de modéliser la perturbation. Par la troposphère? On compare le signal

capté au sommet avec celui qu'ont reçu, au même moment, des stations de référence situées à Lyon, Modane ou Zimmerwald (Suisse). L'orbite réelle des satellites? Elle est calculée en permanence – à 3 cm près! – par un réseau de stations scientifiques appelé IGS (International GPS Service). Les limites inhérentes aux codes GPS? Les chercheurs mesurent les diffé-



Ça y est! Les précieuses données satellites sont dans la boîte : la nouvelle altitude du mont Blanc sera bientôt connue.

rences de phase sur les signaux L1 et L2, ce qui permet une localisation très précise. Encore faut-il que la position des satellites dans le ciel évolue suffisamment pour rendre possible cette méthode : cela explique, notamment, la longue durée des mesures.

UN LOGICIEL À LA RESCOURSSE

Inutile de le dire, tous ces paramètres ne sont pas intégrés par le récepteur au moment même de la collecte! Une fois les alpinistes redescendus un peu plus près de ce bon vieux géoïde, un logiciel baptisé *Bernese*, spécialement conçu à cet effet à l'université de Berne, se charge de tout. Enregistrements GPS du sommet, enregistrements simultanés effectués en quatre points de référence (Les Houches, Montroc, Les Contamines et Combloux), données des stations du Réseau GPS permanent, position exacte des satellites au moment des mesures... Le logiciel calcule le ralentissement des ondes dans l'atmosphère, les inconnues de position, les ambiguïtés de phase. Et le verdict tombe : 4 863,94 m! Est-ce là l'altitude du mont Blanc? Non, seulement sa hauteur au-dessus de l'ellipsoïde de référence. Il reste à pas-

Deux outils pour mesurer

Avec le GPS (ci-dessous), le gravimètre est devenu l'un des outils indispensables pour cartographier la Terre. Il est sensible à une variation d'altitude inférieure au centimètre.





ser de cette hauteur ellipsoïdale à l'altitude par rapport au géoïde.

L'OBSERVATOIRE ENGLOUTI PAR LES NEIGES ÉTERNELLES

« C'est là qu'aurait dû intervenir le gravimètre, explique Alain Harmel. On a des mesures précises de la gravité à 400 m du sommet, ainsi que celles de l'aiguille du Midi et du tunnel du Mont-Blanc, à l'aplomb l'une de l'autre et séparées d'environ 2600 m. » Mais ces résultats, qui doivent permettre aux ingénieurs de modéliser le géoïde à l'intérieur du massif, sont incomplets faute d'une mesure au sommet : ils donneront cependant une meilleure carte du champ de gravité, qui sera utilisée dans des études ultérieures.

Joseph Vallot a mesuré le mont Blanc en 1894. A droite, l'expédition du colonel Mieulet effectue une levée topographique en 1863.



Les géodésiens ont donc utilisé l'approximation française standard, le quasi-géoïde QGF98, pour calculer l'altitude du mont Blanc. Le résultat final reste précis : si le logiciel estime l'erreur à 1 cm, les ingénieurs retiennent finalement une incertitude de 5 cm... Comme quoi, même avec les méthodes les plus complexes et les techniques les plus en pointe, le savoir-faire humain et le pifomètre restent de mise. D'autant plus que la valeur finale de 4810,40 m « concerne le sommet de la couche de neige et de glace recouvrant le mont Blanc le 8 septembre 2001 à 7h00 UTC », dont on estime la hauteur à 30 ou 40 mètres. « Le mont Blanc a-t-il grandi ? s'interroge finalement Thierry Gat-

tacceca, ingénieur à l'IGN, chargé du gravimètre pendant l'expédition. Pour nous, il était admis que cette couche de neige était assez stable. Il semble finalement qu'elle augmente. Peut-être est-ce une conséquence du réchauffement global, qui accroît l'enneigement... » L'effet de serre soulèverait-il des montagnes ? Pour le savoir, il faudra renouveler les mesures du manteau neigeux qui chapeaute le mont Blanc. Une couche à l'intérieur de laquelle se trouvent encore les restes de l'observatoire astronomique installé là à la fin du XIX^e siècle par Jules César Janssen, fondateur de l'Observatoire de Meudon, et peu à peu englouti par les neiges éternelles. ■

DEUX SIÈCLES DE MESURES

date	altitude	méthode et "mesureur"
1775	4775 m	nivellement trigonométrique chevalier Schuckburgh
1787	4808,3 m	nivellement barométrique Horace Bénédicte de Saussure
1823	4801,9 m	nivellement trigonométrique Carlini et Plana
1863	4807 m	levée topographique colonel Mieulet
1894	4807,2 m	nivellement trigonométrique Henri et Joseph Vallot
1986	4808,4 m	positionnement GPS IGN
2001	4810,4 m	positionnement GPS IGN

