

# L'ALTIMÉTRIE PREND DE LA HAUTEUR

Dans l'histoire de la topométrie, l'altimétrie a toujours vécu selon des normes différentes de la planimétrie et ne s'est inscrite que progressivement dans la cartographie : figuré de terrain difficile à lire, hachures, puis courbes de niveau. Après des siècles d'imprécisions dues aux limites techniques face aux obstacles naturels, l'arrivée du Lidar aéroporté entraîne un changement de paradigme et, pour la première fois dans l'histoire de la cartographie, on atteint les limites ultimes de précision en altimétrie.

**MICHEL KASSER**

Président des ingénieurs géomètres de Suisse occidentale (Igsso)

On peut très facilement se servir de la direction de la verticale, et ceci sans limite de précision, et en tous lieux, en particulier sous terre. Un simple fil à plomb ou une surface d'eau libre ont suffi pendant des millénaires, et une fiole à bulle plus récemment. L'ampleur de la force de la pesanteur est telle qu'on peut observer cette direction avec une exactitude meilleure que le nanoradian si besoin est. Rien à voir avec la planimétrie, où n'existe aucune orientation absolue facile d'accès. Par exemple, on peut songer à la complication d'une visée sur l'Etoile polaire (qui en plus n'est pas tout à fait au pôle, distante de celui-ci de 0,4° en réalité) : une précision de 0,1" est envisageable, mais nécessite de disposer d'une heure exacte, et d'un théodolite très précis. Complication également pour une visée sur le Soleil, dont la vitesse apparente très élevée (15° par heure), la trajectoire complexe et le flux lumineux dangereux pour la vue rendent la faisabilité difficile, et l'accès à une haute précision exécutable mais peu réaliste.

Les besoins en altimétrie ont été très longtemps calqués sur le besoin en écoulements gravitaires de l'eau. Les habitats humains urbains sont très majoritairement dans les zones à faibles pentes, et les écoulements impliquent le creusement de tranchées, historiquement très coûteuses en main-d'œuvre. Les pentes des canalisations ont une incidence directe sur la profondeur des tranchées, il s'est donc toujours agi de limiter ces pentes, ceci impliquant d'atteindre une grande précision en altimétrie.

Dès les premières grandes triangulations (XVII<sup>e</sup> siècle) et jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle, dans les longues visées optiques (comme les visées de premier ordre de la dernière triangulation), le phénomène de réfraction n'était pas maîtrisé, de sorte que l'altimétrie



Sur la carte d'état-major (ci-dessus), les hachures marquent un progrès dans la lecture des reliefs autour d'Allègre, à comparer au rendu mal lisible de celui des alentours de Sisteron, zone très accidentée, sur la carte de Cassini (en haut à gauche), alors que, sur la zone peu accidentée de Champigny, le rendu est assez satisfaisant (à droite).

des points géodésiques était intrinsèquement peu précise, avec une erreur sensiblement proportionnelle au carré de la distance. Ceci en contraste avec les déterminations planimétriques dont l'erreur relative était indépendante des distances considérées, donc une erreur proportionnelle à la distance.

La géodésie et le nivellement ont donc suivi des voies très différentes. En France, le NGF (nivellement général de la France), pionnier mondial en la matière, ne prend naissance qu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (lire l'encadré page 45). Mais ce n'est que très progressivement que des éléments chiffrés d'altimétrie apparaissent en cartographie. La grande carte générale de France dite de Cassini (XVIII<sup>e</sup> siècle) n'en donne pas ; on note un





figuré de terrain localisant des zones en pente sous une forme linéaire, compliquant d'ailleurs quelque peu la lecture en zone montagneuse. Puis vient la carte d'état-major, au XIX<sup>e</sup> siècle. Le relief est figuré par des hachures, avec une densité liée à la pente, et quelques points cotés. Les cartes suivantes, au 1/50 000, 1/20 000 et 1/25 000, voient une généralisation de l'altimétrie chiffrée, avec l'emploi des courbes de niveau. Sur ce type de cartographie, la densité d'altitudes chiffrées devient de facto infinie, mais avec une précision très variable : elle dépend soit d'une mesure locale directe (le long de la courbe de niveau) soit d'une interpolation (entre les courbes), et varie donc de l'ordre de un à quelques mètres, avec un important effet de lissage des discontinuités locales.

Le processus mis en œuvre initialement était le levé direct à la planchette. Depuis près d'un siècle, c'est celui de la photogrammétrie à partir d'images aériennes. Il requiert un nombre important de points d'appui connus en altitude, fournis par le NGF. La base de cette opération est le couple, partie vue en stéréo sur deux images aériennes consécutives : le couple couvrait une surface de l'ordre de 20 km<sup>2</sup> pour des images au 1/30 000. Et, avant toute forme d'informatisation de la chaîne de calculs, il fallait au moins trois points connus en altitude par couple, à partir desquels l'altimétrie de toute la surface dudit couple était mesurée lors de la phase de restitution. Depuis ces débuts, les contraintes de mesures de terrain se sont heureusement considérablement allégées. Mais le point important à retenir est que c'est seulement avec cette technologie, dont Aimé Laussédut fut, en France au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le précurseur, et mise en œuvre sur de grandes étendues grâce à la possibilité de l'emploi d'avions au début du XX<sup>e</sup> siècle, qu'on a pu envisager des

## Le NGF et la notion de niveau zéro

Le nivellement général de France (NGF) a été considéré comme une grande priorité nationale à sa naissance, en 1857. Rattaché alors directement au Premier ministre, le NGF sera ensuite une composante des ministères chargés des travaux publics, puis intégré à l'IGN lors de sa création. Les enjeux principaux consistaient à :

- unifier les références locales permettant de faciliter la création ou la restauration des égouts, dans le cadre d'une nouvelle prise en compte des enjeux de santé publique dans les villes (jusqu'à là extrêmement sales). Ceci est intervenu entre autres à la suite des découvertes de Pasteur et des épidémies de choléra au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Et, si chaque ville disposait déjà d'ensembles parfois importants de repères de nivellement, c'était toujours dans une référence locale et indépendante. L'extension de ces agglomérations ne cessait alors de créer des complications entre tous ces systèmes de référence différents lorsqu'ils se chevauchaient ;

- faciliter l'implantation et l'entretien des voies ferrées, qui se généralisent dès cette époque. Pour les opérations de nivellement, la progression le long de ces voies facilitait le travail, car il s'agissait de pentes faibles et régulières. Pour les sociétés ferroviaires, c'était aussi un atout que de disposer de repères précis à proximité immédiate des voies. Le problème qui s'est posé immédiatement pour le NGF a été de définir un niveau zéro de référence. On imaginait à l'époque que le niveau de la mer serait la solution logique, et que le seul problème à résoudre serait celui de trouver une valeur moyenne fiable. Ceci s'est concrétisé par la mise en service du marégraphe totalisateur de Marseille, une merveille de mécanique, donnant sur une mer réputée dépourvue de marées. A ce niveau de connaissance des océans, les marégraphe servaient uniquement à donner le niveau de la mer instantané, pour permettre ou pas l'accès dans un port aux bateaux selon leur tirant d'eau. Le niveau moyen de la mer était supposé stable, aux événements météorologiques ponctuels près. La surprise a été grande de voir, sur plus d'une décennie (1885-1897), que le niveau de la mer Méditerranée ne cessait de changer et ne pouvait donc servir de référence millimétrique. La référence NGF est finalement constituée par un repère de référence et l'ensemble des repères proches, le zéro qui en découle est arbitraire, et proche du niveau moyen de la mer Méditerranée à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Depuis lors, la connaissance de la dynamique des océans a beaucoup progressé, en particulier avec les satellites radar océanographiques (*Seasat*, *Topex-Poséidon*, *Jason 1, 2, 3*, etc.)<sup>(1)</sup>, car l'enjeu est mondial, s'agissant de suivre les conséquences de l'évolution climatique.

(1) Lire *Géomètre* n° 2197, décembre 2021, page 41.

••• mesures altimétriques de précision homogène sur la totalité du pays.

Toutefois, l'objectif des cartographes était de fournir des levés sur toute la surface topographique, en d'autres termes, l'interface entre le sol et l'atmosphère <sup>(1)</sup>. Et sur toutes les zones boisées, l'opérateur observant les photographies aériennes dans son appareil de restitution ne pouvait voir que la cime des arbres, la surface supérieure de la canopée. C'était la seule possibilité dans les forêts à feuilles persistantes et dans les forêts à feuilles caduques. L'éclairage dégradé du soleil hivernal rendait de toute façon difficile d'obtenir des photos aériennes dans les périodes d'absence de feuilles. Dès lors, un travail important restait à mener sur le terrain lors de la phase dite « de complètement » : mesurer la hauteur des arbres et corriger l'altimétrie obtenue sur la canopée lors de la restitution. Cette situation, qui prévaut depuis les débuts de la photogrammétrie sur photos aériennes, a toujours été un frein important à l'amélioration de la précision altimétrique : on se souviendra ici que près du quart de la France métropolitaine est couvert de forêts, et plus de 90 % de la Guyane...

Cette perte de précision inévitable a parfois beaucoup compliqué les travaux d'aménagements hydrauliques. Citons l'exemple du barrage de Petit-Saut en Guyane, dont la mise en eau a révélé que la crête du bassin de retenue réel différait parfois de celle qui avait été prévue, la topographie sous la forêt très dense étant localement mal décrite par les cartes topographiques obtenues par photogrammétrie aérienne.

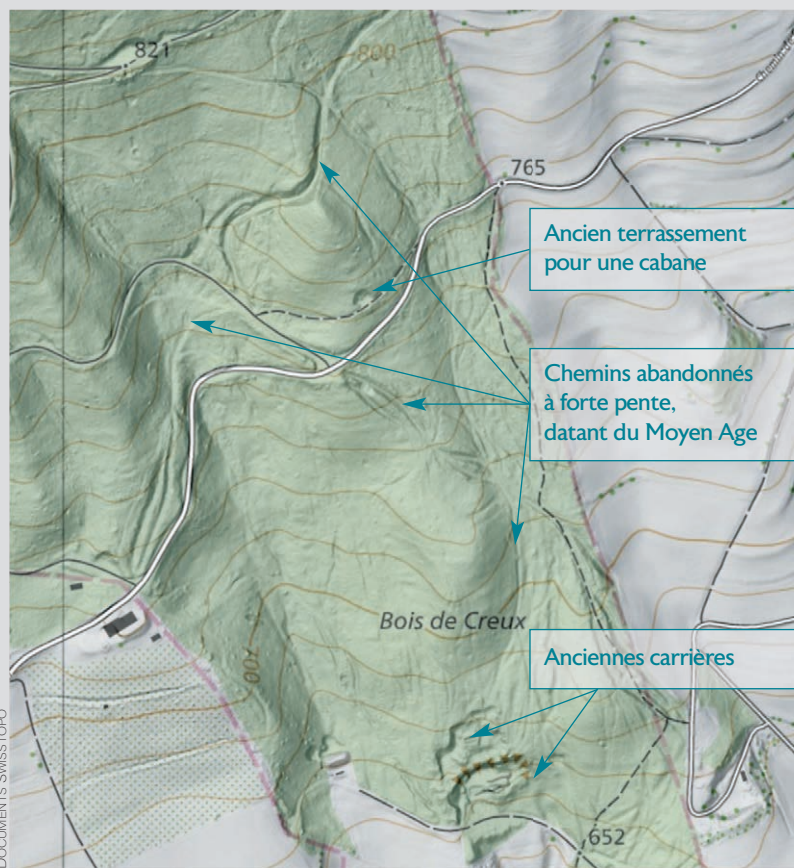
La situation technique a beaucoup changé dans les deux dernières décennies, avec la possibilité d'employer des scanners laser Lidar aéroportés à très haute cadence. Désormais, des pays entiers ont été équipés de tels levés, et beaucoup d'autres prévoient de le faire.

## La voie de la photographie aérienne

Le procédé technique du scanner laser est largement connu des géomètres, car les matériels disponibles ont bien progressé depuis le début du siècle, permettant des cadences d'acquisition proches de la limite physique, avec une précision nettement meilleure que le centimètre. La plupart des défauts originels ont été corrigés, les offres commerciales rendent ces matériels accessibles à toutes les entreprises. Le principal écueil qui justifie encore d'importants efforts industriels et scientifiques est relatif aux prétraitements des données obtenues, dont les volumes sont considérables, même avec les moyens informatiques actuels.

Les équipements Lidar aéroportés diffèrent tout de même un peu des stations terrestres de géomètres :

- les cadences d'acquisition sont limitées par la distance maximale mesurable. Par exemple, pour les technologies à impulsions, on ne peut envoyer une nouvelle impulsion laser que lorsque l'écho de la précédente a été détecté ;
- la portée requise est importante (typiquement de 800 m à 2 000 m), ce qui requiert une organisation adaptée afin de ne pas dépasser les seuils de sécurité laser ;
- le scanner laser est étroitement couplé à un ensemble permettant la localisation et l'orientation de chaque tir laser, basé sur

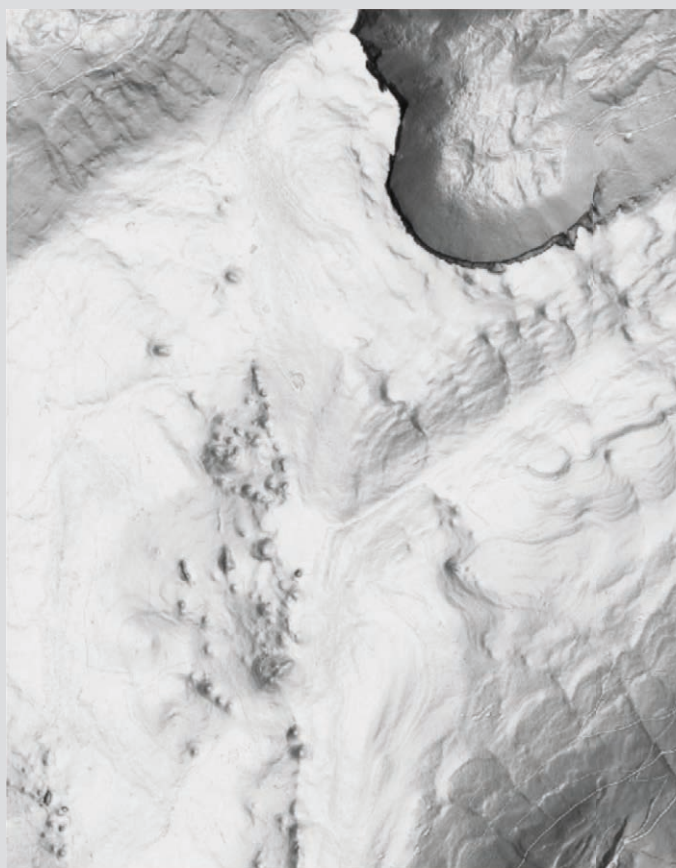


L'illustration ci-dessus montre une superposition de la carte au 1/25 000 avec un MNT Lidar à très haute résolution, avec un ombrage adapté. On y retrouve entre autres, dans une zone densément boisée du Jura suisse, des quantités de traces d'activités humaines permettant de mieux comprendre l'histoire locale. Depuis l'époque romaine, qui a vu une importante intensification des activités, les chemins se sont multipliés. A ces périodes reculées, les chemins avaient des pentes très fortes, car les transports (ânes, bœufs) étaient lents et leur vitesse dépendait peu de la pente. Cet exemple anecdotique montre la disponibilité de toute une classe d'éléments d'analyse géographique qui étaient pratiquement inaccessibles auparavant.

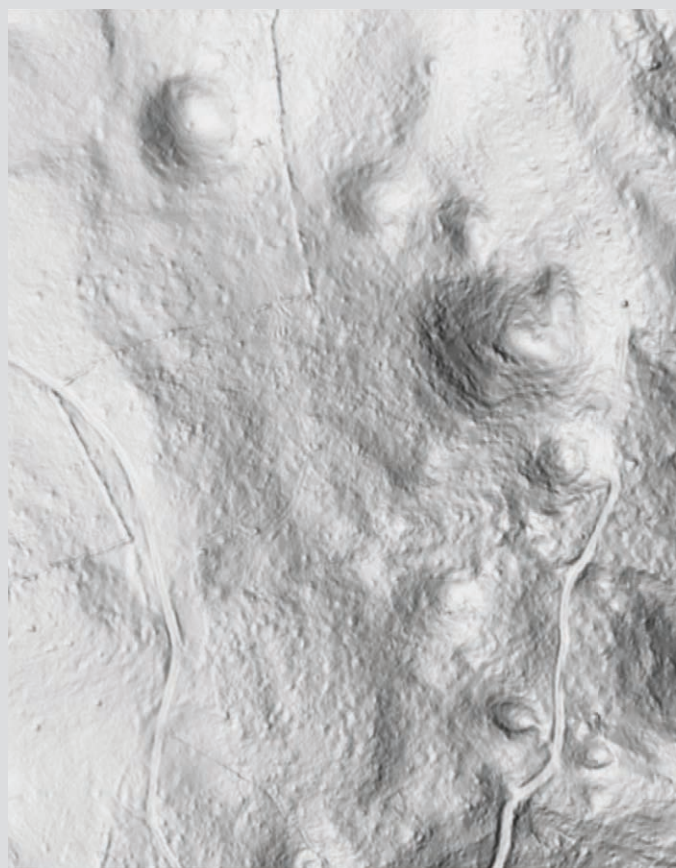
un ensemble centrale inertielle + récepteur GNSS, ensemble à la fois délicat, onéreux et extrêmement critique pour le bilan d'erreur global ;

- le signal laser obtenu en retour d'un tir est généralement analysé selon des tranches temporelles fines, afin de pouvoir identifier et mesurer une série d'échos multiples provenant d'un seul tir laser. C'est ainsi qu'au-dessus d'une forêt, le premier écho est obtenu sur la tête des arbres, et le dernier sur le sol (pour autant que le tir laser ait pu se faufiler entre les feuilles et les branches...);
- la surface du sol éclairée par un tir laser dépasse souvent 20 cm de diamètre, et donc l'écho mesuré est une distance moyenne entre le scanner Lidar et les éléments de cette tâche. Un certain lissage est donc inévitable, ce qui dégrade la précision théorique de l'instrument (qui est de l'ordre du centimètre) ;
- la masse de données acquises est énorme, nécessitant une informatique adaptée et des post-traitements très chronophages ;





Un autre exemple est illustré par cet affichage du seul MNT ombré, dans une zone du Jura voisine (ci-dessus). On y repère très aisément les dolines et autres caractéristiques d'un relief karstique typique. Et, avec un niveau de détail plus poussé (à droite), on voit précisément des dolines et des murets construits par les bergers pour limiter le vagabondage du bétail.



– l'ordre de grandeur du coût du matériel et de son installation sur un avion est le million d'euros.

Les performances typiques de tels matériels, nécessairement opérés par des sociétés spécialisées, sont actuellement d'une dizaine de points mesurés par mètre carré de sol <sup>(2)</sup>, avec une classification faite entre le sol et le reste, appelé « sur-sol » : végétation, bâtiments. Une grande partie du traitement des mesures brutes est effectué par des logiciels spécialisés, mais il reste un gros travail manuel à effectuer, ne serait-ce que pour évacuer les artefacts de ce type de mesure, qui sont peu intuitifs et très gênants.

L'élément important à noter, qui explique cette longue introduction sur les aspects altimétriques de la cartographie, est le changement complet de paradigme qui intervient actuellement avec l'entrée en scène du Lidar aéroporté, et du modèle numérique de terrain (MNT) qui en résulte. Pour la première fois dans l'histoire de la cartographie, on atteint les limites ultimes de précision et de densité pour décrire le sol, et on parvient à cartographier ce sol en ignorant le sur-sol. A quoi en effet pourrait désormais servir d'obtenir davantage de précision ? La rugosité naturelle du sol rendrait cette démarche sans objet.

En matière de perspectives nouvelles ouvertes, on peut faire le

rapprochement avec les débuts de la photographie aérienne (Nadar en 1858 et, en pratique, après 1920). La vision du sol (et de son sur-sol...) depuis un point haut a été un point de départ majeur dans le domaine de l'archéologie, d'abord par photos aériennes noir et blanc, puis en couleur, puis avec une bande infrarouge, puis images spatiales avec de plus en plus de bandes spectrales, puis radar, etc.

Il en est un peu ainsi avec les levés au scanner Lidar. Lorsqu'on s'intéresse aux traces des activités humaines du passé, qu'il soit récent ou extrêmement ancien, les MNT Lidar révèlent des quantités d'informations jusqu'ici entièrement ignorées, même sous des forêts denses et peu pénétrables. L'intérêt archéologique est certes évident, permettant de faciliter la protection du patrimoine, mais l'utilisation pour mieux comprendre l'occupation des sols dans l'histoire récente est au moins aussi importante.

En conclusion, l'IGN a annoncé la généralisation de tels levés sur toute la France, en accès gratuit, et on peut en anticiper de nombreuses possibilités d'améliorer la connaissance des territoires et de leur histoire, ceci tout particulièrement pour les zones boisées. ●

(1) Le terme altimétrie se différencie du terme bathymétrie, réservé aux mers, lacs, rivières et autres plans d'eau, où il décrit la profondeur par rapport à la surface moyenne de l'eau, autrement dit l'interface entre le sol et l'eau. Il faut noter à titre d'anecdote que, historiquement, les courbes de niveau ont été utilisées en premier pour la bathymétrie.

(2) Avec une tache au sol de 20 cm de diamètre (valeur physiquement incompressible), une densité de points plus importante que 10 pts / m<sup>2</sup> devient peu utile : on est donc au niveau de la limite physique du dispositif.