

Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique *partie 1/4*

■ Paul COURBON



L'AFT est heureuse de diffuser l'essai de Paul Courbon qui retrace l'évolution exponentielle des matériels topographiques pendant les cinquante dernières années. Sa contribution sera publiée en quatre parties dans les numéros d'XYZ de 2007. Le recueil complet de son remarquable travail sera ensuite disponible dans les publications de l'AFT.

En guise d'introduction

*Il faut aux vérités de la science de belles histoires
pour que les hommes s'y attachent.*

Denis Guedj, les cheveux de Bérénice

La jeunesse est tournée vers l'avenir et plus rarement vers le passé. Ce n'est bien souvent qu'avec l'âge que l'on s'intéresse à ce qui s'est fait avant nous, quand un avenir beaucoup plus réduit nous incite à nous pencher sur un passé plus riche qui devient tout à coup passionnant!

Après avoir cessé mon activité professionnelle, j'ai enfin pris le temps de lire des ouvrages tels que *"Sciences géographiques dans l'Antiquité"* de Raymond d'Hollander ou *"Mesurer la terre"* de J.J. Levallois. Le premier ouvrage nous laisse admiratifs envers les savants de l'antiquité, lesquels n'avaient ni nos acquis de connaissances, ni nos moyens de travail et d'investigation, mais seulement leur sens de l'observation, leur réflexion et leur capacité à analyser les phénomènes observés. Dans le second, nous sommes encore admiratifs envers Picard, les Cassini, Delambre, Méchain, mais aussi les savants qui allèrent mesurer un arc de méridien au Pérou et en Finlande, à une époque où les transports étaient une véritable aventure. Nous revivons leurs discussions, leurs réflexions, parfois leurs disputes et l'ampleur des problèmes rencontrés. Si l'Illiade et l'Odyssée n'avaient déjà été écrites, la relation de ces aventures scientifiques les aurait largement supplantées !

Cependant, à ma connaissance, personne ne s'était lancé dans la description détaillée d'une autre histoire, plus récente, moins aventureuse et pourtant très dense : l'explosion des techniques topographiques. C'était un vide à combler, avant d'attendre que le temps ne rende ce comblement de plus en plus difficile. Le sujet s'avéra vite plus complexe qu'il ne paraissait car cette explosion est liée à celle de l'électronique et de l'informatique dont le topographe n'est pas un spécialiste. De plus, quand on est en activité, on ne note pas les dates. On vit l'apparition de toutes les nouvelles techniques, parfois avec retard et sans poser de questions. Trente ou quarante ans après, les lacunes se sont accumulées et la tâche devient singulièrement compliquée. Ceci, d'autant plus que les publications n'avaient pas à l'époque la fréquence et la qualité des publications actuelles rendues beaucoup plus aisées par le traitement de texte, les logiciels de mise en page et l'informatisation de la reprographie.

Quand on fait des recherches, de nombreux documents manquent de clarté, car de nombreuses inventions ou avancées technologiques étaient en gestation depuis longtemps. Il y a souvent confusion entre la conception d'un prototype non opérationnel et sa production industrielle. Il y a aussi une période d'inertie entre la première mise en vente d'un produit et le moment où ce produit commence à être connu et adopté par un grand nombre d'utilisateurs. Aussi, les dates recueillies ne sont-elles pas toujours nettes et les lignes qui suivent seront parfois incomplètes ou comporteront des erreurs inévitables. C'est pourquoi je préfère les intituler "essai". Je remercie par avance ceux qui me feront part de mes oublis et inexactitudes.

Je dois ajouter que, bien qu'ayant effectué de nombreuses missions à l'étranger, j'ai travaillé essentiellement avec des sociétés françaises ou avec l'IGN. Je me réfère donc principalement à la France en ce qui concerne mon expérience et mes souvenirs professionnels.

Il faut aussi analyser le but de ce travail. Il n'est pas de réécrire un cours sur toutes les techniques abordées, des ouvrages détaillés existent ou sont censés exister. Censés exister, car les ouvrages pédagogiques ont toujours un temps de retard par rapport à l'éclosion d'une technique! Cependant, il est certain qu'un historique de l'évolution topographique nécessite un minimum de rappels techniques. Il y a là un exercice très difficile qui consiste à faire une synthèse correcte de ce qui a été écrit, tout en restant accessible au plus grand nombre de lecteurs. C'est l'exercice périlleux de la vulgarisation qui amènera toujours des critiques concernant telle ou telle simplification jugée parfois excessive par les spécialistes.

Dans un premier temps, j'avais écrit un projet d'article comportant 17 pages de texte hors illustration. J'en mesurais les lacunes, ainsi que les erreurs qu'il devait contenir. Mais, c'était une "amorce" et je le proposais à l'Association Française de Topographie (AFT) pour publication. L'article fut jugé très intéressant, car c'était le premier du genre, mais ses lacunes et erreurs furent vite relevées et on me proposa de l'étoffer et de rechercher la coopération de spécialistes en vue de faire une publication plus volumineuse qu'un simple article. Je remercie chaleureusement l'Association pour l'intérêt qu'elle a apporté à mon travail.

Recherche de la documentation

Quand on habite à Toulon, loin des grandes écoles de topographie, la recherche de documentation est difficile. Il m'a fallu de nombreux appels téléphoniques, messages électroniques, courriers et des voyages rapides à Champs-sur-Marne, Paris, Strasbourg.

Par Internet, on peut aussi avoir de très nombreuses informations et avoir accès à plusieurs musées virtuels. Mais, la logique dans la recherche n'est pas toujours... logique !

De plus, les informations des musées virtuels sont souvent brutes et en vrac, sans explications ou commentaires. Elles comportent des incohérences de dates entre les différents musées ou informateurs. Aussi, il faut faire un tri et des recoupements.

Bibliographie

LEVALLOIS J.J. - Boucher C. - Bourgoïn J. - Comolet-Tirman A. - Robertou A. 1988 - *Mesurer la terre, 300 ans de géodésie française*, AFT.

D'HOLLANDER Raymond 2002 - *Sciences géographiques dans l'antiquité*, AFT.



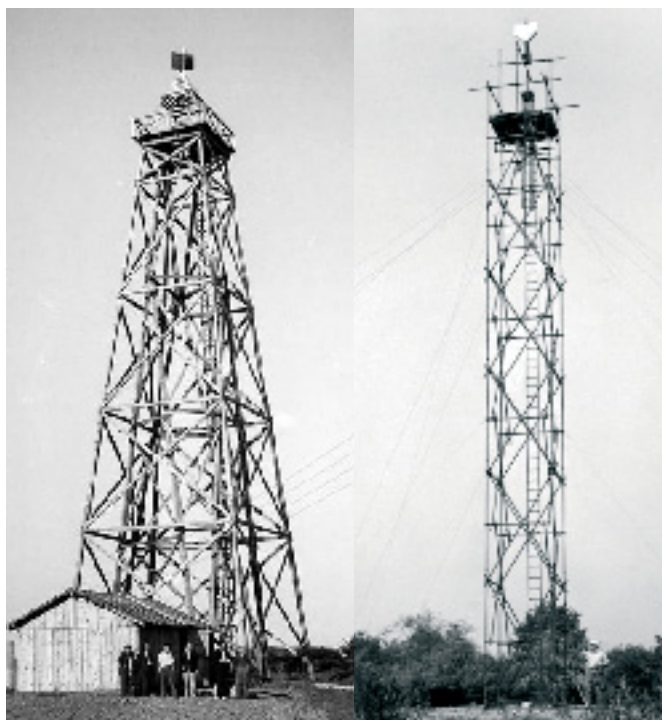
Etat des lieux en 1960

J'ai fait partie de ceux qui ont vécu la grande explosion technologique après avoir appris à travailler et commencé leur profession en utilisant des méthodes qui avaient peu évolué depuis plus de deux siècles. En 1950, la seule grande avancée technique depuis le XVIII^e siècle était le lever photogrammétrique à partir des photographies aériennes. A un degré moindre, il fallait y ajouter la conservation du temps lors des déterminations astronomiques et les liaisons radio permettant d'avoir l'heure de Greenwich au moment du pointé des étoiles. Mais, le principe de base restait le même. Quand on regarde la fermeture des triangles observés par Delambre et Méchain dans la décennie 1790, on s'aperçoit que la précision des mesures angulaires avait peu varié, seule l'ergonomie des appareils s'était améliorée, rendant les observations angulaires beaucoup plus rapides et faciles. Il faut toutefois noter l'amélioration énorme de la précision des mesure de base apportée plus tard par le fil invar. Lors de mes deux ans à l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques (ENSG), de 1956 à 1958, nous avons fait beaucoup de levés à la planchette qui avaient occupé plus de la moitié de nos dix mois de travaux de terrain ; l'autre petite moitié avait été consacrée à la stéréopréparation des levés photogrammétriques, la géodésie et l'astronomie de position. Comme du temps de Picard, au XVII^e siècle, c'était encore le règne de la triangulation et nous avons fait une mesure de base au fil invar sur la crête sub-horizontale du Petit Lubéron où nous avons aussi monté une tour d'observation de vingt mètres de haut. Tous les calculs se faisaient aux machines manuelles Facit ou Vaucanson et le gros problème était celui de l'interpolation non linéaire des tables de valeurs naturelles ou des catalogues des étoiles. Des séances de calculs se faisaient



© IGN - droits réservés

Photographie montrant un tripode Ragué, utilisé en géodésie, monté dans la cour du Service Géographique de l'Armée, 136 rue de Grenelle, avant la création de l'IGN. ■ ■ ■



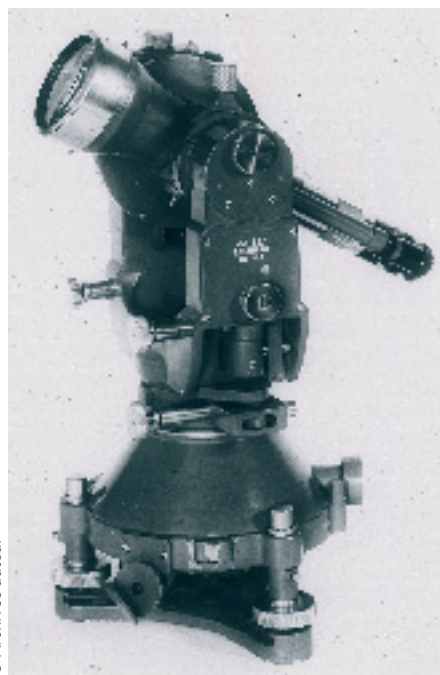
Deux tours géodésiques sur lesquelles étaient montés les théodolites en terrain plat et boisé. Le géomètre qui passait plus tard sur la borne pour se rattacher en Lambert, mais qui n'avait plus que son "petit trépied" de 1,6 m de haut, avait souvent des problèmes d'orientation !



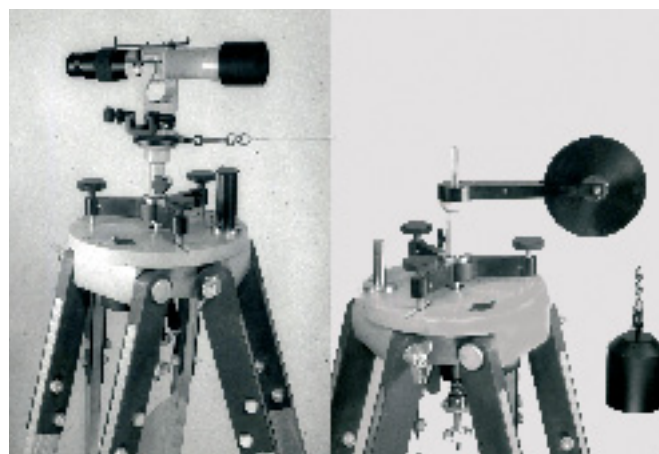
Installation d'une plateforme en haut d'un clocher. C'était du grand art qui permit à une génération d'échafaudiers d'exprimer ses talents et de géodésiens d'affronter le vertige.



Pose d'une borne du 1^{er} ou 2^e ordre. D'un poids de 200 kg ou plus, leur pose demandait un treuil. Celles du 4^e ordre pesaient entre 50 et 80 kg. En montagne, on préférait sceller des repères et des plaques !



Le summum en théodolite : le Wild T3 employé pour la triangulation géodésique française. Mais, principalement à cause des erreurs d'excentricité et de graduation du limbe on faisait jusqu'à 2 séries de 8 ou 16 réitérations en fonction de l'ordre du réseau.



Le fil invar, d'une longueur de 24 mètres et qui permet, malgré l'amplification des bases, d'avoir une précision inférieure à 10^{-5} sur le réseau géodésique français. A gauche, la lunette qui servait à l'alignement, à droite, le poids tenseur qui annulait l'erreur de chaînette.

aussi avec les tables de logarithmes. Dans les imprimés de calcul, nous retrouvons encore la méthode de Delambre, imaginée près de deux siècles auparavant. Les calculs de moindres carrés se faisaient avec les fastidieux tableaux de Doolittle. Au cours des levés de détail, les longueurs des polygonales étaient "chaînées" au double décimètre et au fil à plomb ; quant aux points de détail, la mesure de leurs distances était stadimétrique et tous les calculs de dénivellation, de réduction à l'horizontale, se faisaient avec une règle à calcul. Evidemment, l'intégralité des observations et résultats était notée à la main, sur des feuilles ou carnets d'observations.

En 1961, au retour du service militaire en Algérie, notre première mission de terrain avait consisté en quatre mois de lever direct 1 : 20.000 à la planchette sur les feuilles de Castelnauudary en vue de remplacer la vieille carte 1 : 80.000. Début 1962 avait suivi une autre mission (la dernière du genre) de lever direct 1 : 40.000 à la planchette à l'ouest de



Signal léger de la géodésie de 4° ordre au dessus de sa borne.



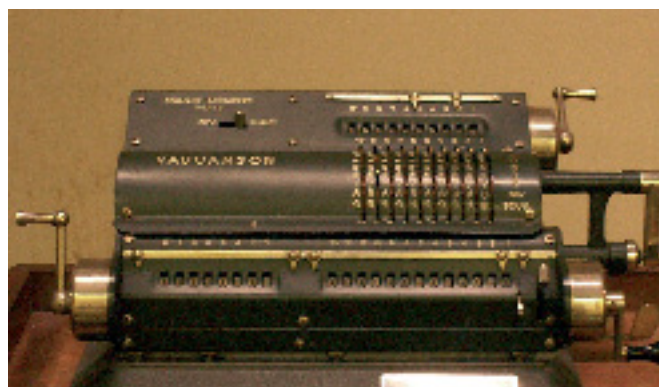
Un monument : l'une des 50.000 bornes de la NTF qui équipaient le territoire français. Avec le RBF et le GPS en réseau permanent, ce type de borne va bientôt faire partie du patrimoine historique...

l'Oued Moulouya pour la carte 1 : 50.000 du Maroc. Ces levers à la planchette devaient nous amener à une parfaite interprétation ou critique des courbes et de la planimétrie lors de la vérification des planches brutes issues de la photogrammétrie. Il fallait travailler deux ans au service de la topographie avant d'espérer une autre affectation. A l'IGN, c'était le règne de la planchette !

En 1968, j'avais pris deux ans de disponibilité pour voir ce qui se faisait hors de l'IGN. J'avais travaillé chez des géomètres-experts où l'instrument roi était encore le tachéomètre Sanguet ou le tachéomètre TARI, avec mesure stadimétrique des distances. Quand un géomètre achetait un théodolite ou un tachéomètre, c'était pour toute sa vie professionnelle ! La mesure des longueurs de cheminement se faisait encore à la chaîne ou au double décamètre, les calculs de polygonaux à la table de logarithmes, les reports des points de détail rayonnés au rapporteur SYMPA sur une minute carroyée à la main...



La cheminée Kodak, en bordure du Bois de Vincennes. Elle a aujourd'hui disparu. C'était un point géodésique qui a servi aux relèvements ou à l'orientation des exercices de terrain pour des générations d'élèves de l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques.



L'arme absolue du géodésien et du topomètre : la machine à calculer Vaucanson qui permettait d'avoir 13 chiffres significatifs. Elle nécessitait, hors la vigueur du poignet, beaucoup de patience lors des fastidieuses interpolations de tables !



© IGN - droits réservés

Le gros progrès de l'astronomie de position fut apporté par les liaisons radio permettant d'avoir les "top" de l'heure de Greenwich au moment du pointé des étoiles. Sur le terrain, pour l'équipement des cartes 1/200 000 africaines, était employé le fameux poste militaire américain ANGRC9 alimenté par la non moins fameuse "gégène", dynamo actionnée à la main.





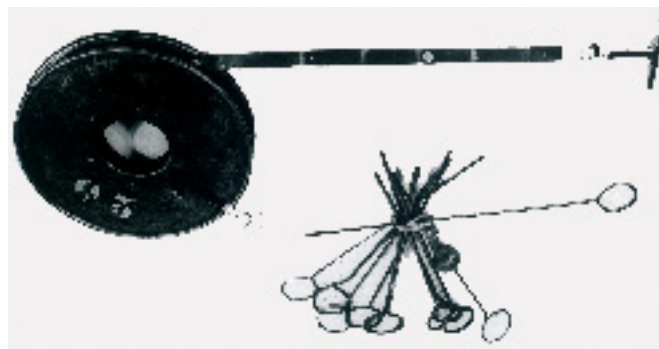
Travail à la planchette. L'alidade nivellatrice sert aux intersections et relèvements, l'éclimètre Puissant détermine les points avec distance stadimétrique, la règle à calcul permet les réductions à l'horizontale et le calcul des altitudes. Mesures et calculs sont notés sur le carnet. Pour la cartographie 1/20 000 et le dessin des courbes de niveau, l'examen stéréoscopique des photographies aériennes apportait une grande aide dans le travail.



Le tachéomètre Sanguet qui équipa de nombreux géomètres français. Le système de barrette latérale permettait un contrôle des mesures de distance et la réduction directe à l'horizontale.

- Le temps que les nouvelles techniques se généralisent et que leur coût devienne plus accessible, la véritable révolution n'arriva que vers 1982-1984 et encore, pas chez tous les géomètres français!

Le jeune "géomètre au bois dormant" qui aurait été piqué par une mouche tsé-tsé en 1968 et qui aurait été réveillé en 2003 par le tendre baiser d'une Laetitia Casta, aurait certainement été très surpris de retrouver ses camarades de promotion gri-



Ruban acier et fiches utilisé lors des mesures des cotés de polygonale. La cutellation permettait d'avoir les distances horizontales.

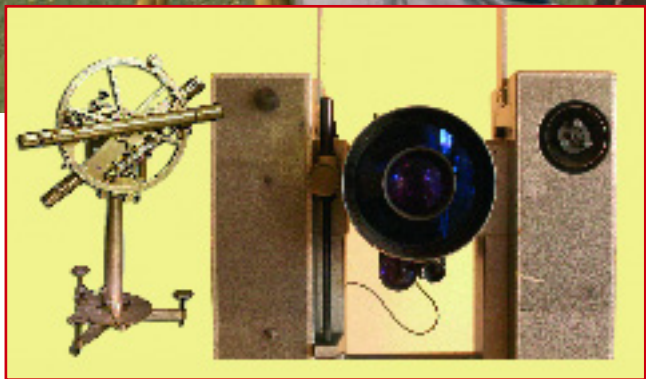
© Archives auteur

sonnants, chauves ou bedonnants ! Il aurait été encore bien plus surpris et complètement perdu en tentant de reprendre son activité professionnelle...

Les raisons de l'explosion technologique

En premier lieu il faut avancer l'essor de l'électronique accéléré par la deuxième guerre mondiale, avec l'invention du radar ou le décodage des messages secrets. Puis, dans les années qui suivirent la guerre, l'arrivée de l'informatique.

La deuxième guerre mondiale généra en outre l'emploi de fusées de plus en plus performantes avec lesquelles l'Allemagne voulaient réduire l'Angleterre à merci. A la fin de la guerre, les alliés "kidnappèrent" les savants allemands pour poursuivre ces recherches. Cela devait aboutir au lancement du premier satellite artificiel de la terre, le Spoutnik, réussi par les Russes le 4 octobre 1957. Moins de 4 mois plus tard, dans la nuit du 31 janvier au 1^{er} février 1958 le premier satellite américain, l'Explorer, était mis sur orbite par la fusée Juno 1. La France les imitait le 26 novembre 1965 avec la fusée Diamant A qui plaçait le satellite Astérix en orbite, préfigurant l'aventure d'Ariane. A première vue sans rapport avec la topographie, ces satellites préparaient l'avènement du GPS.



La première révolution : la mesure électronique des distances

Mesure de la distance à partir de la vitesse de propagation de la lumière, le Géodimètre

L'invention du radar pendant la seconde guerre mondiale amène indirectement la mesure électronique des distances en topométrie. Le suédois Erik Bergstrand est à l'origine de ce type de mesure. En 1947, il expérimente un prototype pour mesurer la vitesse de la lumière sur une base d'environ 8 km, correspondant à un côté de la géodésie suédoise. Il obtient un résultat de $299.793,1 \text{ km/s} \pm 0,25$ ce qui correspond à une précision relative de $0,8 \times 10^{-6}$.

Il est intéressant de rappeler la première détermination de la vitesse de la lumière imaginée par Hippolyte Fizeau en 1849. Ce dernier avait dirigé sur un miroir éloigné de 9 km environ, un pinceau lumineux à travers les 720 dents d'une roue en

rotation. Lorsque la roue avait atteint une certaine vitesse angulaire, le rayon lumineux réfléchi par le miroir était arrêté par les dents. La vitesse angulaire de la roue dentée étant mesurée, on pouvait déduire le temps mis par les dents pour obturer le faisceau réfléchi. La vitesse de la lumière était alors égale au quotient du double de la distance du miroir par ce temps. Fizeau trouva 313.290 km/s. Cette méthode illustre comment un savant ou un chercheur peut imaginer un moyen détourné qui lui permette d'obtenir la valeur d'une quantité sans la mesurer directement.

En 1947, le problème restait le même : le radar utilisait bien le temps mis par le temps aller-retour d'une onde, mais la précision de la mesure du temps était trop faible pour le but recherché par Bergstrand. Comme Fizeau il rechercha un moyen indirect, les procédés mécaniques du premier étant

■ ■ ■

■ ■ ■ remplacés par des techniques électro-optiques et électroniques. Fut alors explorée la méthode de mesure déduite du déphasage d'une longueur d'onde modulée. Suite aux travaux de Lebedew, Balakoff et Wafiadi en 1936, puis de ceux de Hüttel en 1940, Bergstrand utilise alors une cellule de Kerr reliée à un oscillateur de cristal, d'une fréquence de 10 Megahertz qui module l'onde lumineuse émise (onde porteuse). Il mesure la différence de phase entre l'onde modulée émise et celle réfléchie par un miroir et détectée par une cellule photoélectrique. Nous n'avons pas d'autres détails pour mieux expliquer la méthode de cette expérience.

■ Les débuts du Géodimètre

En 1948, Bergstrand pense que l'on peut inversement obtenir une distance en connaissant la vitesse de la lumière. La même année, il se rapproche du constructeur suédois AGA pour obtenir une assistance technique.

Comme précédemment, le Géodimètre imaginé par Bergstrand utilise une onde lumineuse modulée par une cellule de Kerr reliée à un oscillateur à quartz. On dirige des impulsions lumineuses de fréquence connue et d'intensité variable vers une station éloignée dont on recherche la distance. Après réflexion sur un miroir installé en cette station, on les reçoit dans un récepteur spécial placé juste à côté de l'émetteur. Là, ces impulsions lumineuses sont transformées en courant de faible intensité par une cellule photoélectrique. Lorsque la distance recherchée est une certaine fonction de la longueur d'onde des impulsions émises et réfléchies, la déviation d'un galvanomètre sensible devient nulle. On peut alors déterminer la distance à mesurer en fonction de la longueur d'onde des impulsions. Evidemment, dans le détail, la méthode comporte des dispositifs techniques beaucoup plus complexes, faisant appel entre autres à la polarisation de la lumière émise, mais leur description dépasserait le cadre du but historique de nos écrits et nous renvoyons nos lecteurs aux ouvrages de la bibliographie.

Il est intéressant de donner l'origine du mot "Geodimeter" devenu en français "Géodimètre". C'est l'abréviation de l'ap-

pellation anglaise "Geodetic distance meter".

Le prototype, d'un poids de 100 kg, nécessitait un générateur de 400W. Une mesure demandait 2 à 3 heures ! Ce temps fut ramené à une heure pour le premier Géodimètre commercialisé en 1953, puis à 20 minutes en 1958, sur le modèle 2A. Bergstrand utilisait deux modulations de l'onde porteuse, une de 10MHz ($\lambda = 30$ m) et une seconde déduite des oscillations d'un cristal auxiliaire et telle que : $101\lambda_1 = 100\lambda_2$. Ce rapport permettait de connaître le nombre de longueur d'ondes (ambiguïté) contenu dans la distance à 100 près, soit 3 km pour la distance aller-retour. Cette particularité nécessitait donc que l'on connaisse préalablement la longueur mesurée à 1,5 km près. La résolution des "ambiguïtés" en était à ses balbutiements, bien avant l'apparition du GPS !

■ Le développement du Géodimètre

Le premier modèle commercialisé (Model 1) fut testé en 1953 par l'Ordonance Survey anglais et par l'US Army Map Service qui fit l'acquisition de cinq des dix modèles vendus cette année là. L'appareil était utilisé la nuit avec une portée de l'ordre de 30 km. La précision obtenue sur les mesures de distances était de 1/300 000.

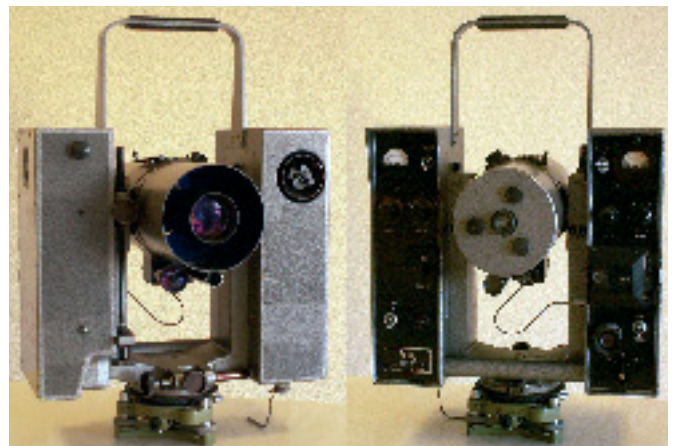
Le modèle 2 fut lancé en 1955. En 1957, 50 exemplaires avaient été vendus. Il comportait trois modulations de fréquence au lieu de deux. L'onde lumineuse visible produite par des lampes à vapeur de mercure, nécessitait une tension de 500V et permettait d'atteindre une portée de 50 km de nuit (2 km seulement le jour du fait du "bruit" trop fort de la lumière ambiante). Plus tard, en 1960, lors de l'implantation de caméras de suivi des fusées à Cape Canaveral, avec quelques modifications apportées par les américains, une précision de 1/1 200 000 fut obtenue. A la même époque, le constructeur donnait comme précision 5mm \pm 1mm/km, ce qui était extraordinaire. Il était évidemment nécessaire de faire les corrections en fonction de la pression de l'air et de la température sèche.

Fin 1958 apparaît le Geodimeter Modèle 4A. Ce "petit appareil", d'un poids de 17 kg sans la batterie, fonctionnait avec une bat-



© Archives auteur

Le Géodimètre Modèle 3, un monument.



Le Géodimètre modèle 6 vu devant et derrière. C'est le premier modèle à optique de réception et d'émission coaxiale.

terie de 12 volts. Il avait une portée allant de 15 mètres à 5 km. Pour ces courtes distances, les lampes à vapeur de tungstène remplaçaient celles à vapeur de mercure. C'est le premier appareil conçu pour un usage de topométrie et non de géodésie. Bien qu'encore élevé, son prix le rendait accessible à des topographes indépendants, il fut surtout employé aux Etats-Unis. Le modèle 4B, peu différent, apparut au printemps 1959.

En 1964 apparaît le modèle 6, le premier à utiliser des transistors, une lampe à vapeur de tungstène et, pour la première fois, une optique émetteur-récepteur co-axiale. Fonctionnant sur batterie de 12V, il pesait 17 kg. Il avait une portée de 2 à 3 km de jour et de 15 km la nuit. Il offrait la possibilité de remplacer la lampe à vapeur de tungstène par une lampe à vapeur de mercure. Cette dernière lampe valait un quart du prix du distancemètre et nécessitait, en outre, de remplacer la batterie par un générateur capable de produire un voltage beaucoup plus élevé.

A partir de 1967, AGA délocalise une partie de sa production aux USA, où les Géodimètres sont montés dans le New Jersey avec des composants suédois. C'est ainsi, qu'en 1968, apparaît le modèle 8 utilisé pour mesurer des chaînes géodésiques à travers le pays. C'est le premier modèle à remplacer le rayon lumineux par un rayon laser. Par ailleurs, des modèles dérivés du modèle 4, tels le 4D et le 4Ds, équipés soit de lampe à vapeur de mercure, soit d'un laser, permirent d'obtenir des performances très intéressantes : avec le modèle 4L, une portée de 21 km de jour et de 42 km de nuit pouvait être atteinte.

Dans les modèles 6A et 8, changement important dans les modulations de fréquence, il y avait quatre phases f_1, f_2, f_3, f_4 proches les unes des autres et telles que :

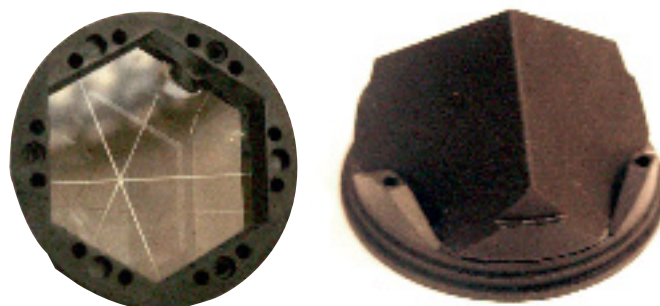
$$f_2 = f_1 + f_1/400, f_3 = f_1 + f_1/20, f_4 = f_3 + f_1/10000 \text{ ou } f_4 = f_1 + f_1/20 + f_1/10000$$

Par différences de phases, à la manière d'un vernier, on pouvait déterminer ainsi l'ambiguïté du nombre entier de phases contenues dans la distance mesurée. Cette méthode est aussi appelée "hétérodyne".

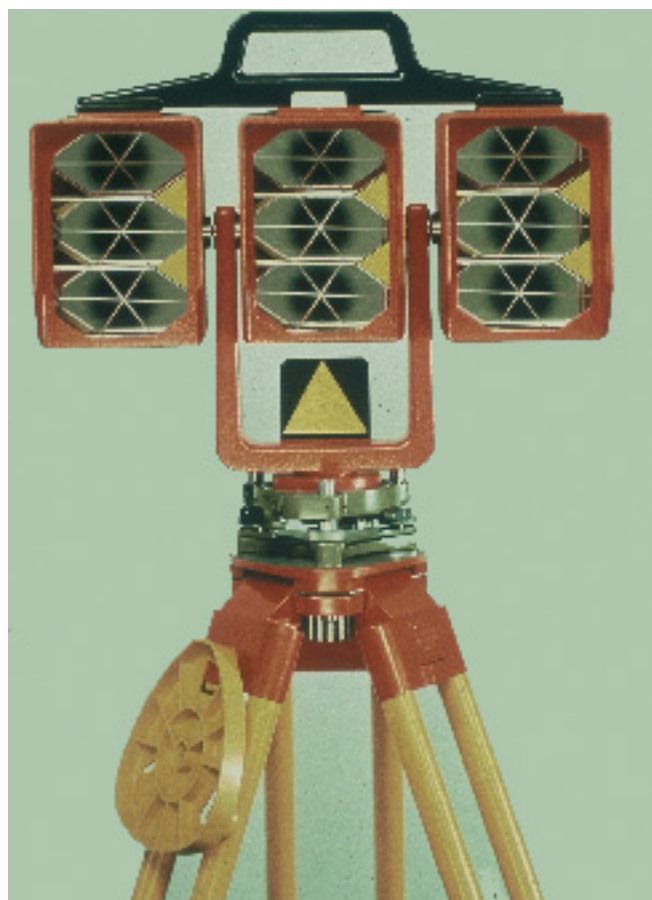
En 1972 est produit le modèle 76 développé pour les besoins du marché américain. Ce modèle qui préfigure les distancemètres modernes, a un système de lecture automatique, évitant le changement manuel des modulations de fréquence (automatic read-out).

■ Les réflecteurs

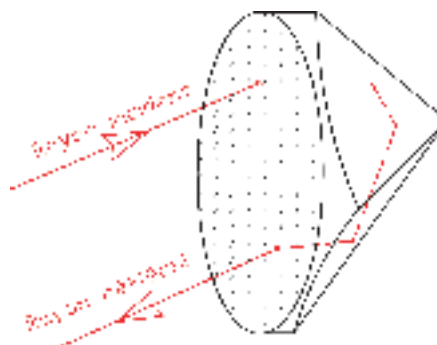
Dans mes recherches, j'ai constaté le même type d'oubli que celui commis par de nombreux auteurs qui se sont attachés à la géodésie au XVIII^e siècle. Dans cette histoire de la géodésie, ils nous décrivent tous les instruments de mesure angulaire, mais ignorent la nature des points visés : avec les lunettes de l'époque, comment matérialisait-on une cible située à 30 kilomètres ou plus ? Seuls les vrais géodésiens ont pensé à ce détail ! Ici, même type d'oubli. Comment étaient les premiers réflecteurs ? Les mesures historiques de 1947 ou 48 furent faites sur un miroir plan, ce qui supposait bien des problèmes



un prisme "coin de cube" ou rhomboédrique vu devant et derrière.



Batterie de 9 prismes pour mesures lointaines.



Après réflexion sur ses trois faces, le prisme rhomboédrique ou en coin de cube, renvoie le rayon dans la même direction, quelque soit l'incidence de ce rayon sur le prisme.

■ ■ ■ pour l'orientation correcte du dit miroir. Peu après on utilisa aussi un réflecteur sphérique qui devait être orienté à mieux que 30 minutes.

En fait, le premier réflecteur prismatique aurait été utilisé pour la première fois par l'US Army Map Service, en 1953. Cependant, le plus ancien document que j'ai vu représentant une batterie de trois "prismes coin de cubes" ou prismes rhomboédriques, date de 1961 ; il accompagne la photo d'un Géodimètre Modèle 4. Pouvons-nous en déduire que les prismes en coin de cube se sont généralisés avec le Modèle 4, fin 1958 ou début 1959 ? De 1966 à 1970, lors des travaux effectués par l'IGN sur le 12^e parallèle, il en fallait jusqu'à 27 en fonction de la distance mesurée 15 à 20 km.



Les Telluromètres MRA1 et 2. Sur le MRA2 on voit l'antenne nécessaire à la propagation des ondes radio. Sur les deux, on voit le petit écran cathodique où se forme le cercle coupé qui permet de déterminer la distance.

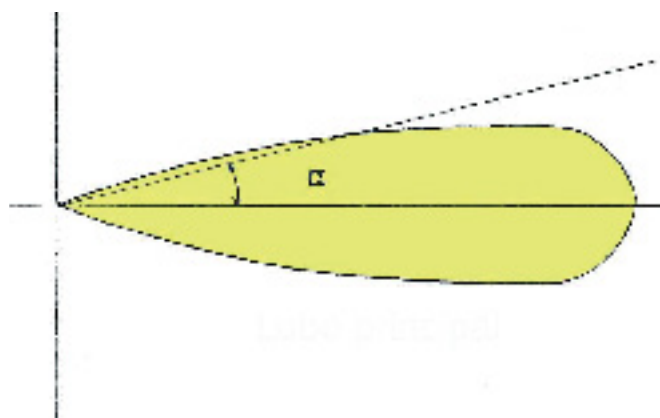
Mesure de la distance par différence de phase d'une onde électromagnétique (microwave), le Telluromètre

L'emploi des ondes électromagnétiques pour mesurer des distances avait déjà été suggéré par le physicien Nikola Tesla dès 1889. Le premier prototype d'un distancemètre de ce type fut construit en 1926 par Schegolew, Boruschko et Viller à Leningrad.

Mais, ce sont les sud-africains, avec T.L. Wadley, qui développèrent ce principe à partir de 1954. Ils réalisèrent le premier modèle commercial avec le Telluromètre MRA1, construit au Cap et présenté en 1957. D'autres modèles suivirent, tels le MRA2 ou le MRA 101.

L'onde lumineuse était remplacée par une onde électromagnétique. Pour obtenir une propagation en ligne droite, réduire le lobe d'émission et ainsi limiter les réflexions parasites, sans pour autant mettre en œuvre une source de grande dimension, il apparaissait qu'il fallait utiliser des ondes porteuses d'ordre centimétrique d'une fréquence de 3 à 30 GHz. Cependant, la nature de l'onde électromagnétique crée des problèmes différents de ceux de l'onde lumineuse. Une antenne est nécessaire pour établir un "couplage" entre l'appareil et l'atmosphère. De plus, même en employant des ondes centimétriques, le phénomène de diffraction empêche de réduire l'angle du faisceau émis autant qu'on le voudrait. Cette grande ouverture du faisceau émis entraîne une perte énorme de la puissance du faisceau réfléchi ainsi que des réflexions parasites. De ce fait, le Telluromètre comportait deux appareils : un émetteur appelé "maître" et un réémetteur synchrone en direction de l'émetteur appelé "répondre", qui renvoyait l'onde émise par le maître en amplifiant son intensité.

Un procédé assez complexe mixait les ondes porteuses de longueur centimétrique F émises par le maître et les ondes de fréquence peu différente F' émises par le répondeur pour en déduire une fréquence ΔF stable et ajustable employée dans



Le lobe principal émis par une onde électromagnétique n'a pas la finesse d'une onde lumineuse, son angle au sommet α peut atteindre 7°. La large surface couverte diminue trop l'intensité de l'onde retour, ce qui nécessite un "répondeur" actif.

le procédé de mesures. Mais, principe de tous les distance-mètres, la mesure des distances correspondait à une mesure de différence de phase de l'onde entre le moment de son émission par le "maître" et le moment de son retour après réémission par le "répondeur". Par calcul, cette différence de phase était convertie en longueur.

Cependant, la précision de résolution du phasemètre ne permettait pas d'utiliser une seule modulation de l'onde porteuse. Aussi, par l'intermédiaire d'un oscillateur, plusieurs modulations différentes de cette onde porteuse étaient émises successivement et couvraient plusieurs plages de longueurs.

Sur le CA 1000, les fréquences ainsi modulées avaient des sous-multiples de 10, 100, 1000, 10.000 (méthode hétérodyne). A titre d'exemple, les observations sur ce Telluromètre apparu en mars 1972, comportaient 5 séries de mesures, avec pour chaque série une modulation différente de l'onde porteuse effectuée au "maître" et au "répondeur". On obtenait successivement, après multiplication par un coefficient propre à l'appareil, les dizaines de kilomètres, les kilomètres, les centaines de mètres, les dizaines de mètres, les mètres avec leurs deux décimales. Ces changements de modulation par les oscillateurs étaient manuels. Grâce à une liaison phonique en duplex entre l'opérateur du maître et celui du répondeur, ils étaient faits de manière concertée. Cette liaison phonique était obtenue par une modulation BF superposée aux autres. Les cinq séries de mesures étaient commandées par l'opérateur du "maître", elles demandaient que l'on déplace successivement un bouton aux cinq positions A, B, C, D, E qui correspondaient à cinq modulations différentes de l'oscillateur. Il faut ajouter que le CA1000, modèle ultra-léger peut être considéré comme le premier distancemètre à micro ondes "portable".

Suivant les types d'appareils et leur année de construction, on pouvait avoir deux postes symétriques, donc interchangeables dans leur rôle, ce qui permettait de faire la mesure dans les deux sens et d'améliorer la précision.

Les mesures de distances étaient complétées par des mesures de pression et de température (température sèche et humide pour les ondes radio). Sur de longues distances, les corrections étaient importantes. Les portées pouvaient atteindre entre 30 et 50 km, la précision était inférieure à 10^{-5} (1 à 2cm ± 2 mm/km), mais n'atteignait pas le 10^{-6} du Géodimètre.

Emploi des Géodimètres et des Telluromètres

Les Telluromètres, comme les Géodimètres à lampe de vapeurs de mercure, furent exclusivement employés pour des travaux de type géodésique ou des polygonaux de précision de longs cotés. L'IGN expérimenta les Telluromètres dès le début pour mesurer plusieurs cotés géodésiques de la région parisienne puis en 1959-60 pour accélérer les travaux géodésiques du Sahara, enfin en 1966 lors des travaux sur le 12^e parallèle où il furent associés au Géodimètre plus précis. Il faut cependant noter qu'au bout de la chaîne de mesure du parallèle, il avait très peu de différence entre la longueur totale



© Ph. J. C. Leblanc



Le Telluromètre CA 1000 apparu en 1972. Ici, un maître et un répondeur. On voit en haut deux types d'antenne en forme de porte-voix. Pas d'écran pour

l'affichage des mesures. Celles-ci sont faites en cinq sessions en réglant le bouton de gauche sur A, B, C, D, E. Le voyant chiffré de 1 à 10 et les autres boutons, permettait d'obtenir les deux chiffres significatifs des mesures BCDE et les trois chiffres de la mesure A.

Sur la feuille d'observation de 1981, on voit les 5 mesures d'appoint faites avec la fréquence A et leur moyenne. Les deux colonnes en quinconce en dessous correspondent aux observations du maître et du répondeur qui se contrôlent. Le résultat de ces cinq mesures est multiplié par 3 pour avoir les distances en mètres. A droite, les températures sèches, humides et la pression relevées au maître et au répondeur en début et fin d'observation.

La mesure d'une distance et des paramètres demandait de un quart d'heure à une demi heure.

© Photo transmise par Jorg Duedal



Le Distomat DI 50 de Wild qui portait à 150 km !

- ■ ■ déduite des mesures au Telluromètre et de celle déduite des mesures au Géodimètre.

Wild se lança dans cette technique en 1962 avec le Distomat DI 50 donné pour une portée de 50 m à 150 km et une précision de $2\text{cm} \pm 1\text{ppm}$. Siemens aussi produisit un distancemètre de ce type que j'ai utilisé en Jordanie en 1980, il avait une portée de 100 km !

Les distancemètres à onde infrarouge

Pour obtenir une propagation en ligne droite, obtenir un lobe d'émission étroit et ainsi éviter les réflexions parasites, sans pour autant mettre en œuvre une source de grande dimension, il apparaissait que les ondes lumineuses, de l'ordre du micron apportaient un gros avantage par rapport aux ondes électromagnétiques. Les distancemètres à onde infrarouge, associés à des prismes en coin de cube, sont arrivés avec les diodes à l'arséniure de gallium, à partir de 1965, sur les prototypes du Telluromètre MA 100, et la série Wild qui lance le DI 8 coproduit avec Sercel en 1968.

Ils simplifiaient l'emploi du Géodimètre et du Telluromètre, mais avec des portées moins grandes. Au début, ils n'étaient employés qu'en topométrie pour la mesure des polygones ; mais, plus petits que les précédents distancemètres, ils pouvaient être fixés sur la lunette d'un théodolite (DI 8 sur T2) et préfiguraient l'emploi des distancemètres électroniques dans la topographie courante et dans les levés de détail. Il fallut attendre 1970-71 pour voir ZEISS innover avec le SM11 incorporé à un tachéomètre (voir chapitre sur les stations totales). Ce distancemètre utilisait deux fréquences de 15 MHz et 150 KHz permettant de couvrir le kilomètre et les sous-multiples de 10 m.



Le Citation, appareil de fin de série, montable sur la lunette d'un théodolite. Je l'avais acheté en 1982 pour une mission en Arabie, alors que j'étais free-lance.

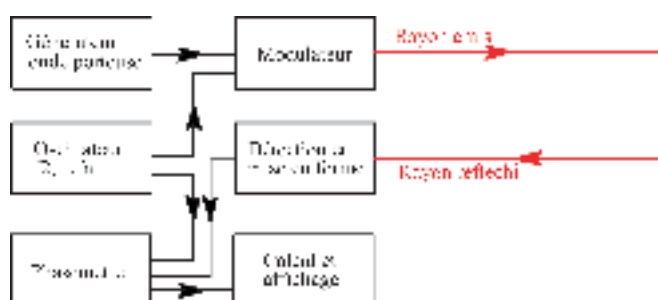


Le distancemètre DI 10. Utilisable seul ou sur la lunette d'un T2 (voir infra dans le paragraphe L'association au théodolite). Avec ses deux optiques

d'émission et de réception, ses deux câbles sur le côté, il fait penser à un monstrueux insecte ! Il était complété par un gros coffret au sol contenant toute l'électronique.



le Geodimeter 14A, produit dans les années 1970 non adaptable à un théodolite. Le volume reste important et il y a toujours deux optiques non coaxiales pour l'émission et la réception du rayon IR. Les distances sont affichées sur LED.



Principe des ondes modulées. L'oscillateur fournit successivement au modulateur plusieurs fréquences bien calibrées qui vont moduler l'onde porteuse émise vers le prisme. L'oscillateur envoie en même temps les ondes modulées au phaseur qui va les comparer à celles reçues après réflexion sur le prisme. Les fréquences calibrées envoyées par l'oscillateur couvrent différentes plages de longueur destinées à convertir le déphasage en distance et à résoudre l'ambiguïté.

Les ondes porteuses infrarouges, modulées pour le besoin des mesures à une fréquence beaucoup plus basse, alliaient les qualités d'une propagation à très haute fréquence avec les qualités métriques d'une fréquence permettant une électronique de conception facile. Comme vu précédemment avec le Telluromètre, il fallait plusieurs trains d'ondes modulées avec une fréquence différente pour déterminer les différentes gammes de longueur. Mais ici, ce changement était fait automatiquement (automatic read-out), le "générateur d'onde porteuse" et le "modulateur" étant alors confondus sur un seul composant de taille modeste. Les systèmes électroniques et le calcul étant plus lents qu'aujourd'hui, une mesure demandait parfois 10 à 20 secondes contre une seconde actuellement. Sur le Citation, par exemple, on entendait le battement tic-tac des différents cycles de la mesure.

■ Les phasemètres numériques

Il faut signaler que l'apparition de ces phasemètres a changé le principe de mesure à partir du milieu des années 1980. Ils utilisent un trigger, circuit électronique courant qui crée une impulsion chaque fois que le signal qui lui est fourni passe par zéro avec une pente positive. Il devient alors possible, par un double comptage, de déterminer le nombre total des périodes entières générées pendant le temps de mesure et de résoudre l'ambiguïté (nombre de phases). Le phasemètre ne sert plus alors qu'à mesurer la portion de la période non entière. Le microprocesseur peut ainsi afficher un temps de propagation transformé en distance.

■ L'association au théodolite

Les progrès de l'électronique amenant une diminution de leur taille, la miniaturisation des distancemètres fut envisagée dès 1966, date à laquelle le français Sercel présentait un prototype destiné à être monté au dessus de la lunette d'un théodolite. Il s'associa avec Wild pour produire en 1968 le DI 10 dont l'émetteur-récepteur de rayons IR était montable sur la lunette du théodolite T2. Il était relié par un câble à un important coffret électronique situé à terre. La photographie d'époque laisse voir un engin qui, aujourd'hui, nous paraît monstrueux ! Il préfigurait l'emploi des distancemètres dans les levés de détail.

Comme vu dans le paragraphe précédent, il fut suivi, en 1970 par le SM11 de ZEISS dont les deux optiques d'émission et de réception coaxiales étaient intégrées à la lunette d'un tachéomètre du même nom. C'était une première révolutionnaire.

En 1973 Wild produisait le DI 3, plus petit que le DI 8 et dont le boîtier électronique était fixé entre la tête du trépied et le théodolite. Le DI 4 suivit en 1980 et surtout, en 1983, le DI 1000,



© Archives auteur

Le DI 10 monté sur un T2. C'est la première association "distancemètre-théodolite".

■ ■ ■ beaucoup plus discret, compact et adapté à la lunette du T2 ou du T 1000. Les stations totales faisaient leur apparition.

A cette époque, à part l'exception du SM 11 de ZEISS, l'optique d'émission et l'optique de réception des distancemètres était bien séparées, aussi possédaient-ils deux optiques distantes de quelques centimètres. Nous verrons plus loin, dans les stations totales, l'intégration des optiques d'émission et de réception intégrées dans la lunette du théodolite. Il faut noter que le Geodimètre Modèle 6, apparu en 1964 avait été le premier à utiliser une émission-réception co-axiale, mais, c'était un appareil réservé à l'usage géodésique et non au lever de détail.

J'ai surtout parlé de Wild qui avait une grosse part du marché français, mais tous les constructeurs (Kern, Aga, Zeiss en Europe) ont produit des distancemètres. Avant de disparaître de ce secteur, l'américain HP (série HP 3800) devint un important constructeur de ce type d'appareils. Suivant le modèle et le nombre de prismes, ils avaient une portée de 1 à 10 km, avec une précision après correction comprise entre 10^{-5} et 10^{-6} , en général $5\text{ mm} \pm 1$ à 2 mm par km, toujours après avoir mesuré pression et température sèche et calculé les corrections correspondantes.



Le DI 1000 distancemètre beaucoup plus compact des générations suivantes. Il n'y a plus de coffret électronique, la miniaturisation électronique et informatique a tout réduit dans un volume restreint. Un câble permettait d'enregistrer la mesure.

Les distancemètres laser

Les premiers distancemètres lasers ne furent pas employés en topographie. Une impulsion représentant une puissance instantanée gigantesque était envoyée sur une cible qui n'en renvoyait qu'une petite partie vers l'émetteur. La mesure de la distance était déduite de la mesure du temps de trajet aller-retour de l'onde. Des mesures sur les autres planètes ou sur les satellites artificiels furent d'abord effectuées. Mais ce type de mesures n'exigeait pas une précision comparable à celle de la topométrie.

En 1968, nous avons vu la première utilisation du laser sur les Géodimètres américains. Le site de Wild-Heerbrugg montre la photo du distancemètre laser T 20 fabriqué spécialement pour l'armée suisse en 1974 et monté sur théodolite.

Vers le milieu des années 1980, apparut la technique des "diodes laser pulsées" qui allait permettre la généralisation du laser dans la mesure des distances. La cadence de tir était de l'ordre de 10 000 par seconde et la puissance de crête inférieure à 1 watt. L'impulsion émise (dans la gamme infrarouge de $0.9\mu\text{m}$) suivait le même traitement optique que dans les télémètres à onde entretenue (voir paragraphe



Le Fennel 2000, distancemètre à rayon laser associable à un théodolite. Celui-ci, acheté en 1985 par mon prédécesseur était montable sur un tachéomètre Tari. Il mesurait avec prisme et avait une portée de 2000 m. Monté sur l'alidade et indépendant de la lunette, il devait être orienté sur le prisme après mesure des angles.



Petit distancemètre laser à main, dont le premier fut produit par Leica en 1993.

: les distancemètres à onde infrarouge). Une chronométrie d'une précision de 1 ns permettait d'avoir une précision de 15 cm sur la distance (30 cm sur l'aller-retour).

Mais du fait du grand nombre de mesures (10 000 par seconde), on pouvait espérer un écart-type 100 fois plus petit. Cependant, cette réalisation n'était pas simple et rendue possible que par plusieurs artifices techniques, telle l'utilisation de fibres optiques qui ralentissait la lumière pour que les échos ne se chevauchent pas. Vers 1985 Fennel, pionnier en la matière, produisait des distancemètres de ce genre à un prix très abordable. J'avais hérité de mon prédécesseur d'un FEN 2000 acheté en 1985 et montable sur tachéomètre, il avait une portée de 2000 m, une précision de 5 mm \pm 5 mm/km et prenait les points très vite. On peut citer aussi le WILD DI 3002, de surcroît plus précis (5 mm \pm 1 mm/km) et d'une portée de 6 km.



© Photo transmise par Jorg Duedal

Le DI 3000 série 2, produit par Wild, fait partie des distancemètres d'extrême précision. Il était montable sur T2.

Le fait d'utiliser la même optique à l'aller et au retour devait permettre plus tard de mesurer des distances sans prisme. Ce système ne fut employé sur les stations totales qu'en 1994 par Geotronics et en 1998 pour LEICA. Au début, les portées étaient de l'ordre de 30 mètres. C'était aussi le cas pour les petits distancemètres à main "Distomat" de Wild apparus en 1993. L'arrivée des sources laser à semi-conducteurs, permettant des longueurs d'onde plus élevées avec de plus fortes puissances a permis d'accroître cette distance à 2 ou 300 mètres pour certaines stations totales et à 1 km pour la lasergrammétrie (Voir dans un prochain numéro le paragraphe sur "les scanners lasers (ou lasergrammétrie)").

Les mesures d'extrême précision, le Mekomètre

Conçu par K.D. Froome et R.H. Bradsell, du National Physical Laboratory anglais à partir de 1961, le Mekomètre ME 3000 fut développé par Kern à partir de 1970. Adapté à la métrologie de grande précision, il permettait de mesurer les longueurs avec une précision fixe de 0,1mm et une précision proportionnelle de 1 mm/km. Il fut suivi par le DI 3000 de Wild, un peu moins précis, le GEOMENSOR ou en 1986 par le KERN ME 5000.

La technologie, assez complexe, utilisait la polarisation de la lumière émise qui, à la réception, donnait un minimum ou un maximum de lumière transmise en fonction du nombre entier ou non de longueur d'onde modulée.

Beaucoup plus récemment, LEICA a sorti le TCA 2003 dont le distancemètre peut avoir une précision de 0,5 mm à 120 mètres, due à un excellent calibrage et à un oscillateur à quartz très stable et précis, dont la dérive est inférieure à 1 mm/km par an.

Cette dérive nous rappelle que la précision demande des contrôles ! Les géomètres le font-ils de temps à autre, même sur des appareils moins précis ?

■ ■ ■



Le Telluromètre MRA 101. L'écran cathodique des MRA 1 et 2 a été remplacé par un cercle gradué.

■ ■ ■ La lecture des mesures

C'est un détail qu'il m'a paru intéressant de rappeler. En 1965, j'avais fait un exercice de mesures sur un Telluromètre MRA2 acheté par l'IGN vers 1960. Si l'électronique avait déjà généré les tubes cathodiques, l'informatique nécessaire aux calculs balbutiait encore. La lecture des résultats se faisait alors sur un petit écran cathodique de 8 à 10 cm de diamètre situé sur le maître et sur lequel se formait un cercle lumineux entouré de graduations (voir les photos des Telluromètres MRA1 et 2). L'onde retour créait une coupure sur ce cercle et l'on faisait plusieurs lectures sur les graduations pour une détermination. Quand on était au grand jour ou au soleil, le cercle lumineux n'était pas suffisamment visible. Il fallait alors appliquer contre l'écran l'ouverture d'un tube d'une vingtaine de centimètres de long qui l'isolait de la lumière et on collait l'œil de l'autre côté !

Sur le modèle MRA 101, il fallait tourner un cercle avec 100 graduations pour amener l'aiguille d'un cadran à son origine. La lecture sur ce cercle gradué permettait de déduire la longueur correspondant à la longueur d'onde utilisée. Il fallut attendre les progrès de l'informatique pour pouvoir afficher directement ces résultats. Tout d'abord sur des tambours chiffrés, comme ceux des compteurs kilométriques des voitures, puis, après 1971 sur les diode électroluminescentes LED (Light Emission Diod) et deux ou trois ans plus tard sur des écrans de cristaux liquides.

Les distancemètres en 2005

Le distancemètre électronique a marqué le début de la révolution topographique. Pour l'histoire, les deux premiers Géodimètres achetés en France par des géomètres privés, le furent en 1963. Le cadastre ne les ayant pas encore testés, l'un

de ces géomètres n'eut pas l'autorisation d'employer cet appareil dans les marchés cadastraux !

Mais le temps a passé, les mentalités ont changé et nous sommes arrivés à la fin d'un cycle. Aujourd'hui, l'arrivée du GPS a exclu le distancemètre de tous les travaux de canevas topographique: plus de triangulation ou trilatération, plus de stéréopréparation, plus de grande polygonale de précision en vue d'équiper une zone à topographier.

Mais, il compense ce délaissement dans d'autres domaines: incorporé aux stations totales il est utilisé dans les levés de détail et architecturaux, dans les implantations, auscultations, topographie industrielle, etc. Les petits distancemètres à main sont largement employés en architecture et dans le bâtiment.

Bibliographie

CLENDINNING J. 1952 *"The Geodimeter: an instrument for the accurate measurement of distance by high frequency light variations"*, Empire Survey Review n°85, 11, pp. 290-301 et 363-371. (Traduit en juin 1953 par l'IG Thuillier pour un fascicule IGN)

AUSTIN C. POLING 1959 *Geodimeter manual* (Washington D.C., rev. ed. 1961)

SAASTOMAINEN JJ. 1967 *Surveyor's guide to electromagnetic distance measurement*, University of Toronto

IGN-5^e Direction 1970 *Mesure de la vitesse des ondes centimétrique ou lumineuse*

BURNSIDE C.D. 1971 *Electromagnetic Distance Measurement*, Granada publishing-London

TOMLINSON R.W. 1971, *American congress on surveying and mapping*

KASSER Michel 1985 et 1991 *Appareils électroniques de mesure de distance*, publication IGN

RUEGER J.M. 1990 *Electronic Distance Measurement*, Springer-Verlag, Berlin

FONDELLI M. 1991 *Manuale di topografia*, Editori Laterza-Roma

DEUMLICH F. STAIGER R. 2002 *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9^e édition, Wichmann à Heidelberg

Site Internet:

americanhistory.si.edu/collections/surveying/object

Suite dans le numéro 111 d'XYZ:

LES INSTRUMENTS DE MESURE:

Les théodolites électroniques ou stations totales
Autres instruments de mesures ou de lever