

# xvz

Éditée par l'  
Association  
Française de  
Topographie

HORS SÉRIE



## Topographie : un demi-siècle d'évolution technologique

par Paul Courbon

# 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

**L**a 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

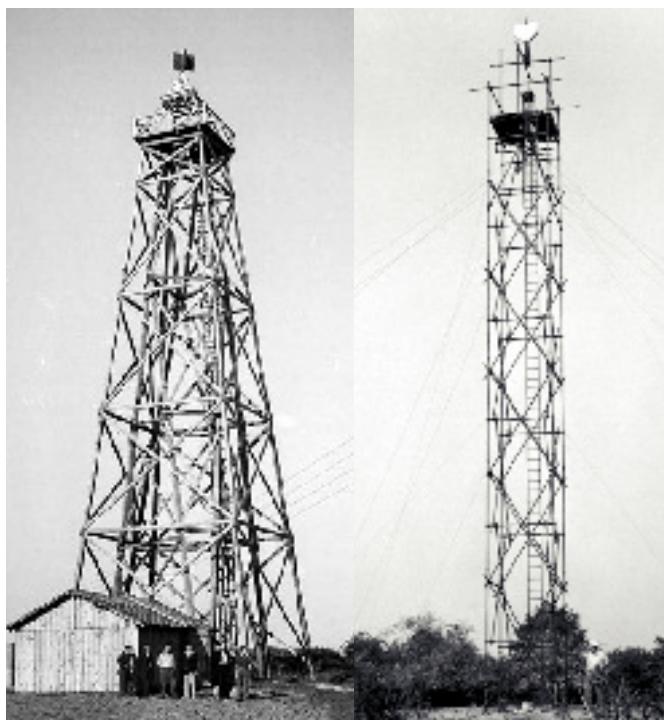
**J'**ai fait partie de ceux qui ont vécu la grande explosion technologique après avoir appris à travailler et commencé leur profession en utilisant des méthodes qui avaient peu évolué depuis plus de deux siècles. En 1950, la seule grande avancée technique depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle était le 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<sup>e</sup> 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 fai-



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.

© IGN - droits réservés





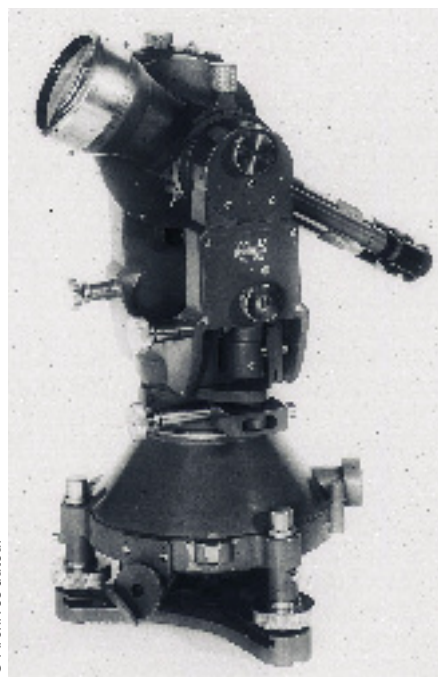
Deux tours géodésiques sur lesquelles étaient montés les théodolites en terrain plat et boisé. Le géomètre qui passait plus tard sur la borne pour se rattacher en Lambert, mais qui n'avait plus que son "petit trépied" de 1,6 m de haut, avait souvent des problèmes d'orientation !



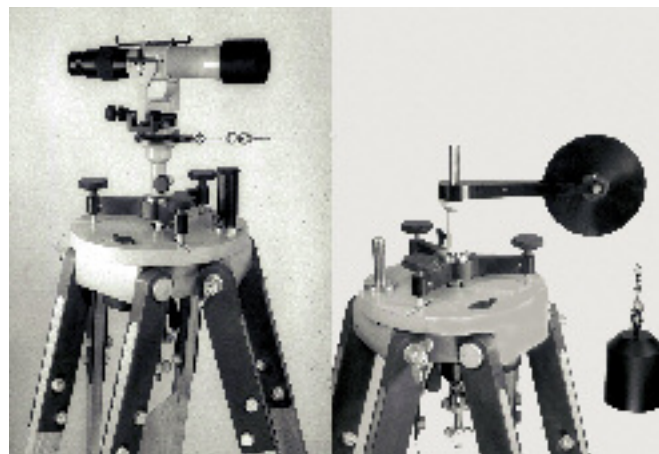
Installation d'une plateforme en haut d'un clocher. C'était du grand art qui permit à une génération d'échafaudiers d'exprimer ses talents et de géodésiens d'affronter le vertige.



Pose d'une borne du 1<sup>er</sup> ou 2<sup>e</sup> ordre. D'un poids de 200 kg ou plus, leur pose demandait un treuil. Celles du 4<sup>e</sup> 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 répétitions 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.

saient 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 polygones 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.



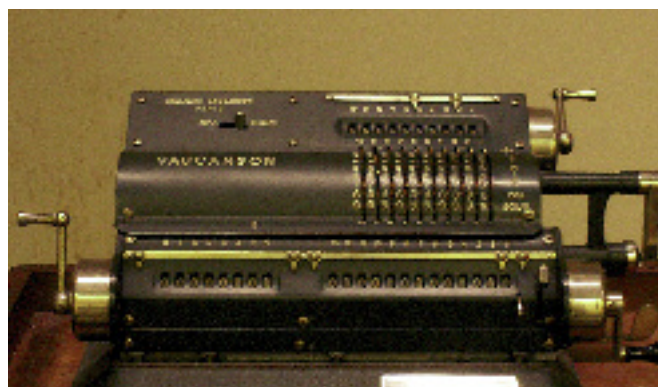
Un monument : l'une des 50.000 bornes de la NTF qui équipaient le territoire français. Avec le RBF et le GPS en réseau permanent, ce type de borne va bientôt faire partie du patrimoine historique...

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.







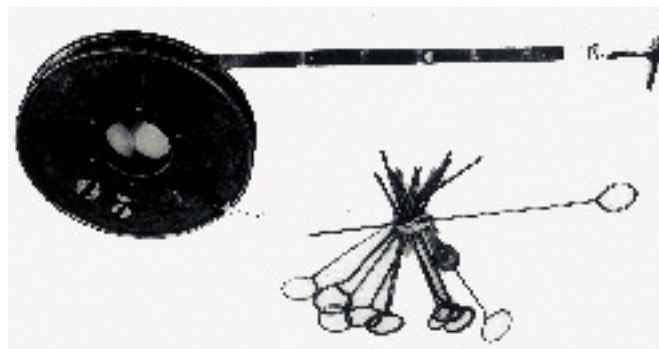
**Travail à la planchette.** L'alidade nivellatrice sert aux intersections et relèvements, l'éclimètre Puissant détermine les points avec distance stadimétrique, la règle à calcul permet les réductions à l'horizontale et le calcul des altitudes. Mesures et calculs sont notés sur le carnet. Pour la cartographie 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<sup>er</sup> 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  $0,8 \times 10^{-6}$ .

La première estimation de la vitesse de la lumière ( $200.000 \text{ km/s}$ ) avait été faite en 1674 par l'astronome danois Ole Christensen Rømer, suite au retard observé par Cassini dans l'occultation d'un satellite de Jupiter. En 1729, un autre astronome, James Bradley l'estime à un chiffre proche de  $300.000 \text{ km/s}$ .

Il est intéressant de rappeler la première détermination physique 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  $313.290 \text{ km/s}$ . 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.

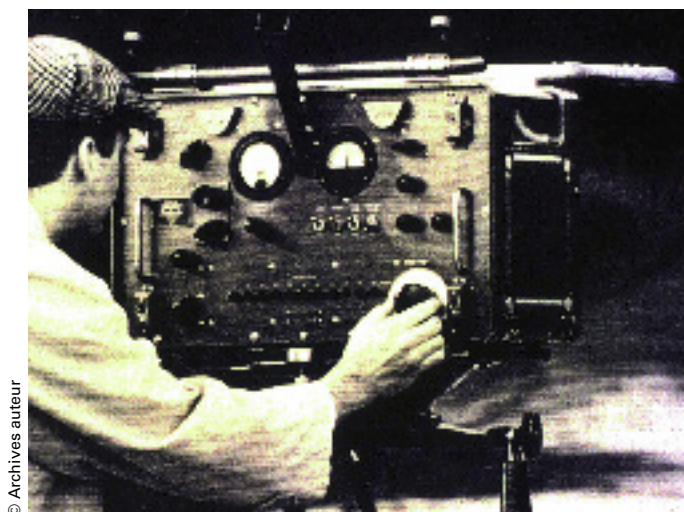
Il est intéressant de donner l'origine du mot "Geodimeter" devenu en français "Géodimètre". C'est l'abréviation de l'appellation anglaise "Geodetic distance meter".

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 !

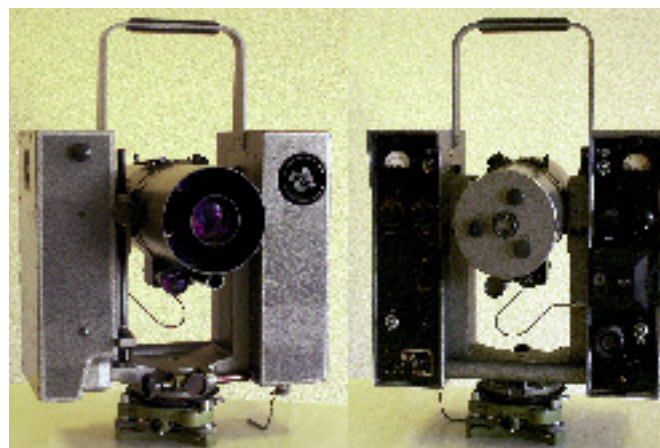
### ■ Le développement du Géodimètre

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



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.



quelques modifications apportées par les américains, une précision de 1/1 200 000 fut obtenue. A la même époque, le constructeur donnait comme précision  $5\text{mm} \pm 1\text{mm/km}$ , 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 batterie 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 :

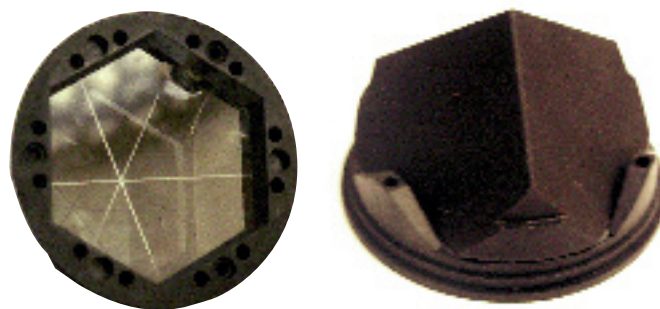
$$f_2 = f_1 + f_1/400, \quad f_3 = f_1 + f_1/20, \quad f_4 = f_3 + f_1/10000 \quad \text{ou} \quad f_4 = f_1 + f_1/20 + f_1/10000$$

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

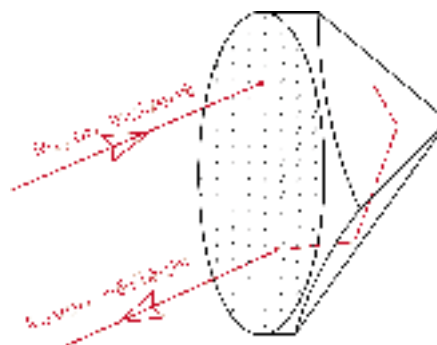
Dans mes recherches, j'ai constaté le même type d'oubli que



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.

■■■



■■■ celui commis par de nombreux auteurs qui se sont attachés à la géodésie au XVIII<sup>e</sup> 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 pour l'orientation correcte du dit miroir. Peu après on utilisa aussi un réflecteur sphérique qui devait être orienté à mieux que 30 minutes.



**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.**

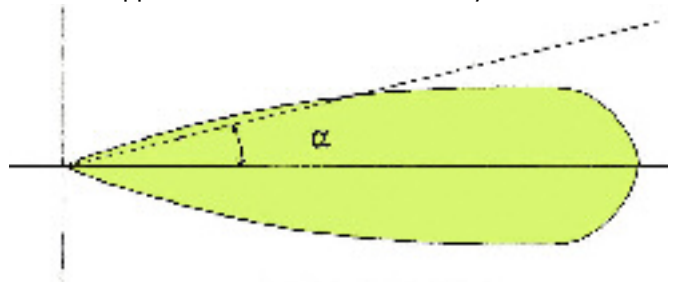
En fait, le premier réflecteur prismatique aurait été utilisé pour la première fois par l'US Army Map Service, en 1953. Cependant, le plus ancien document que j'ai vu représentant une batterie de trois "prismes coin de cubes" ou prismes rhomboédriques, date de 1961 ; il accompagne la photo d'un Géodimètre 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<sup>e</sup> parallèle, il en fallait jusqu'à 27 en fonction de la distance mesurée 15 à 20 km.

### 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 direc-



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



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  $\Delta F$  stable et ajustable employée dans le procédé de mesures. Mais, principe de tous les distancemètres, 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.

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 2 cm  $\pm$  2 mm/km), mais n'atteignait pas le  $10^{-6}$  du Geodimètre.

Les Telluromètres, comme les Géodimètres à lampe de vapeurs de mercure, furent exclusivement employés pour des



© Ph. J.C. Leblanc



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.

[illegible]

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 !**

- ■ ■ travaux de type géodésique ou des polygonales 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° 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 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 polygonales ; mais, plus petits que les précédents distancemètres,



**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.**

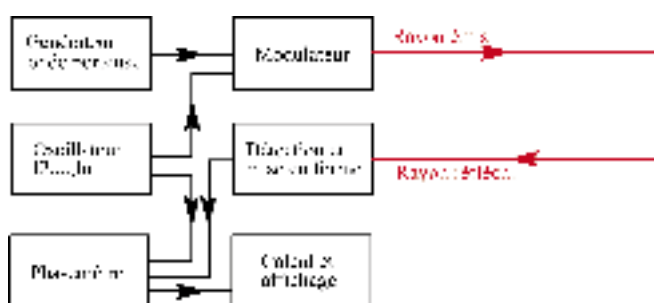


**Le distancemètre DI 10. Utilisable seul ou sur la lunette d'un T2 (voir infra dans le paragraphe L'association au théodolite). Avec ses deux optiques**

**d'émission et de réception, ses deux câbles sur le coté, 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 phasemètre 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.

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.

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.







© Archives auteur

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

■ ■ ■ 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, 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



**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.**

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  $2\text{ mm}$  par km, toujours après avoir mesuré pression et température sèche et calculé les corrections correspondantes.

## 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



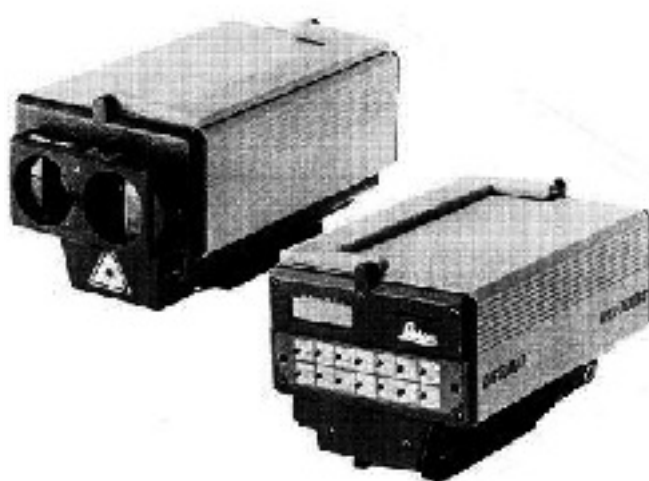
**Le Fennel 2000, distancemètre à rayon laser associable à un théodolite. Celui-ci, acheté en 1985 par mon prédécesseur était montable sur un tachéomètre Tari. Il mesurait avec prisme et avait une portée de 2000 m. Monté sur l'alidade et indépendant de la lunette, il devait être orienté sur le prisme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



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

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 0.9μm) suivait le même traitement optique que dans les télémètres à onde entretenue (voir paragraphe : *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



© Photo transmise par Jorg Duedal

**Petit distancemètre laser à main Hilti. Le premier, le Distomat, fut produit par Leica en 1993.**

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.

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

■ ■ ■



© Photo J.C. Leblanc



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

- ■ ■ 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 ?

## 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 chif-

frés, 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> édition, Wichmann à Heidelberg

**Site Internet:**

[americanhistory.si.edu/collections/surveying/object](http://americanhistory.si.edu/collections/surveying/object)



## Les théodolites électroniques ou stations totales

**A**vec les progrès de l'électronique, la diminution de la taille des distancemètres allait permettre de les associer au théodolite. Tout d'abord en les fixant au-dessus de la lunette, puis ensuite, en les incorporant au théodolite avec une mesure coaxiale par la lunette. Il faut y ajouter la mesure électronique des angles et les progrès de l'informatique permettant aussitôt l'enregistrement de ces mesures dans un carnet électronique que l'on vidait sur un ordinateur dès le retour au bureau. Le théodolite électronique, appelé aussi station totale, était né. Hormis les hauteurs de voyant, tapées manuellement par l'opérateur, plus de fautes de transcription ! Mais surtout un gain énorme de temps et la suppression du fastidieux travail de retaper sur le clavier de l'ordinateur les observations notées manuellement sur le terrain. Mais, ce terme de "station totale" employé par les constructeurs et repris par la plupart des utilisateurs ne fait pas l'unanimité. Pour le Professeur Rudolf STAIGER, tachéomètre ou théodolite électronique serait mieux adapté.

La documentation fournie par certains constructeurs à la pointe du progrès semble contenir des contradictions, parfois inexactitudes, qui n'ont pas facilité mes recherches. Le résultat de celles-ci n'est donc pas absolu.



### Les premiers appareils

En 1970, ZEISS Oberkochen avait sorti le SM11, à l'étude depuis 1968. Ce tachéomètre mesurait les angles classiquement, mais, première mondiale, il comportait un distancemètre Infrarouge intégré, dont les deux optiques d'émission et de réception étaient coaxiales avec la lunette (voir le paragraphe sur *les distancemètres à onde infrarouge*). Autre innovation, l'origine du cercle vertical était commandée par un compensateur pendulaire et non une nivelle. Ce petit bijou pesait 20,5 kg, plus 2,5 kg pour la batterie et 1,5 kg pour le trépied. Il fallait une claie de portage et de sérieuses aptitudes physiques pour le transporter entre les stations !

Mais, depuis 1968, ce constructeur travaillait sur le prototype d'un autre tachéomètre permettant en plus la lecture automatique des angles et l'enregistrement des mesures : le Reg ELTA 14 (abréviation de REGistriern des ELEktrischen TACHymeter). Ce gros appareil gris et peu esthétique était extérieurement le frère jumeau du SM1. Comme lui, il comportait le même distancemètre Infrarouge intégré, coaxial

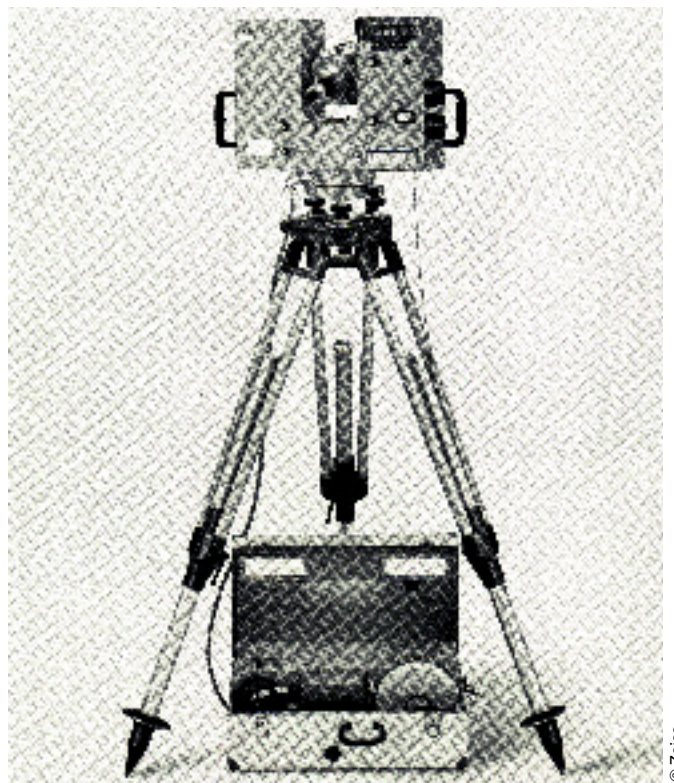
■ ■ ■



■■■ avec la lunette. Les mesures étaient faites automatiquement après pointé et commande par un déclencheur souple. Elles étaient enregistrées sur bandes perforées ! L'électronique était encore en gestation, aussi de nombreuses parties du procédé de lecture relevaient de l'électromécanique, d'où l'appellation "Elektrische". Nous verrons plus loin le principe général des lectures angulaires. Le prototype de 1968, aboutit à un modèle commercialisé en 1972, en petit nombre il est vrai. Cette année-là, un modèle adapté servit à toutes les déterminations des épreuves de lancer, lors des jeux olympiques de Munich. Il fut aussi employé par le cadastre allemand. Identique extérieurement au SM11, il pesait lui aussi 20 kg nu ! La portée maximale de son distancemètre variait de 500 m avec un prisme, à 1200 m avec sept prismes. La précision des mesures de distance était de 5 à 10 mm.

Le doute plane quant au Geodimeter (AGA) dont le modèle 700/710, présenté en 1971/1972, a été qualifié par le constructeur de première station totale. Un auteur lui attribue un distancemètre. Mais, sur la photo d'époque, la lunette du théodolite semble beaucoup trop fine, pour être associée à un distancemètre coaxial. Il faut dire qu'en 1971 le distancemètre était encore un appareil très volumineux. Il n'y a pas non plus de place au-dessus de la lunette pour en fixer un.

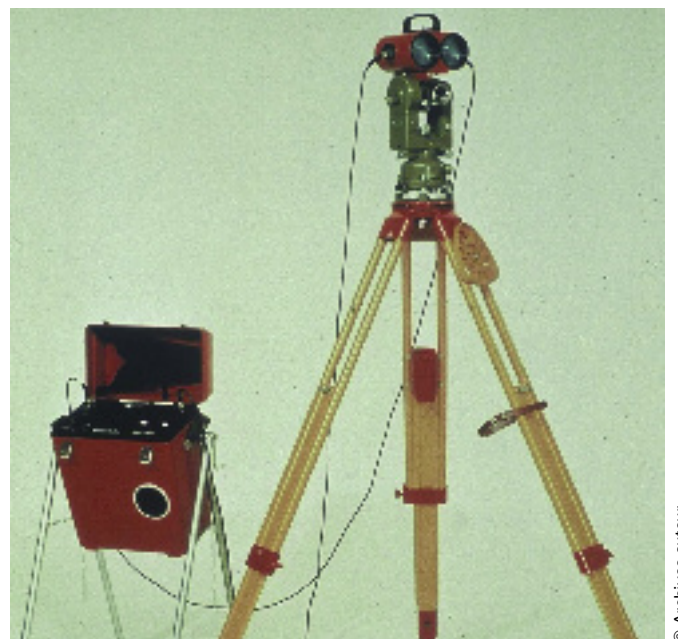
Dans le doute, je préfère ne pas classer ce modèle comme station totale. Mais, innovation très importante, les mouvements angulaires sont mesurés électroniquement et enregistrés sur le Geodat, que Geodimeter présente encore comme premier enregistreur de mesures. Je n'ai pu avoir de Trimble, qui a racheté Geodimeter, aucun détail sur la réalisation de cet appareil, ainsi que sur l'enregistrement et le stockage des données. De ce fait, je laisse au Reg ELTA 14 le titre de première station totale.



**Le Reg Elta 14.** On voit la grosseur de la lunette, à laquelle est intégré le distancemètre coaxial. En haut à droite, la fenêtre où les mesures peuvent être lues une à une. En bas à droite, la petite fenêtre où peuvent être introduits les paramètres du chantier ou des visées. L'électronique n'est pas encore miniaturisée et l'ensemble est très gros. Sous le trépied, dans la caisse, la bande perforée où étaient enregistrées les mesures.



**Le Zeiss SM4, petit tachéomètre qui comme le SM11, mesure les distances électroniquement et les angles optiquement. De la génération suivante, sa taille a diminué et l'affichage de la distance se fait par LED.**



**En 1968, début de l'association théodolite-distancemètre : un DI 8 monté sur un T2. On voit au sol l'imposant coffret où sont traités les signaux et effectués les calculs.**





**Wild TC1, théodolite électronique de la nouvelle génération avec deux versions : une avec enregistrement des mesures sur coffret extérieur et l'autre avec notation manuelle.**

**Le Wild TC 1000 de la génération suivante.**

**Le tachéomètre électronique est associé à un distancemètre démontable DI 1000 qui a une optique d'émission et une de réception.**



## La nouvelle génération

Les progrès de l'électronique, avec la miniaturisation des appareils de mesure, permet de produire à partir de 1977 des appareils moins encombrants, plus légers et plus performants, se rapprochant des stations totales actuelles. Les progrès de l'informatique permettent un meilleur enregistrement et un meilleur stockage des données.

En 1977, Hewlett Packard (HP) commercialise sa première station totale HP 3820A qui mesurait électroniquement distances et angles. Mais elle n'eut pas grand succès et après le lancement du modèle 3821, HP abandonna la filière. Wild (aujourd'hui Leica) lance sa première station totale TC1 en 1978. Sur la photo d'époque, la lunette et le distancemètre étaient coaxiaux, les mesures pouvaient soit être notées à la main, soit être enregistrées sur une cassette externe. A la même époque, Zeiss Oberkochen lance ses stations ELTA 2, puis ELTA 4, les observations étaient enregistrées sur carnet électronique externe.

Chez Wild, le théodolite T 1000 succéda au TC1 en 1981. Il était couplé au carnet électronique GRE3 et à un distancemètre (DI 1000 ou 2000) monté au-dessus de la lunette et non plus coaxial. Ce distancemètre non intégré pourrait sembler un recul technique. En fait, il était dicté par les conditions du marché de l'époque, certains utilisateurs ne faisant que de la triangulation et voulant éviter le surcoût d'un distancemètre onéreux ! On séparait donc le distancemètre du théodolite. Quant au carnet GRE3, il permettait la codification et l'intégration d'un système de points, en vue de leur implantation.

Dans le modèle TC 2000, produit de 1983 à 1987 on voit réapparaître un distancemètre coaxial avec la lunette, le menu est intégré. Mais, pendant de nombreuses années seront encore produites des stations dans lesquelles les excellents distancemètres DI 1000 ou DI 2000 seront montés au-dessus de la lunette.

En 1986, Geodimeter commercialise le modèle 400 qu'il présente comme la première station totale programmable. Pourtant, le Wild TC 2000 avait lui aussi un menu intégré. Le

© Photos transmises par Jorg Duedal



**le Wild TC 2000 suit le TC 1000. Il retrouve un distancemètre intégré.**



**Le Geodimeter 422 du début des années 1980. Le distancemètre n'est pas coaxial et comporte encore deux optiques séparées.**



**Le Nikon C 100, tachéomètre de base, acheté par mon cabinet en 1990. Il fonctionnait associé à un carnet électronique externe PSION organiser.**

■ ■ ■



■■■ programme était intégré au théodolite, permettant d'effectuer diverses tâches, telles que implantation ou codification, mais, sans carnet électronique ou micro-ordinateur externe. Le distancemètre était coaxial avec la lunette.

Il y eut d'autres constructeurs européens : Pentax avec sa série ATS, UOMPZ avec le T10E, Geo-Fennel avec le FET 120 et Spectra Precision avec sa série 600 M.

A partir de 1990, les constructeurs japonais font leur apparition en France : Nikon avec le C 100 puis la série DTM, Sokkia avec le SET 500 et la série du même nom, Topcon avec la série GPS, etc.

Cependant, les premières stations totales valaient cher : entre 100 000 et 150 000 F en 1985, ce qui, compte tenu de l'inflation, correspondrait à 30 ou 40 000 € aujourd'hui. Bien que certains cabinets en aient fait l'acquisition avant, il fallut attendre 1984-1985 pour voir leur généralisation chez les géomètres français.

### ■ La motorisation et la robotisation

En 1982, la société ETH de Zürich s'était lancée dans un projet de motorisation qui aboutit en 1986 au prototype Topomat. Entre 1985 et 1987, le constructeur suédois AGA Geotronics met au point un instrument servo-commandé capable de suivre une cible dans les applications hydrographiques. Cela aboutit en 1990 au système Geodimeter 4000, première station robotisée du monde. Leica suivra en 1995 seulement, avec la station TCA 1000 et plus tard avec la RCS 1100. D'autres constructeurs aussi, tel Zeiss (Elta S10/20), ou Topcon (AP-L1A). Là, plus besoin d'un opérateur derrière la station totale qui est reliée au prisme par radio. Le porteur de prisme travaille seul et, à partir d'un tableau de commande fixé à la canne du

prisme, il transmet toutes ses instructions à la station. De nouvelles versions avec d'autres développements et d'autres constructeurs ont suivi.

Cependant, à côté des stations robotisées existent aussi les stations motorisées qui ne sont pas commandables de l'extérieur, mais qui peuvent rechercher et se pointer sur un prisme. Plusieurs types de stations motorisées existent :

- Les stations manuelles avec motorisation assistée. Ils peuvent rechercher un prisme après avoir été grossièrement orientés ou se mettre dans une direction dont on a programmé les angles, mais ils ne peuvent pas être télécommandés. Ce sont les Leica TCM 1800, les séries S de Zeiss, 600 AF de Topcon, R 100 de Pentax, TPS 5000 de Leica. Ces stations motorisées sont utiles pour des auscultations ou mesures de stabilité.
- Dans les stations motorisées, il y a deux types de recherche automatique d'un objectif : les servothéodolites associés à une vidéocaméra. Ce sont les séries TM 3000 de Leica, ou E2-SE et ST de Kern. La recherche automatique peut être aussi faite par capteurs (Zeiss S.10, Leica TDA 5000, Leica TCA 1800, etc.).
- Il y a aussi les stations motorisées qui poursuivent automatiquement la cible. Parmi elles, celles qui font les mesures en statique, c'est-à-dire qu'elles peuvent suivre les mouvements du prisme après qu'une mesure ait été faite, mais c'est à l'opérateur de décider de la mesure suivante à la fin du mouvement du prisme. Cela peut être utile quand on travaille dans des zones de végétation où il n'est pas facile de voir le prisme. D'autres stations motorisées peuvent faire les mesures en cinématique, mais avec un mode tracking.



Station robotisée Topcon AP-L1A de 1999. L'antenne permet la liaison radio avec l'opérateur qui tient le prisme. Ici, il n'y a pas de clavier associé au prisme, mais un ordinateur portable sur lequel l'opérateur peut commander la station et faire le dessin en DAO au fur et à mesure du lever. Quant à la canne, elle porte six prismes, ce qui évite à l'opérateur occupé à son lever d'avoir à l'orienter.



**Le Leica TCM 2300 fait partie des stations motorisées. Il peut chercher ou suivre un prisme automatiquement, mais ne peut pas être télécommandé.**

**Son tableau de commande, plus complexe que celui d'un appareil de base, permet d'accéder à de nombreuses fonctions et d'introduire des paramètres plus facilement.**



### ■ Les distances sans prisme

AGA Géotronics fut aussi à l'origine des mesures de distance laser appliquées au théodolite, suite à une technique utilisée lors des coulées d'acier en fusion. On les trouve dans le système 600 des stations robotisées, introduit en 1994 et qui permet au choix, les mesures de distance infrarouge ou laser.

Il faut ajouter que l'apparition des lasers sur les théodolites amena le centrage laser sur les stations au sol.

LEICA commercialisa en 1998 sa première station totale utilisant les ondes infrarouges et le laser : le TPS 1100.

Le distancemètre laser associé au théodolite était une révolution pour les levers architecturaux et les levers de façades sans passer par la photogrammétrie. Au début, la portée de ces mesures laser était inférieure à 50 m. En 2005, on arrive à 2 ou 300 mètres et la plupart des tachéomètres électroniques en sont équipés.

## Mesure électronique des angles horizontaux

Comme nous l'avons vu plus haut, Zeiss Oberkochen, aujourd'hui absorbé par Trimble, fut pionnier en la matière avec le Reg Elta 14, bien que l'appareil ne soit pas classé électronique, mais électrique.

Dans la station totale, la structure de base du théodolite optique n'a pas changé. Il y a toujours une embase, une alidade, une lunette tournant autour de deux axes et les lectures angulaires se font toujours sur un cercle de verre (limbe). Là s'arrête la similitude. Il n'y a plus de mesure stadimétrique des distances, mais un distancemètre électronique incorporé. Le

cercle de verre n'est plus gravé, mais comporte un codage électronique. Seul le pointage est fait par l'œil de l'opérateur, mais, la lecture des mesures et leur enregistrement ne font plus intervenir ni son œil, ni son crayon !

Nous avons vu précédemment la mesure électronique des distances. En ce qui concerne les lectures angulaires, plusieurs types de procédés peuvent être envisagés, mais nous allons en premier lieu nous attacher au Reg ELTA 14.

### ■ L'ancêtre Reg Elta 14

La description en détail du procédé de mesure a été faite par les Professeurs Deumlich et Staiger (voir bibliographie) et nous ne donnerons que le principe général de cet appareil.

En premier lieu, le limbe en verre avec les graduations gravées des théodolites classiques avait été remplacé par un limbe en verre portant un codage absolu. Ce limbe était lié aux mouvements de la lunette par un dispositif complexe de roues embrayables comportant 400 dents correspondant donc à un mouvement de 1 gon.

Le système de lecture se faisait en deux temps, comme pour les théodolites classiques, avec en premier lieu une estimation approchée. Cette estimation était déduite d'un contact électrique en or sur quatre secteurs du limbe. Un classement matriciel décodait les informations reçues pour obtenir cette estimation. Un dispositif lié au fin mouvement de  $\pm 0,8$  gon permettait d'avoir les appoints et les mesures étaient données au mgon. Quant au cercle vertical, son origine n'était plus déterminée par une nivelle, mais par un compensateur pendulaire.

Les LED (Light Emission Diod) et cristaux liquides n'existaient pas encore. On pouvait cependant lire les trois mesures d'un point, l'une après l'autre, sur une fenêtre à tambour, comme pour le MS11. Cependant, les résultats étaient directement enregistrés sur bande perforée.

### ■ Les différents procédés de mesure électronique des angles

#### • Codage absolu sur plusieurs "tracés type code"

C'est ce type de codage qui avait été adopté sur le Reg ELTA 14, mais avec un procédé de lecture différent des procédés actuels. Il a été repris sur des appareils de la génération suivante : ELTA 2, S10 et S20 de Zeiss et HP3820 de Hewlett Packard.



**Le codage absolu du limbe du Reg Elta 14, avec dans la partie interne le codage correspondant aux quatre quadrants.**



■ ■ ■ • **Codage absolu sur un "tracé type code"**

La lecture électronique d'un tel codage a été rendue possible par les capteurs CCD (Charge Coupled Devices) mis au point par les laboratoires Bell à partir de 1970. Mais, le temps de développer cette technique, elle ne fut employée que plus tard par les constructeurs.

Le cercle verre comporte des graduations encodées. Par l'intermédiaire d'une ligne CCD (Charge Couple Device), le capteur transforme la lumière d'un émetteur traversant le limbe en signal électrique digitalisé. Un convertisseur traite ensuite ce signal électrique en image numérique. L'angle précis est déduit d'une interpolation. C'est le procédé adopté sur les Leica T 1000 ou 1600, entre autres. Depuis 1984, LEICA utilise dans ses stations totales, des encodeurs absolus qui conservent la lecture, même si on éteint la station au cours d'un tour d'horizon. Cela évite aussi de réinitialiser le cercle vertical.

• **Codage binaire et "tracés type code" parallèles**

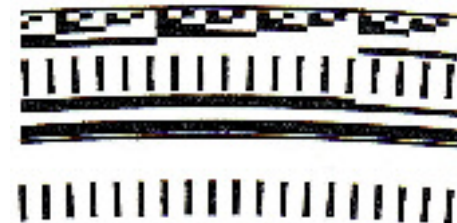
Le codage est fixé sur des cercles concentriques appropriés, chaque graduation ayant une période double de la précédente. Ce procédé est coûteux, mais il permet de conserver l'angle mesuré après l'extinction de l'appareil. Je ne peux citer d'appareils employant ce procédé.

• **Codage incrémenté de "graduations linéaires"**

Par une application numérique et analogique, les traits de la graduation sont incrémentés. On appaire une diode électro-luminescente et une photodiode pour faire ressortir le caractère clair-obscur de ces graduations. Suivant les appareils, le rayon émis par la diode lumineuse est réfléchi par le cercle ou le traverse avant d'être capté par la photodiode. Sur le TC1 de Wild, deux systèmes de balayage diamétralement opposés étaient utilisés. Le limbe, de 80 mm de diamètre était recouvert d'un raster réfléchissant de 12 500 graduations correspondant à un intervalle de 32 mgon. Une grille de phase permettait une interpolation de 1/16, ce qui permettait d'apprécier le mgon grâce aux deux systèmes diamétralement opposés. Bien qu'avec des systèmes de lecture ou d'interpolation propres, les appareils E2 de Kern, les séries E de Zeiss, GTS de Topcon ou DTM 750 de Nikon obéissaient à un procédé de base identique.



**Codage incrémenté des graduations.**



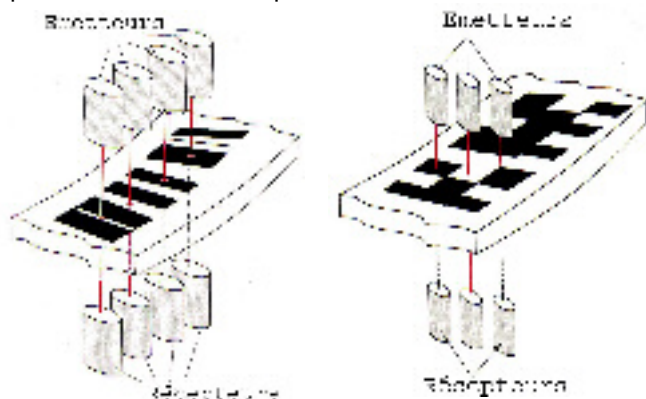
**Sur le Zeiss Elta 2, codage absolu avec des graduations**

• **Procédés de haute précision**

Pour les mesures très précises (0,1 à 0,2 mgon), les techniques précédentes comportent des compléments ou des variantes.

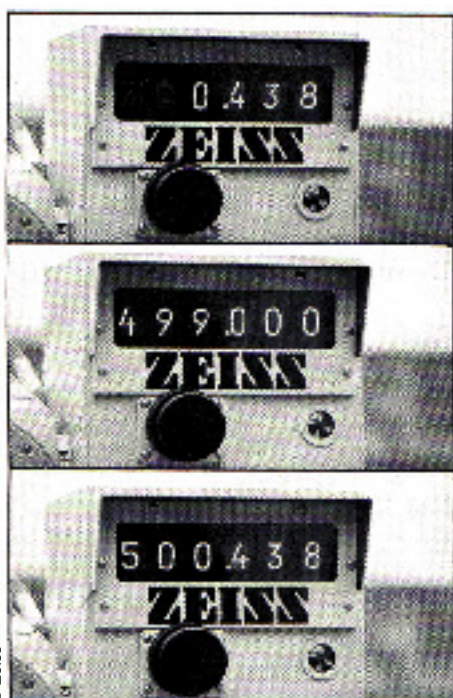
L'ELTA 2, comme nous l'avons vu, utilise le codage absolu. Ce codage absolu est situé du côté extérieur du cercle. Mais, il est complété vers l'intérieur par deux séries de graduations linéaires coaxiales de 0,5 gon d'écart. Ces deux séries concentriques sont décalées l'une par rapport à l'autre d'une demi-graduation et un système de prismes permet de faire les lectures sur deux zones diamétralement opposées. Ce procédé permet d'éliminer l'erreur d'excentricité et d'obtenir des lectures à 0,25 gon près. Pour les mesures fines (appoint), le secteur de 0,25 gon peut être divisé par une grille en 1 250 intervalles. Grâce à une lame à faces parallèles à laquelle est associée une lame raster graduée non linéairement, on peut faire une lecture à 0,2 mgon. Sur l'E2 Kern, le cercle est incrémenté avec 20 000 divisions. Les deux côtés diamétralement opposés du cercle sont superposés avec un léger changement d'échelle (1,005) qui provoque un moiré. Son analyse à travers quatre photodiodes permet la lecture à 0,1 mgon.

Sur la série T2000 et T3000 de Leica, le constructeur innove avec un procédé nommé "lecture dynamique du limbe". Le cercle comporte 1 024 secteurs alternativement clairs et sombres, dont un secteur origine. A chaque mesure angulaire, un mécanisme fait défiler le cercle sur un tour complet, face à deux dispositifs de lecture : l'un lié à la partie fixe de la station et l'autre à la partie mobile. Le comptage différentiel des graduations et le déphasage entre les dispositifs de lecture donne la lecture angulaire exacte. La lecture tient compte de la moyenne des 1 024 angles déterminés par les graduations du cercle entier, éliminant ainsi les erreurs de graduation et d'excentricité. Cependant, le défilement du cercle sur un tour complet prenait du temps (jusqu'à 1 s) et n'était pas adapté au suivi de cible. De plus la méthode était coûteuse, aussi a-t-elle été abandonnée.



**Codage absolu sur un tracé codé.**

**Codage binaire sur tracé parallèle.**



Système de lecture du SM11 sur tambour chiffré. L'appoint indiquant les mètres et les décimales commence par 0. La longueur totale ne peut donc être 499,438, mais 500.438.

### ■ Affichage des lectures

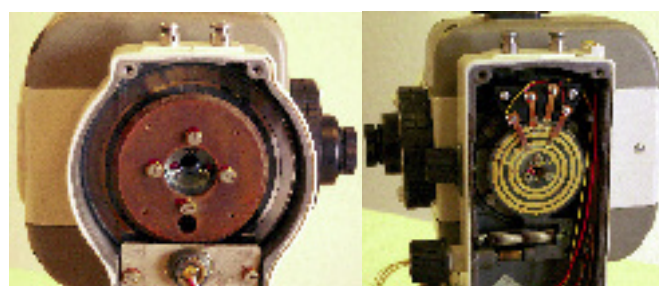
Les LED (Light Emission Diod) ne furent employées pour la première fois en topographie qu'en 1971 sur les calculatrices HP. Les cristaux liquides arrivèrent deux ou trois ans après. Il fallut attendre encore un peu pour les voir apparaître sur les appareils de terrain. Avant la généralisation de cette nouvelle technique, les chiffres sur tambour, comme pour les compteurs kilométriques de voitures servaient à afficher les résultats. C'était le cas pour certains distancemètres électroniques et pour le ZEISS SM11 (voir le paragraphe : *Les premiers appareils*).

## Mesure électronique des angles verticaux

Le principe de lecture et d'enregistrement reste le même que pour les angles horizontaux. C'est la définition de l'origine 0 des angles verticaux qui va changer. Pas de bulle à régler car il y a un compensateur.

Sur les théodolites optiques de la dernière génération, il y avait déjà un compensateur pendulaire qui agissait directement sur la lecture en modifiant le chemin optique. Seul le Kern DKM2 avait innové avec le premier compensateur liquide.

Sur le Reg ELTA 14, le compensateur était pendulaire, comme sur les théodolites optiques précédents. En 1977, HP avec sa série 3800, allait généraliser les "compensateurs à liquide". Dans ce type de compensateur, la partie mécanique du pendule a disparu. Le rayon émis par une diode se réfléchit sur la surface d'un liquide avant d'être recueilli par un capteur. La surface du liquide du compensateur étant horizontale, ce dispositif permet ensuite de déterminer la position exacte du 0 sur le limbe et de supprimer ou rendre la collimation verticale très faible. Plusieurs variantes de compensateurs à liquide ont été conçues par les différents constructeurs, mais le mercure qui servait de liquide dans les premiers modèles a été abandonné. Souvent, une petite rotation



D'un côté, cercle vertical incrémenté d'un appareil Nikon. De l'autre côté, balais-contacts liés à la molette de fin pointé.

aller-retour de la lunette, de part et d'autre de l'horizontale, permet d'initialiser le cercle vertical.

## Précision des stations totales

Le remplacement de la gravure mécanique des limbes en verre par une graduation codée ou incrémentée électroniquement a diminué l'erreur de graduation des cercles. Aussi, l'ignore-t-on sur les appareils de classe moyenne. Leur précision est de 1 à 2 mgon contre 3 à 10 mgon pour les anciens tachéomètres optiques. De plus, des procédés annexes ont permis de supprimer l'erreur d'excentricité.

Il faut aussi noter que le procédé de lecture électronique n'est pas adapté aux multiples répétitions avec origines différentes. Aussi, même avec les appareils de grande précision (0,1 à 0,2 mgon), les fastidieuses observations avec multiples répétitions sur origines différentes du limbe ont disparu. En ce qui concerne certains de ces appareils, nous avons vu l'utilisation de procédés complémentaires, permettant de diminuer encore l'erreur de graduation.

Comme sur les théodolites optiques, les autres erreurs sont éliminées par un double retournement de la lunette. Mais, cela ne signifie pas que la précision angulaire de 0,1 mgon puisse être obtenue par une simple mesure CG-CD avec un théodolite de précision! Quand on vise un objectif lointain, la précision dimensionnelle de cet objectif et les conditions atmosphériques doivent être évidemment prises en compte, une seule paire de mesures ne peut alors suffire... Pour les distances courtes, d'autres paramètres entrent en jeu.

Le caractère absolu de l'informatique et de l'électronique a fait négliger la réalité du terrain à trop d'opérateurs. L'abandon de la triangulation pour le GPS a trop souvent fait oublier la correspondance "dimension-angle" : 0,1 mgon est l'angle sous lequel on voit un objet de 1 cm de diamètre à 6,4 km, ou de 0,1 mm à 64 m et cela est négligé, même dans l'enseignement!

## Levés codés, dessin numérique sur le terrain

L'une des contraintes du lever de détail était le dessin manuel d'un croquis de terrain. Le porteur de prisme chargé de ce croquis y notait les numéros de tous les points levés, ainsi que le signe conventionnel correspondant ou les liaisons des détails

■■■





**Le porteur de prisme a en bandoulière l'ordinateur portable sur lequel il commande la station robotisée et sur lequel, il dessine en DAO au fur et à mesure du lever. On voit en bas à gauche l'antenne permettant la liaison avec la station robotisée. La souris est du type crayon. Le logiciel de DAO est ici le TOPOSOFIT.**

- linéaires. Cela alourdissait les opérations de terrain et, surtout, le report au bureau. C'est ainsi que fut imaginé le codage, l'opérateur tapant un code, tant pour les points que pour les lignes à tracer, en accord avec celui adopté sur le logiciel de Dessin Assisté par Ordinateur (DAO). Avec le carnet électronique GRE3, Wild semble avoir été le précurseur, mais, c'était aux utilisateurs à programmer un lien informatique entre le théodolite et le logiciel de dessin.

Cependant, le codage avec son facteur humain, est encore sujet à erreurs ou oublis. Actuellement apparaissent des logiciels, tels GEOVISUAL ou TOPOSOFIT. Le porteur de prisme a en bandoulière un petit ordinateur portable, en liaison radio ou bluetooth avec la station totale, et sur lequel il peut dessiner le levé avec un logiciel de DAO, au fur et à mesure que sont déterminés les points. Le dessin étant fait sur le terrain auquel il peut être immédiatement comparé, la méthode diminue les risques d'oublis et d'erreurs. Il diminue aussi le temps d'exploitation au bureau, mais il augmente celui de terrain. Nous revenons au bon procédé de la planchette, mais d'une manière informatique !

## La technique Bluetooth

C'est une spécification des télécommunications qui utilise une technologie radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre appareils électroniques. Elle supprime les liaisons par câble entre de nombreux appareils. Cette technique fut étudiée à partir de 1994 par le constructeur suédois Ericson. Son nom a été donné en hommage au roi Harald 1er dit Blåtad (Dent bleue), qui unifia durant son règne Suède, Norvège et Danemark. Elle voit son application effective en 1999, mais il faut attendre 2002 pour voir ses débuts en topographie. Elle permet, peu à peu de s'affranchir des innombrables fils joignant les appareils topographiques. Elle utilise les bandes de la fréquence ISM (Industrial Scientific Medical) qui vont de

2,4 à 2,4835 GHz. On pense que dans les années à venir elle va permettre des débits 100 fois plus importants.

## Les stations totales en 2005

Comme vu précédemment avec les distancemètres, l'arrivée du GPS a exclu le théodolite de la plupart des travaux de canevas topographique ou géodésique. Par contre, employées par des utilisateurs de plus en plus nombreux, le nombre de stations totales a explosé. Outre les levés de détail, les travaux publics, les levés architecturaux, elles sont utilisées en industrie, pour la surveillance d'ouvrage et les auscultations qui peuvent être faites en mode automatique. Le meilleur exemple de ce type de travail a été réalisé à Amsterdam par les travaux spéciaux de l'IGN.

Enfin, les constructeurs, LEICA et TRIMBLE en particulier, recherchent activement un appairage GPS-Station totale (voir le chapitre GPS).

## Les regroupements en topographie

Dans les pages qui ont précédé, nous avons beaucoup parlé d'AGA Geotronics, précurseur dans de nombreux domaines, de ZEISS lui aussi à la pointe de la technique et enfin de WILD. Aujourd'hui, ces noms prestigieux ont disparu. Du fait de l'arrivée de constructeurs japonais (Nikon, Sokkisha, Topcon) et d'une concurrence de plus en plus dure, de nombreux regroupements se sont faits en topographie. En 1988, après l'association de Wild avec le photographe Leitz, l'association Wild-Leitz absorbe KERN, puis 1990 voit la fusion de Wild-Leitz avec la Cambridge Instrument Company, pour former LEICA (contraction de Leitz et Cambridge). En 1997, Zeiss est racheté par Spectra-Precision qui est à son tour absorbé en 2001 par la marque de GPS américaine TRIMBLE, laquelle rachète aussi le suédois AGA Geotronics. Nous verrons plus loin les regroupements qui se sont faits en lasergrammétrie, technique pourtant nouvelle...

## Bibliographie

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

**CHEVES M. 2000** Geodimeter the first name in EDM, Professional Surveyor Magazine n°2.

**DEUMLICH F. - STAIGER R. - 2002** *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*, 9<sup>e</sup> édition, Wichmann, Heidelberg.

Cet ouvrage remarquable devrait figurer dans la bibliothèque de toutes les écoles de topographie. Il n'existe malheureusement pas en version anglaise ou française.

**PUGH Nathan - THOMPSON Carl - WALLACE Daniel - 2005** *Naviguer dans le monde sans fil XYZ* n°104

**Sites Internet :** [www.wild-heerbrugg.com](http://www.wild-heerbrugg.com) Musée virtuel Wild réalisé par Jorg Duedal (c'est le site le plus complet, réalisé bénévolement par un ancien employé de Wild.)  
<http://americanhistory.si.edu/collections/surveying/index.htm>



## *Autres instruments de mesure ou de lever*

### **Les niveaux code-barres (ou niveaux de précision numériques)**

Le code-barres fit son apparition en 1974, employé entre autres pour la gestion des prix dans les centres commerciaux. Les constructeurs de matériel topographique le transposèrent au nivellement, les graduations centimétriques des mires étant remplacées par une graduation "code-barres" et l'œil humain par des diodes détectrices.

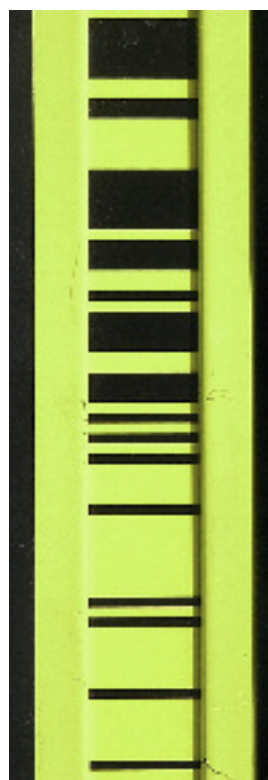
La lecture de la mire codée repose sur un système électronique de traitement d'image, intégré à l'instrument. Cela permet d'avoir directement les dénivellations et de les mettre aussitôt en mémoire. On évite ainsi les fastidieux et nombreux calculs de contrôles auxquels devaient s'astreindre auparavant les niveleurs, à partir des trois lectures sur les trois fils du niveau. Pour le nivellement de précision, toutes les procédures de contrôle faites manuellement sur les carnets d'observation de l'IGN étaient impressionnantes !

Rentré au bureau, on peut vider les observations sur ordinateur. Ce nouveau procédé évite ainsi les erreurs de lecture et de transfert. Le gain de temps est encore augmenté et les risques d'erreur sont quasiment éliminés.

Il est aussi possible, si on le désire, de noter sur un carnet les observations affichées à l'écran. Ce qui peut avoir une utilité au cours de la présence sur le chantier.

Grâce à un programme intégré, on peut encore calculer en continu les points de rayonnement, ou encore compenser un

Lasers Riegl LMS Z390 et 4201 utilisés à Karnak (Egypte) pour des levés architecturaux et dans le Gouffre de la Pierre Saint-Martin pour lever et déterminer le volume de l'immense salle de la Verna. Remarquer la caméra couplée Nikon D100 située au-dessus de l'appareil.



Une mire de nivellement "code-barres".

© Instrumentenkunde der Vermessungstechnik



A gauche, des mires classiques, à droite une mire "code-barres"





**Le niveau Wild NAK2 de la dernière génération avant l'apparition des niveaux numériques. Cet excellent niveau, sur lequel peut être adaptée une lame à faces parallèles pour lectures au 1/100 mm, a un compensateur pendulaire. La bulle sphérique de l'embase suffit pour la mise en station.**



**Le Leica NA 2000, premier niveau numérique apparu sur le marché. Les multiples boutons permettent d'introduire les altitudes des repères de départ et d'arrivée ou de choisir différents modes opératoires.**



**Le NiDi 12 de Zeiss devenu Trimble après l'absorption de Zeiss.**

■ ■ ■ cheminement directement, après fermeture. Cependant, si tout le dispositif de lecture, de mémorisation et de calcul relève de l'électronique et de l'informatique, le système de définition de l'horizontalité de l'axe optique reste mécanique, avec un compensateur pendulaire, comme sur les niveaux optiques.

Nous rappelons que le compensateur pendulaire, bien qu'apparu à la fin des années 1960, ne se généralisa qu'au milieu des années 1970. Il nécessite que l'horizontalité de l'axe optique du niveau soit dégrossie avec la nivelle sphérique à une dizaine de cgonns près. Le compensateur pendulaire agit sur la lecture en modifiant le chemin optique.

Le premier niveau code-barres, le NA2000 fut produit par Wild-Leica en 1990, Topcon suivit peu après avec les modèles DL-101 et 102. Par la suite, Sokkia avec le modèle SDL 30 et Zeiss avec le modèle DiNi 12 produisirent aussi ce type d'appareil. L'IGN fit l'acquisition de son premier niveau code-barres, le NA3000 de Leica, en 1993, qui associé à une méthode motorisée, permettait de faire 50 km de nivellement de précision dans la journée.

## Les scanners lasers (ou lasergrammétrie)

Cette technique toute nouvelle n'a pas encore défini ses termes, aussi peut-on la trouver sous plusieurs dénominations. Devais-je la classer avec la photogrammétrie ? Son aboutissement étant un modèle numérique du terrain et non un plan proprement dit, j'ai préféré la traiter à part.

Elle découle de l'application de la technique des diodes laser pulsées, vue précédemment avec les distancemètres laser, qui pouvait émettre jusqu'à 10 000 tirs à la seconde. Un système de miroirs pivotant permet un balayage laser vertical, puis horizontal, alliant mesures angulaires et mesures de distance. On peut ainsi obtenir en quelques minutes un nuage de centaines de milliers ou de millions de points 3D.

Deux progrès techniques ont permis le développement des scanners laser. D'abord, l'arrivée des sources laser à semi-

**Un niveleur classique avec son carnet. Fil supérieur, fil niveleur, fil inférieur. Les trois lectures étaient suivies de soustractions pour contrôle. Dans le nivellement de précision, de multiples contrôles étaient faits sur les visées AV, AR et en fin de page.**



conducteurs, permettant des longueurs d'onde plus élevées avec de plus fortes puissances, a permis d'accroître la portée des mesures de distances laser sans réflecteur. Elle peut atteindre maintenant 1 km. Il faut y ajouter les progrès de l'informatique permettant de traiter plus rapidement une grande masse de données.

Les distances peuvent toujours être mesurées par le déphasage entre l'onde émise et celle reçue (Leica 4500, FARO). Mais aujourd'hui, avec les progrès sur la mesure du temps, on peut aussi déduire les distances à partir du temps de trajet, appelé à cette occasion "temps de vol" !

Ils trouvent leur meilleure application dans les levés architecturaux 3D (patrimoine culturel), les levés de carrière, falaises ou glissements de terrain. Souvent couplés à une caméra numérique interne qui facilite la lecture de l'image, ils génèrent un "nuage de points", à une cadence qui peut aller de 2 000 jusqu'à 10 000 points par seconde.

Une façade levée par balayage peut comporter un million de points ou plus, lesquels donnent une image fidèle qu'il suffit de référencer en se calant sur des points d'appui (cibles réfléchissantes) déterminés en XYZ, dont le nombre varie en fonction de la morphologie et de la dimension du lever.

La fondation EDF avait financé en 1994 le levé de la grotte Cosquer dans les calanques de Cassis. Ce levé, encore expérimental, fonctionnant avec une technique mise au point par

M. SOISIC, préfigurait l'arrivée des scanners-lasers. Pour rappel, le Soisic est une mesure par triangulation avec une portée de l'ordre de 25 m (pour le modèle S25 qui comportait un bras avec à une extrémité l'émetteur laser et sur l'autre extrémité un capteur CCD qui photographiait la position du spot laser sur l'objet) alors que les autres scanners fonctionnent avec des mesures de "temps de vol" du laser. La même année, Cyrax expérimentait lui aussi le scanner laser aux Etats-Unis. Optech parle des premières recherches en 1987. Bien que récente, cette technique a fait l'objet de regroupements. Soisic a été absorbé par Mensi, lui-même absorbé par Trimble, Cyrax a été absorbé par Leica. Subsistent encore, entre autres, le constructeur autrichien Riegl, FARO et l'américain Optech. Ces appareils sont encore d'un prix élevé oscillant entre 70 000 et 130 000 euros en 2005, sans le logiciel de traitement.

La difficulté actuelle réside dans le traitement et l'exploitation du volume monumental des mesures effectuées. Les outils informatiques traditionnels ne sont plus adaptés à la gestion de fichiers de plusieurs millions ou centaine de millions de points. A titre d'exemple, le relevé d'un tunnel de 7 km de long par la société Atm3d comportait 950 millions de points ! Aussi, leur mise en œuvre nécessite des spécialistes, surtout en ce qui concerne l'exploitation des résultats et l'intégration aux logiciels topographiques. De même certains détails très fins, tels que les arêtes de petits motifs sculpturaux, peuvent passer entre les points du semis. On essaye d'y remédier par un maillage entre les points.

Sans caméra numérique intégrée ou couplée, on obtient seulement un semis de points semblable à un Modèle Numérique de Terrain (MNT) permettant de nombreuses applications. Mais, quand il y a des peintures, telles que dans les grottes préhistoriques Cosquer ou Chauvet, des images sont nécessaires pour compléter le travail du scanner-laser, ce qui demande, évidemment un éclairage. Quant à la caméra numérique intégrée ou couplée, elle facilite grandement l'exploitation des résultats en complétant le semis de points par une image numérique superposée. Mais, elle doit être calibrée auparavant pour permettre de superposer la perspective photographique au semis de points en 3D.

En 2007, de nombreuses améliorations avaient été faites, nous en donnons trois à titre d'exemple. Trimble annonce

pour son Scanner 3D à laser pulsé : une portée de 350 m sur surface mate blanche réfléchissante à 90 % et 155 m sur surface réfléchissante à 18 % ; la fréquence est de 10.000 points/seconde et la précision de la surface modélisée peut atteindre  $\pm 2$  mm. Quant à Faro, sans préciser la technique employée, il annonce pour son laser scanner LS 880, 120.000 points/seconde avec une portée de 76 m sur surface mate blanche réfléchissante à 90 % et une précision de  $\pm 3$  mm à 25 mètres sur surface mate blanche. Quant à son laser tracker X V2, utilisé pour la mesure de pièces et de machines de grandes dimensions et constitué d'un laser asservi suivant un réflecteur sphérique, Faro annonce pour une enveloppe de travail de 70 mètres (rayon 35 m), une précision de 0.015 mm. Il faut citer aussi Leica Geosystem qui commercialise depuis août 2007 la ScanStation 2 dont la vitesse maximale de balayage passe de 4.000 à 50.000 points/seconde et une réduction du pas minimum à 1 mm. Le logiciel de pilotage de l'instrument évolue lui aussi.

## Levers lasers aéroportés ou LIDAR (Light Detection And Ranging)

A cheval sur la topométrie et la photogrammétrie et ayant quelques similitudes avec la lasergrammétrie qu'elle complète, cette nouvelle technique permet d'obtenir un MNT (Modèle Numérique de Terrain) ou un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) dans les villes par un balayage laser à partir d'un avion ou d'un hélicoptère.

Comme en lasergrammétrie, la distance à un objet ou à une surface est donnée par la mesure du temps entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi.

Au cours du balayage d'une bande de 50 m de large fait d'une altitude de 50 m, on peut obtenir 30 points par m<sup>2</sup> avec une précision de  $\pm 7$  cm.

Pour un balayage à plus petite échelle, c'est-à-dire pris de beaucoup plus haut, on a une densité de un point tous les 2 ou 4 m<sup>2</sup> avec une précision de 15 cm en altitude et du double en planimétrie.

Pour un laser bathymétrique, jusqu'à une profondeur maximale de 50 m, on peut obtenir une densité de un point pour 4 à 25 m<sup>2</sup>, une précision de 0,25 m sur les profondeurs et de 2,5 m en planimétrie. (Documentation Fugro Geoid)

Les premières mesures LIDAR furent effectuées en mai 1962, pour valider des mesures de distance terre-lune. Mais les techniques de l'époque ne permettaient pas les applications actuelles qui ont pris leur essor avec la lasergrammétrie, au début des années 2000. ●

## Bibliographie

CHAZALY Bernard - LAOZE Emmanuel 2005 *Le relevé par scannage 3D du temple d'Opet à Karnak*, XYZ n°102.

CHAZALY Bernard 2006 *La lasergrammétrie appliquée à l'auscultation d'ouvrages d'art* XYZ n°106.



**Lever d'une façade. La photo complète et permet de mieux comprendre le semis de points.**



# L'INFORMATIQUE ET LE TRAITEMENT DES DONNEES



IGN - droits réservés

*Depuis vingt ans, l'informatique a explosé. Tel un raz-de-marée, elle a tout submergé, et dans les techniques et dans les formations et dans les mentalités. Les sexagénaires sont noyés ! En 1995, alors que je m'étais mis au GPS, j'avais acheté un bon ordinateur portable. Il avait un disque dur de 600 Mégaoctets. Huit ans plus tard j'en ai acheté un nouveau de 30 Giga-octets de mémoire de stockage. Les capacités continuent à progresser ! Mon ordinateur de 1995 n'a plus une mémoire suffisante pour absorber certains logiciels actuels... Cependant, la gestation précédant cette explosion fut beaucoup plus longue.*

## *Les ordinateurs et micro-ordinateurs*

*(Plusieurs sites de l'histoire informatique ou de musées de l'informatique existent sur Internet. On note parfois des contradictions de dates, allant jusqu'à 10 ans, entre les sites.)* Depuis longtemps, de nombreuses petites machines à calcul mécaniques avaient été conçues, à partir du XVII<sup>e</sup> siècle en particulier. Entre 1940 et 1944 apparaissaient aux Etats-Unis des prototypes de calculateurs semi-électroniques tels que le Model I de Bell, le Mark I de Howard Alken ou la machine

Harvard-IBM. D'après certains auteurs, le premier ordinateur aurait été créé par Atanasoff John Vincent en 1938, mais, s'agissait-il d'une conception purement intellectuelle ? En 1941, l'allemand Zuse aurait lui aussi conçu un ordinateur destiné à aider la conception d'avions et de missiles. Encore faudrait-il définir ce que l'on entend par ordinateur, l'ordinateur n'étant pas un simple calculateur, programmable ou pas. La deuxième guerre mondiale vit les belligérants essayer de

mettre au point des calculateurs ou ordinateurs à but militaire, en particulier pour le décodage des messages secrets. L'absence de composants électroniques non encore inventés (le transistor ne le fut qu'en 1947-48) et la taille démesurée des outils mis en place limitait l'utilisation de ces prototypes.

L'ENIAC (Electronic Integrator and Computer), construit aux Etats-Unis en 1946, pourrait être considéré comme le premier véritable ordinateur ouvrant la voie aux ordinateurs. Il pouvait effectuer chaque seconde 5 000 additions ou soustractions, 350 multiplications ou 50 divisions. Couvrant une surface de 150 m<sup>2</sup>, pesant 30 tonnes, il dégageait une chaleur énorme, ses 19 000 tubes cathodiques nécessitant une puissance de 140 Kw. De plus, il était commandé par un tableau de connexions qui demandait plusieurs jours de modifications avant d'effectuer un nouveau travail. Les études pour corriger cet inconvénient ouvrirent la voie des recherches sur les programmes enregistrés, avec les travaux de Eckert et Mauchly.

En 1948, la compagnie Bell inventait le transistor, qui dans les années 1950 remplaçait les tubes à vide et permettait de réduire sensiblement la taille des appareils électroniques et leur consommation.

En fait, la première commercialisation d'un ordinateur se fit en 1951, avec le lancement et la vente de l'UNIVAC 1 au bureau de recensement des Etats-Unis.

En 1952, BULL commercialise l'ordinateur Gamma 3 qui sera vendu à mille exemplaires (voir IGN).

**En 1953 est inventée la mémoire à tore de ferite. Le premier disque dur, constitué de 50 disques de 61 cm de diamètre et d'une capacité de 5 Mo est construit en 1956, mais ce type de disque n'apparaîtra couramment dans les ordinateurs que plus tard.**

En 1957, premier essai de normalisation des méthodes de travail, avec l'apparition des langages Fortran et Cobol.

En 1958, Texas instrument développe le circuit intégré qui combinait sur un même circuit plusieurs transistors sans utiliser de fil. En 1968, le montage de ces composants sur un petit disque de silicium allait réduire sensiblement la taille et le coût des ordinateurs.



IGN - droits réservés

**Un ordinateur à l'IGN, dans les années 1970. A côté de l'opératrice, des cartes perforées IBM, derrière elle des bandes perforées et devant une imprimante à picots. Le volume du système est énorme pour une mémoire de quelques Ko ou 10 Ko !**

En 1960 les ordinateurs, très onéreux, ne trouvaient d'application que dans les services financiers ou organes gouvernementaux. Bien que constituant un progrès important, les transistors dégageaient encore beaucoup de chaleur, consommant une grande énergie.

Après 1968, la grande avancée vient de l'utilisation d'un système d'exploitation qui permet de faire tourner plusieurs programmes différents sur une même machine, un programme central contrôlant et coordonnant la mémoire centrale de l'ordinateur.

En 1968 : Douglas C. Engelbart, de la Stanford Research Institute, fait une démonstration d'un environnement graphique avec des fenêtres à manipuler avec une souris. Il démontre dans cet environnement l'utilisation d'un logiciel de travail collaboratif en groupe. La souris sera améliorée en 1979 par J.D. Nicoud. Mais il faudra attendre beaucoup plus tard, avec Windows (1985) pour voir cet outil se généraliser

En 1970, les écrans sont commercialisés comme périphériques de sortie, pourtant, le premier logiciel graphique interactif avait été étudié dès 1963 par Ivan Sutherland qui utilisait un stylo optique pour dessiner des schémas sur un écran. En 1967, le même Sutherland et D.C. Evans du département informatique de l'Université de l'Utah, avaient réalisé le premier prototype d'imagerie informatique en trois dimensions en numérisant une Volkswagen Coccinelle. Tout cela était resté au stade des études.

En 1971 est développé le premier microprocesseur, circuit intégré permettant de regrouper tous les circuits d'un ordinateur (unité de calcul, mémoire, entrées et sorties) dans un même boîtier (Intel 4004). Durant les années qui suivent, les améliorations consistent à réduire la taille des circuits intégrés. Le LSI (Large Scale Integration) permet de placer plusieurs centaines de composants sur un même support de silicium. Plus tard, l'ULSI (Ultra LSI) permettra d'en placer plusieurs millions.

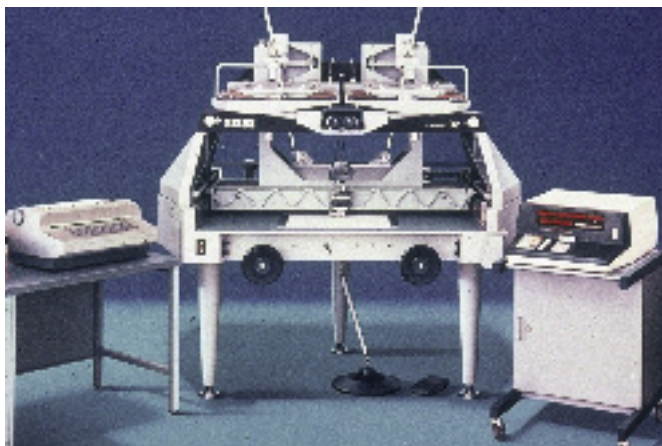
En 1973, Xeros met au point la première carte graphique couleur capable d'afficher une image 640x486 en 256 couleurs et aussi de numériser un signal video. La même année, cette société développe le prototype de la station de travail ALTO



IGN - droits réservés

**Toujours dans les années 1970, un ordinateur IBM et une imprimante, les dimensions sont toujours imposantes.**





Archives auteur

- ■ ■ dont l'écran graphique affiche une image. Mais, il faudra attendre avril 1984 et la sortie de Macintosh avec interface graphique et souris pour voir ce type d'écran exprimer toutes ses possibilités.

Historiquement, le premier micro-ordinateur, le Micral est conçu en 1973 par le français Gernelle de la société R2E dirigée par André Truong Trong Thi.

Encore la même année, IBM invente le premier disque dur où la tête de lecture plane au dessus du disque sans le toucher.

En 1975, des constructeurs tels que Apple, Commodore, Radio Shack se lancent dans la conception de micro-ordinateurs, construits autour d'un micro-processeur et utilisables par tout le monde. Leur commercialisation se fera presque simultanément en 1977 aux USA, sous le nom de APPLE II, PET et TRS80. Le Basic, langage simplifié de programmation est inventé pour traiter des problèmes relativement simples.

Mais, il faudra attendre les années 1980 pour voir le micro-ordinateur prendre son essor et son utilisation par plusieurs géomètres français. Le 12 août 1981, IBM lance son ordinateur personnel : le PC (Personnal Computer) ou modèle 5150, avec microprocesseur Intel 8088, cadencé à 4,8 Mh, d'une mémoire vive de 16Ko pouvant être portée à 256 Ko. En 1983 IBM lance le PC/XT ou modèle 5160 avec un disque dur de 10 Mo, puis en 1984 le PC/AT avec disque dur de 30 Mo (à comparer avec 2008 !) destiné aux PME. De 1981 à 1982, le nombre de PC dans le monde passe de 2 à 5 millions.

En France, on vit apparaître Goupil en 1979 dont le micro-ordinateur avait équipé mon cabinet de géomètre en 1987, mais la société déposa son bilan en 1991.

A titre indicatif concernant les prix, en 1981, Xeros commercialise le STAR 8010 avec une Ram de 1 Mo et un disque dur de 8 Mo. Mais son prix excessif, 17.000 dollars ou 150.000 F de l'époque (50.000 euros compte tenu de l'inflation) en fera un échec commercial. Il faut noter que le premier PC dit "portable" nécessitait des aptitudes de déménageur, il apparut en 1981 (Osborn Computer)!

**En avril 1984, Apple introduit le Macintosh avec interface graphique et souris, vendu 25.000F en France. Compte tenu de l'inflation, cela équivaut à plus de 7500 euros en 2005. Nous arrivons à l'explosion du nombre de micro-ordinateurs dans le monde.**

Vers 1975, un appareil de restitution équipé en vue de l'enregistrement des coordonnées des points. Le micro-ordinateur n'existe pas encore. L'affichage des images ne se fait pas encore sur écran, sur lequel n'apparaissent que des chiffres ou des textes. Le gros coffret informatique en bas à droite est plus important que les unités centrales actuelles. Noter la machine à écrire semi-électronique qui complète le clavier sommaire de l'ordinateur.



**Micro-ordinateur moderne. La dimension de l'unité centrale s'est stabilisée à un volume réduit. Depuis peu, l'écran plat a remplacé le lourd et volumineux moniteur.**



**Le portable devenu l'outil indispensable de ceux qui se déplacent. On arrive aujourd'hui à des appareils ne dépassant pas deux ou trois kilos.**

Aujourd'hui, la mémoire et la puissance de travail des micro-ordinateurs ont explosé, ils font presque office d'ordinateur, reléguant ces derniers au seul service des grosses structures. En 2008, la capacité du disque dur d'un micro-ordinateur de base est de 200 Go et peut dépasser 1 ou 2 To sur certains modèles. Il en est de même pour la mémoire vive utilisée pour faire tourner un logiciel, elle est passée de 8 Mo en 1993 à 2 Go sur certains ordinateurs personnels actuels. La fréquence aussi a fait un bond depuis la fin des années 1990 pour passer de 66Mhz à 512 et même 1375 Mhz actuellement. Nous parlons ici des PC fixes et non des portables. On a même introduit des ordinateurs à double processeurs couplés qui ont encore accru la vitesse de travail.

## Les calculatrices

Hewlett-Packard semble avoir produit la première calculatrice électronique en 1968, c'était la HP 9100 A et B d'un prix de 4 900 dollars ! Mais cet engin lourd et intransportable était réservé au bureau. La deuxième génération apparut en 1971 avec la HP 9810 A d'un prix de 2 960 dollars... le premier à utiliser les LED (Light Emission Diod) de couleur rouge ou verte pour lecture sur écran. Les cristaux liquides arrivèrent 2 ou 3 ans après.

En 1972 apparaissent les HP 35 et 65, premières calculatrices programmables et portables.

En 1973-74 apparaît la HP 45, la première à donner le dernier X, elle avait 9 registres de stockage et donnait les fonctions trigonométriques en degrés, grades et radians. Le paradis pour les topographes ! Son prix, 800 dollars aux E.U. et 8 000 F en France, devait représenter plus d'un mois et demi du salaire d'un très bon ingénieur.

En 1975, HP sort sa deuxième génération de calculatrices portables avec les HP 10 à 29. En 1975, Texas Instruments sort sa première calculatrice programmable, la TI SR 52. Elle m'était offerte en 1976 pour la Croisière des Sables dont j'étais le navigateur, en vue de calculer les coordonnées des points déterminés par mesures astronomiques. Elle avait 224 pas de programme, un lecteur et enregistreur de carte magnétique.

En 1979 apparaît enfin le summum : la HP 41c. En France, elle valait de l'ordre de 3 000 F (plus de 1 000 euros en monnaie constante !). Cette merveille avait une capacité de mémoire de 2 Ko ou de 4 Ko avec un module, 200 à 400 pas de programme et un lecteur de carte magnétique. Aujourd'hui on en est à 512 Ko et plus, pour un prix 20 fois inférieur... Cette calculatrice utilisait la notation polonaise inverse, vraiment très astucieuse, mais qui demandait un certain temps d'adaptation. Cette notation a été abandonnée par HP, au profit des notations classiques, car elle lui faisait perdre des parts de marché, face à la concurrence aggravée par l'augmentation du nombre de fabricants !



Deux calculatrices de la génération 1975. Une calculatrice de bureau la HP 97, plus lourde et qui peut imprimer les résultats. La calculatrice de terrain HP 32 S II, beaucoup plus légère !

Maintenant, avec les programmes intégrés aux stations totales et les logiciels de calcul sur ordinateurs fixes, la calculatrice a perdu une grande part de son intérêt pour les topographes. Et pourtant, dans des cas particuliers, en cas de problème dans un chantier éloigné, elle peut encore servir ; comme son couteau, son bout de ficelle et ses allumettes au scout ! Ceci est surtout valable pour la jeune génération à qui l'informatique a enlevé la pratique du calcul mental. Trop souvent, elle ne sait plus faire des calculs élémentaires de tête et même retenir le numéro de son propre téléphone portable !



La HP 41 cv, merveilleuse calculatrice qui enchantait de nombreux topographes.

## Exploitation et mise en œuvre de l'informatique

### Les systèmes d'exploitation pour micro-ordinateurs

*De nombreux systèmes ont été imaginés, mais nous nous bornerons aux principaux.*

Lors de l'apparition des micro-ordinateurs, CP/M était le système le plus connu. En 1981, IBM va équiper ses micro-ordinateurs du PC-DOS issu de Q/DOS (Quick and Dirty Operating System). Quant à MS-DOS, il est longtemps resté la base des systèmes d'exploitation grand public de Microsoft. En 1984, Microsoft présente pour Apple : "Interface Manager" qui va donner naissance en 1985 à la première gamme de Windows (Windows 1 à 3.11). C'était une interface graphique pour compatibles PC basée sur un noyau MS-DOS. En 1995, avec l'apparition de Windows 95, MS-DOS perdit en théorie son statut de système d'exploitation. Les micro-ordinateurs, sauf Apple, sont vendus actuellement avec Microsoft Windows qui occupe une position quasi monopolistique.

### Les systèmes de lecture et de sauvegarde

#### ■ Les premiers systèmes

Dès le début, les cartes perforées furent utilisées pour entrer les données et même stocker les résultats. Il est bon de rappeler que les cartes perforées avaient déjà été utilisées par Jacquard, en 1805, pour ses métiers à tisser ! Il y eut ensuite les bandes perforées dans les années 1960, nous avons vu leur utilisation sur le Reg Elta 14 de Zeiss. La carte perforée a

■■■





Côte à côte, une disquette 3 1/2 pouces, un CD, une clé USB

progressivement disparu pendant les années 1970 remplacée par les unités d'entrée-sortie à bande magnétique puis à disquettes souples de format "8 pouces".

Quant aux bandes magnétiques, elles furent utilisées dès le début de l'informatique pour stocker les calculs intermédiaires ou les résultats. Bien qu'il y ait d'autres systèmes, elles sont encore largement utilisées pour sauvegarder des données, une bande de 10 cm de diamètre atteignant actuellement une capacité de 400 Go.

### ■ Les disquettes et Cédéroms

En 1971, IBM lance la première disquette 8 pouces. Elle sera remplacée en 1977 par la disquette 5 1/4, d'une capacité initiale de 160 Ko.

En juin 1982, Sony présente un prototype de lecteur de disquette 3 1/2 (standardisé plus tard à 1,4 Mo). Cependant, il faudra attendre la fin des années 1980 avant qu'il ne remplace entièrement les 5 1/4. A titre d'exemple, les Logabax acquis par l'IGN en 1984 ou le Goupil acheté pour mon cabinet de géomètre en 1987 avaient encore des lecteurs 5 1/4. Le stockage et l'archivage des données et des dossiers pouvaient se faire par l'intermédiaire du ZIP dont la mémoire des disquettes passera de 10 à 100 Mo, puis 250 et 750 Mo. Ces disquettes ont maintenant disparu.

En 1982, Sony et Philips annoncent un nouveau support numérique à haute capacité : le CD-Rom. Mais il faudra attendre 1984 pour voir commercialiser le premier modèle pour PC par Philips, au prix de 1 000 dollars aux E.U. et près de 10 000 F en France. En France, les premiers micro-ordinateurs munis d'un lecteur de CD (700 Mo) incorporé apparaîtront vers 1995 et munis d'un graveur de CD, vers 2000. Aujourd'hui, avec les normes USB, les disques durs externes permettent de stocker jusqu'à 500 Go.

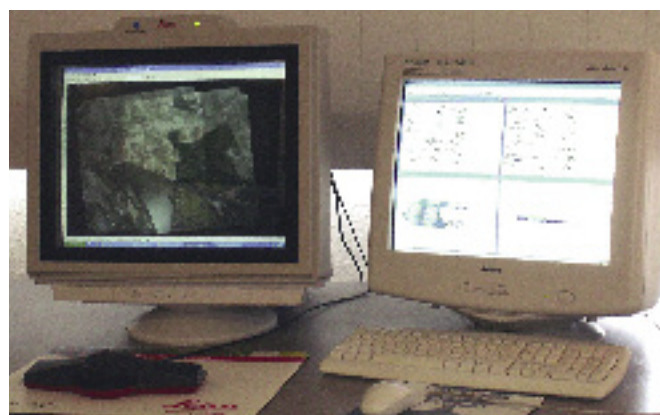
### ■ Les clés USB

A partir de 2001, apparaissent les clés USB (Universal Serial Bus), petit périphérique de stockage qui utilise une mémoire flash et un connecteur USB. Leur capacité n'a fait qu'augmenter. Aujourd'hui on atteint 250 Mo pour les modèles courants, mais on peut largement dépasser le Go. Ces clés sont le moyen le plus pratique pour les échanges de données entre portables ou micro-ordinateurs.

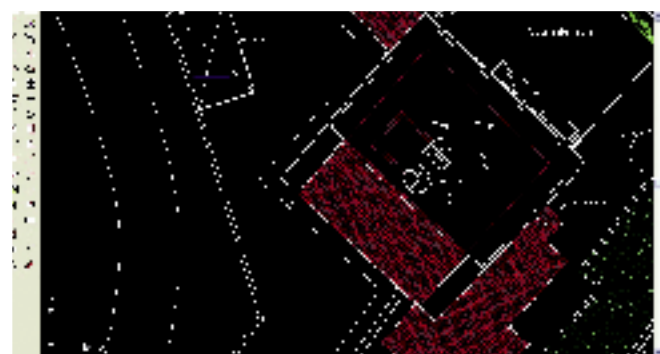
## Le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO)

En 1979, j'étais allé au Mexique, explorer l'une des plus grandes cavités mondiales connues, avec des spéléologues texans de l'Université d'Austin. J'avais participé avec eux à une séance de topographie. Si les levés souterrains se faisaient toujours d'une manière classique, les calculs et reports sur plan se faisaient déjà en mode informatique. Ils m'avaient exhibé des liasses de listings et des topographies faites sur table traçante où figuraient tous les vecteurs représentant la polygonale principale avec le numéro des stations. Quelques exceptions mises à part, nous n'en étions pas encore là en France ! Surtout chez des non-professionnels.

A partir de 1964 et dans les années 70, plusieurs précurseurs créèrent des programmes de dessin, mais ces programmes (JS Info, Image entre autres) se limitaient à des dessins simples (profils, parcellaires, semis de points avec chiffrage). Autocad (Autodesk) apparut, lui aussi sur MS/DOS, en 1982, mais c'était au départ un logiciel destiné aux ingénieurs en mécanique qui fut ensuite adapté aux besoins des topographes. Son succès tient au fait qu'il permet à l'utilisateur de créer ses propres menus et de développer des applications grâce au langage Autolisp. Il faudra attendre 1985 et l'apparition de windows 1 avec interface graphique et souris pour voir les logiciels de dessin exprimer toutes leurs possibilités. Je rappelle que sans Windows et la souris, on choisissait des options affichées à



Le dessin sur écran en photogrammétrie. L'étape de mise en place du couple photographique est en cours. Au cours de la restitution, le dessin en DAO sera fait sur l'écran de droite avec un logiciel Microstation.



Le logiciel Autocad, le plus utilisé par les géomètres et qui révolutionna leur travail.

l'écran en tapant leur numéro, puis on tapait les éléments de l'opération à réaliser ; cela était moins pratique que de cliquer sur une icône et de montrer un objet avec l'index de la souris. On trouve encore Microstation le mieux adapté au 3D, TopStation de JS Info, mais le plus utilisé par les topographes reste Autocad qui crée en 1990 3D Studio. Cependant, comme nous l'avons vu, Autocad conçu pour le dessin industriel, n'était pas utilisable directement en topographie, entre autre, pour le transfert des fichiers d'observations issus des stations totales, puis leur calcul. Il a donc fallu trouver des procédés annexes ou créer des applicatifs, dont les plus connus en France sont Covadis, apparu en 1987, puis Topogis et TopoLisp.

## Internet-ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line)

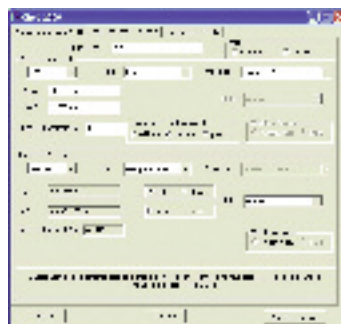
Cette application qui pourrait paraître hors sujet, ne l'est pas du tout, tant elle est utilisée par les topographes, aussi bien pour les transferts de fichiers vers un opérateur lointain que pour l'acquisition de données.

La société américaine Bell avait créé le premier modem permettant de transmettre des données binaires sur une ligne téléphonique en 1958. Les premiers topographes français ne l'utilisèrent pas avant la deuxième moitié des années 1980. Internet et Minitel font leur apparition en 1980. En 1981, 213 machines sont alors connectées sur Internet ! En 1983 on en était à 562, puis à 5 089 en 1986. Ce n'était pas la gloire. Il fallut attendre la deuxième moitié des années 90 pour voir son explosion en France et en Europe.

L'ADSL, transfert à haut débit, transmis par les lignes téléphoniques, mais indépendant des conversations téléphoniques se généralise en France à partir de 2001. Sa traduction française est : "Ligne d'abonné numérique à débit asymétrique" ou encore "liaison numérique à débit asymétrique". Le transport des données utilise une fréquence supérieure à celle d'un signal vocal. Les deux peuvent ainsi circuler simultanément sans interférer.

Il permet de transmettre très rapidement (quelques dizaines de seconde) de nombreuses informations : fichier d'un levé, logiciels, données nécessaires aux topographes telles que les fiches de nivellement ou de points géodésiques IGN.

Il faut noter que depuis 2003-2004, le transfert des données peut être fait par téléphone mobile. Cette technique est maintenant couramment utilisée par le GPS pour les échanges avec les stations permanentes.



**Le logiciel Circé qui permet les conversions de coordonnées. Produit par l'IGN, il peut être chargé par internet.**

## Accessoires annexes

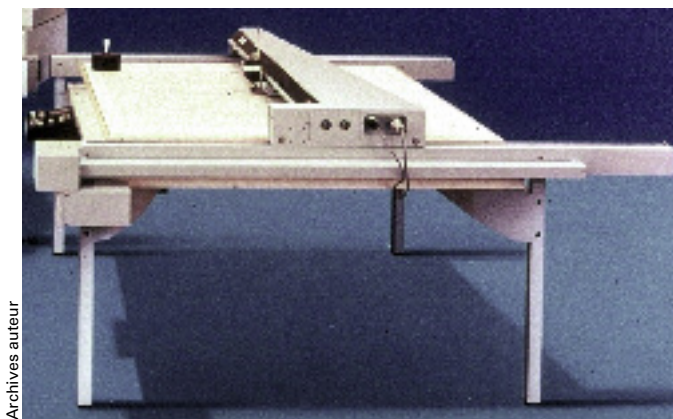
### Les traceurs (ou tables traçantes)

Ceux qui ont fait carrière à l'IGN se souviennent des coordinateurs associés aux appareils de restitution. Ils avaient fait leur apparition dès la fin de la guerre, avec les appareils de restitution Poivilliers. Reliés mécaniquement aux manivelles du restituteur, ils dessinaient à plat, sur une table latérale, les contours suivis par l'index sur l'image photogramétrique. En ce qui concerne l'IGN, bien qu'ayant encore servi à titre de contrôle au début de l'ère informatique, ces tables ont disparu depuis longtemps. Elles n'ont pas été remplacées par des tables traçantes, les films nécessaires à l'impression des cartes étant maintenant directement conçus à partir du DAO.

Par contre, devant fournir à leurs clients un plan sur support papier en peu d'exemplaires, les géomètres-experts, bureaux d'études, architectes utilisent obligatoirement des tables traçantes. Comme souvent, dans certaines techniques que nous avons abordées, la conception des tables traçantes démarra d'un usage militaire. Vers 1950, l'armée américaine encouragea la conception de traceurs analogiques dans le but de représenter graphiquement les images fugitives données par le radar.

Les premières tables traçantes connectées à un ordinateur apparurent en Europe vers 1963 : il y avait le français Labinal et l'allemand Zuse. Ces tables ne traçaient que point par point. Le cabinet Arragon, géomètre-expert à Solliès-Toucas (Var), précurseur en la matière, testa début 1964 le prototype BENSON 00 couplé à un ordinateur IBM 1130 à cartes perforées, d'une mémoire de 8 Ko ! Il n'y avait pas de programmes sur le marché et les deux informaticiens de ce cabinet en avaient créé un permettant de dessiner, bien que les écrans ne soient pas encore utilisés !

Le dessin fourni n'était pas aussi élaboré que maintenant, mais il permettait la représentation de parcellaires ou de profils. Les bornes étaient représentées par des petits ronds, les cotes périmétriques et numéros de points figuraient aussi.



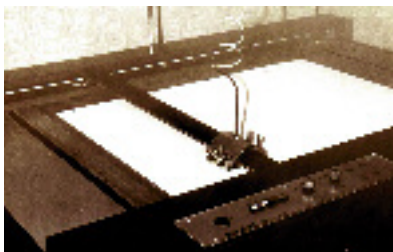
**Table traçante à plat associée à un restituteur vers 1975.**



Photo Doustaly



**La table traçante Benson 00 associée à un ordinateur IBM 1130. Remarquez la taille de l'ordinateur d'une capacité de 8 Ko ! Pas encore d'écran.**



**La table traçante à plat Benson 00 seule. Remarquer les plumes et le fil électrique en spire qui suit les mouvements de la plume.**

Ces tables traçaient à plat et se rapprochaient du coordinateur, avec un bras se déplaçant dans le sens des X et sur ce bras, une plume qui se déplaçait suivant le sens des Y. La BENSON 00 avait même quatre plumes pour changer de couleur ou d'épaisseur de trait. Les premières vitesses de traçage étaient de 2 cm/sec.

Les traceurs à rouleau apparurent vers 1968. Ces traceurs utilisaient encore des plumes et leur mode de traçage, dit "vectoriel langage graphique", comportait de nombreux aller-



**Table traçante moderne à jet d'encre, associée à un scanner situé au-dessus avec son écran de commande.**

retour en Y assurés par la rotation directe ou inverse du rouleau. Le traçage en X était assuré par la translation positive ou négative de la plume.

Tous les points, puis les lignes étaient tracés les uns après les autres, l'ordinateur transmettant à la table un  $\Delta X$  et un  $\Delta Y$  par rapport à un point origine. Le rouleau à picots entraînait le papier ou le calque, perforé sur ses deux bords, ce qui empêchait tout glissement et assurait une précision graphique de 1/10 de mm. BENSON, maintenant disparu, fut le pionnier de ce type de tables en France. Je n'ai malheureusement pas photographié la magnifique table de cette marque que j'utilisais avant son remplacement par une table à jet d'encre qui me coûta quatre fois moins cher !

Elles ont été remplacées par des tables à jet d'encre, plus légères, plus rapides, plus performantes et moins onéreuses, à partir des années 1990. Les informations envoyées par l'ordinateur sont traitées maintenant ligne par ligne, chaque point de la ligne étant représenté avec sa couleur propre. Par contre, il n'y a plus de rouleau à picots et la précision graphique en est diminuée. Benson, racheté par Océ, a maintenant disparu, on trouve encore Calcomp, mais Hewlett Packard est actuellement le leader de ce type de tables.

## *L'évolution de l'informatique vue à l'IGN*

En 1954, l'IGN acquiert l'ordinateur Gamma 3 de Bull, faisant figure de pionnier en équipement informatique. Cet ordinateur n'avait que 5 mémoires et ne pouvait recevoir que 48 ordres élémentaires. Le personnel affecté à cet ordinateur faisait figure de chercheur. Les données étaient transmises par cartes perforées, les calculs intermédiaires passaient aussi par ces cartes. Les résultats étaient perforés sur des cartes, ou imprimés sur des listings. L'ordinateur était tributaire d'un lourd matériel mécanographique, mais il épargnait les fastidieux calculs arithmétiques faits à la main.

En 1955, la normalisation et la résolution d'un système de 224 inconnues furent exécutées en un an !

1958 marque un progrès sérieux avec la multiplication matricielle et la résolution de systèmes linéaires qui correspondaient à des blocs de 10 à 15 points. En 1961 est faite l'acquisition du mini-ordinateur CAB500 produit par la SEA (Société française d'Electronique et d'Automatisme).

Pendant longtemps, l'ordinateur va être tributaire des machines électro-mécaniques annexes qui permettent la lecture des données et la transmission des ordres. Mais, bien que dépendant de ces périphériques extérieurs, il va être petit à petit capable d'effectuer de plus longs calculs et d'enregistrer des programmes de plus en plus importants.



**Un ordinateur à l'IGN dans les années 1970. L'ensemble est volumineux. Remarquez le carton de cartes perforées.**

A partir de 1973, l'IGN confie à la SETRA des travaux qui ne passent plus par les cartes perforées, mais par le support des bandes magnétiques. Bien que des essais aient été faits à partir de 1967, ce n'est qu'à cette date que l'IGN acquiert des ordinateurs enregistrant les données et les résultats sur bandes magnétiques. On peut penser aussi que ces nouveaux ordinateurs étaient dotés de systèmes d'exploitation permettant de faire tourner plusieurs programmes sur une même machine, ou de les intégrer.

L'IGN, qui avait été un pionnier en informatique, va un peu tarder à prendre le train de la micro-informatique ; ce n'est qu'en 1984 que sont acquis des micro-ordinateurs Logabax, dotés de lecteurs de disquettes 5 1/4. Grâce aux progrès foudroyant de l'informatique, les micro-ordinateurs vont bientôt remplacer les ordinateurs dans de nombreux calculs.



**Impressionnante salle des ordinateurs IGN, avec les nombreuses bandes magnétiques de stockage.**

Cependant, la sauvegarde des nombreuses données se fait sur un serveur central équipé de disques durs.

Mais, l'informatique ne touche pas que les calculs. Dès 1969, l'I.G. Masson d'Autume décide de créer une unité expérimentale de cartographie automatique. Mais, l'informatique n'avait pas encore atteint tous ses développements actuels et le temps de la gestation fut long. Après un essai réalisé en 1990 sur la carte de Montpellier, la première carte 1/25.000 entièrement numérique est commercialisée en septembre 1995, c'est la coupure d'Amplepuis (2930 ouest). Le temps de mettre en place les nouvelles chaînes et de former le personnel, il faudra attendre encore plusieurs années pour que la totalité des nouvelles cartes soit produite en tout numérique. Cependant, une intervention semi-manuelle est toujours nécessaire pour passer des saisies brutes à certaines contraintes induites par les signes conventionnels, entre autres. Les recherches d'automatisation complète continuent. Adieu les couches à graver et les anneaux...

Quant au compléteur de 2003, avec son GPS de poche et le micro-ordinateur portable qu'il utilise sur le terrain, il n'a plus rien à voir avec celui qui, en 1976, travailla avec sa planchette au complètement de la dernière coupure 1/25.000 de la carte de base de la France (avec les délais de rédaction et d'impression, elle fut publiée en 1980)!

Nous verrons plus loin l'incidence de l'informatique sur la restitution. ●

## Bibliographie

**DOUSTALY Robert, 1968, *Le dessin automatique dans la profession de géomètre-expert et son avenir*, opuscule photocopié.**

**FONTAINE André, 2000 *Contribution apportée par l'informatique à la géodésie*, Historique de l'IGN, édition intérieure non publiée.**



**Un ordinateur IRIS 80, à la fin des années 1970. Les résultats sont stockés sur bandes magnétiques, mais les cartes perforées, à gauche de l'opérateur, sont toujours employées pour le traitement des données. Les écrans ne permettent que de visualiser les instructions et résultats chiffrés. Pas de souris, les commandes se font au clavier.**





# L'AVENEMENT DES SATELLITES, LA GEODESIE SPATIALE, LE GPS

**A**près la seconde guerre mondiale, la rivalité entre Etats-Unis et URSS ne fut pas seulement politique, elle fut aussi technologique avec, entre autres, la mise en orbite des satellites artificiels.

Au cours de l'assemblée générale de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale qui se tenait à Toronto en septembre 1957, John O'KEEFE (USA) avait proposé la constitution d'un groupe de travail sur l'étude du mouvement des satellites artificiels que l'on s'apprêtait fiévreusement à lancer.

Dans la course au lancement, l'URSS allait "coiffer" les USA, avec la mise en orbite de Spoutnik, le 4 octobre 1957. Les USA allaient suivre le 1<sup>er</sup> février 1958 avec le satellite Explorer. Tout cela ouvrait un nouveau champ extraordinaire à la science. Dès 1958, l'US Navy concevait et réalisait le système TRANSIT pour le positionnement de ses sous-marins nucléaires.

La France s'intéressa dès le début à cette aventure spatiale et, en 1961, était créé le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). La même année, l'IGN commença ses études et ses premières déterminations de triangulation spatiale sur les

satellites Echo 1 et 2 récemment lancés par les Américains. Après avoir déployé des gros ballons, les satellites de basse altitude (800 à 1000 km) pouvaient être photographiés sur fond d'étoiles avec des chambres balistiques munies d'obturateurs à éclipses. Un comparateur spécial ZEISS permettait des mesures au micron sur les plaques photographiques. La synchronisation des mesures à partir de différentes stations était assurée au millième de seconde par des signaux horaires. Cette méthode servit à rattacher la France à l'Algérie en 1963, puis l'archipel des Açores à l'Afrique et à l'Europe, en 1965. La précision de cette dernière détermination fut d'un peu moins de 40 mètres.

Après 1967, cette méthode expérimentale, fut remplacée par la méthode Doppler qui utilisait la variation des fréquences émises par un corps en mouvement lors de leur réception par un récepteur fixe. L'IGN fit ses premières déterminations sur les satellites Diapason (D1A) et Diadème (D1C, D1D) mis en orbite par la fusée française Diamant à Hammaguir (Algérie) en 1966 et 67, puis sur le satellite Peole mis en orbite en décembre 1970 à Kourou. Ces déterminations Doppler

étaient couplées à des mesures de distance laser sur les satellites qui étaient munis de prismes en coin de cube. La lecture de *"Mesurer la terre"* de J.J. Levallois nous montre la complexité de ces mesures pour les chercheurs de l'époque.

Désireuse d'avoir les dimensions exactes de la terre et de déterminer les orbites rigoureuses des satellites, la communauté scientifique internationale coopéra sur plusieurs projets. Il y eut en premier lieu la mesure du réseau "Coast and Geodetic Survey" : après le lancement du satellite ballon Pageos par les Américains, une vaste campagne fut lancée à travers le monde. La France y participa par la mesure du 12<sup>e</sup> parallèle dans sa traversée de l'Afrique francophone. La mesure d'une longue polygonale avec des telluromètres et des géodimètres fut associée à de nombreuses orientations de Laplace et des observations de Pageos à la chambre balistique BC4 Wild.

Il y eut aussi le programme RCP 133, initié par le CNRS en 1967, avec la coopération de scientifiques étrangers, et qui se proposait d'établir une jonction Europe-Afrique-Amérique du Sud, en utilisant concurremment la triangulation spatiale et la télémétrie laser.

On peut encore parler du programme ISAGEX, initié en 1970 par le Centre National d'Études Spatiales avec le concours de

quatorze autres pays dont les USA. Il proposait une campagne d'observations coordonnées sur les sept satellites disponibles en vue d'apporter à la connaissance du champ terrestre et des autres paramètres géodésiques, une contribution significative.

Après 1967, la déclassification militaire du système TRANSIT allait permettre à la communauté scientifique internationale d'exploiter un système géodésique spatial en tout point du globe. Wild lança le premier récepteur commercial TRANSIT, le MX702CA en 1968.

En 1974, l'IGN faisait l'acquisition de six récepteurs Doppler JMR. La présence de 15 stations fixes réparties sur le globe et chargées de suivre les satellites permettait, désormais, la connaissance des orbites avec une précision métrique.

La méthode du "point isolé" alors expérimentée permettait une précision de 3 à 5 mètres. Elle fut complétée par la méthode des "arcs courts" qui ramenait cette précision à un mètre à une distance d'un millier de kilomètres. Cette méthode fut utilisée en Algérie (1976), en Libye (1977), en Jordanie (1982) où 14 points Doppler permirent de caler au mieux le réseau national de points géodésiques déterminé par triangulation et mesure électronique de distances.



Géodésie GPS du Yémen réalisée par l'IGN.

## Le GPS

C'est la grande révolution de la géodésie spatiale, aboutissement de tous les travaux entrepris précédemment. Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites conçu et mis en service par le Département de la Défense des USA. Il a été développé en vue du remplacement du système TRANSIT qui pêchait par une couverture en satellites insuffisante (5 en 1977) et une faible précision en navigation.

Le premier satellite fut lancé en 1978, à une altitude de 20 200 km permettant de faire le tour de la terre en douze heures sidérales. Il fallut attendre 1985 pour que le onzième satellite soit lancé et que le système soit déclaré "semi-opérationnel". Mais ce nombre insuffisant de satellites rendait de nombreuses périodes inobservables pour les déterminations de précision. Les moyens informatiques et électroniques



■ ■ ■ n'avaient pas atteint le développement actuel et les observations étaient plus longues et laborieuses. C'est en 1985 que l'IGN fait l'acquisition de son premier GPS, le TR5S, construit par le français SERCEL.

A partir de 1989 et jusqu'en 1993, tous les satellites du programme sont mis sur orbites : 28 au total dont 4 en réserve. En février 1994, le système est déclaré pleinement opérationnel, la visibilité simultanée de 4 à 8 satellites, avec une élévation d'au moins 15°, étant assurée en tout point du monde, au moins 23 heures sur 24. Les 24 satellites sont répartis sur six plans orbitaux ayant tous une inclinaison d'environ 55° sur le plan de l'équateur. La durée de vie de chaque satellite est au maximum de dix ans, ce qui nécessite des remplacements réguliers.

### Principe général du GPS

Les satellites sont suivis en permanence par cinq stations fixes au sol, réparties sur le monde, non loin de l'équateur. Ces cinq stations reçoivent en permanence les signaux émis par les satellites. Les éphémérides, paramètres d'horloge, corrections atmosphériques sont ainsi recalculés journalièrement pour être renvoyés aux satellites.

Un récepteur GPS reçoit les signaux émis par les satellites. L'horloge atomique des satellites et l'horloge du récepteur permettent de mesurer le temps de parcours des signaux. La détermination de ce temps permet de déduire les distances



**GPS 300 : Un bifrèquence Leica série 300 acquis en 1995.** On laissait le récepteur fixe soit sur un point connu à l'écart des passages, soit sur un toit-terrasse, ou dans un terrain clos pour éviter le vol et la manipulation par un passant. Le récepteur mobile (rover) se déplaçait sur les points à déterminer ou d'autres points connus de calage. Les calculs étaient faits en post-traitement, ce qui ne garantissait pas une fiabilité à 100 % des points observés. Pour les constructeurs, 95 % était la fiabilité à atteindre. Sur la photo, le récepteur est joint par un fil au "contrôleur" qui sert à introduire les paramètres du chantier et à commander les mesures.

entre ces satellites et le récepteur. A chaque instant  $t$ , la position des satellites étant parfaitement connue, les distances mesurées (pseudo-distances) permettent de calculer la position du récepteur GPS.

De manière très simplifiée, après les différents prétraitements d'amplification, de filtrage, de conversion analogique-numérique des signaux, les temps de parcours sont mesurés au niveau du récepteur par des corrélateurs. Ces corrélateurs déterminent pour chaque satellite le décalage entre le code ou la phase au moment de leur réception et ceux identiques générés par le récepteur.

De nos explications précédentes, on peut déduire que géométriquement, la position d'un satellite étant connue à un instant  $t$ , le récepteur GPS se trouve à cet instant sur une sphère dont le centre est ce satellite et le rayon la distance calculée. Trois satellites seraient donc nécessaires pour obtenir un point déterminé par l'intersection de trois sphères. En réalité, la résolution du décalage entre l'horloge satellite et celle du récepteur nécessite un quatrième satellite. Les satellites supplémentaires permettant d'affiner la mesure.

### ■ Monofréquence et bifrèquence

Chaque satellite émet en continu, sur deux canaux différents, deux fréquences porteuses :

- L1 à 1575,42 MHz (longueur d'onde proche de 19 cm)
- L2 à 1227,60 MHz (longueur d'onde proche de 24,4 cm)

Ce sont des multiples par 154 et 120 de la fréquence 10,23 MHz de l'oscillateur atomique du satellite. Le récepteur reçoit chaque signal satellite sur un canal différent.

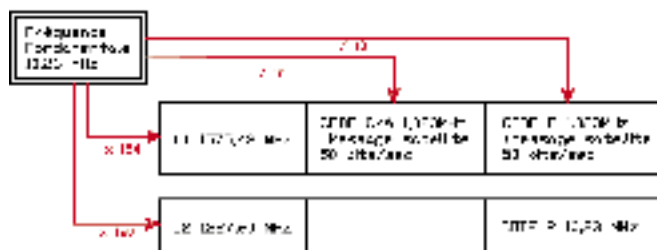
Ces fréquences porteuses sont ensuite modulées en phase par des codes pseudo-aléatoires propres à chaque satellite :

- Le code C/A (coarse acquisition), de fréquence 1,023 MHz modulé seulement sur la fréquence L1.
- Le code P (Precise), de fréquence 10.23 MHz module les fréquences L1 et L2. Ce code est aussi crypté en code Y pour les besoins de l'armée américaine ou des utilisateurs autorisés.

De plus, un message de 50 Hz, qui donne les données concernant l'orbite du satellite, les corrections d'horloge, corrections ionosphériques et éphémérides, se superpose aux codes C/A et P.

Deux types de récepteurs ont alors été conçus :

- **Le Monofréquence** qui a l'immense avantage de coûter 2 à 5 fois moins cher que le bifrèquence (Thalès en commercialise à 5800 € HT la paire en 2005). Il peut donc être intéressant en fonction des structures et des types de travaux de



Structure des signaux GPS.



**GPS de poche : 120 grammes, 200 euros, moins de deux minutes pour obtenir la position d'un point avec une précision de 5 mètres ! Pour celui qui a fait autrefois de l'astronomie de position pour trouver son chemin dans le Sahara, c'est à chaque mesure un émerveillement renouvelé...**

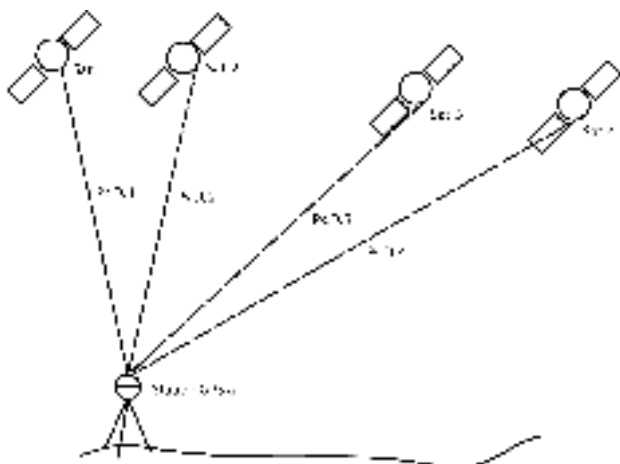
l'entreprise. Mais, évidemment, il est moins performant que le bifrèquence.

Tout d'abord, l'absence de L2 ne lui permet pas d'éliminer l'erreur ionosphérique, ni de résoudre l'ambiguïté de phase aussi rapidement qu'un bifrèquence. De ce fait, la durée des observations est beaucoup plus longue et on ne peut avoir les mêmes longueurs de base : au maximum 10 à 15 km en zone tempérée et 5 km quand on se rapproche du pôle ou de l'équateur. Au pôle, l'effet ionosphérique étant plus fort et à l'équateur les effets de rotation de la terre prenant plus d'importance.

- **Le bifrèquence**, dont la combinaison de L1 et L2 permet d'éliminer l'erreur ionosphérique et de résoudre plus facilement l'ambiguïté, est beaucoup plus performant. Mais, évidemment, il coûte plus cher.

## ■ Positionnement absolu, positionnement différentiel

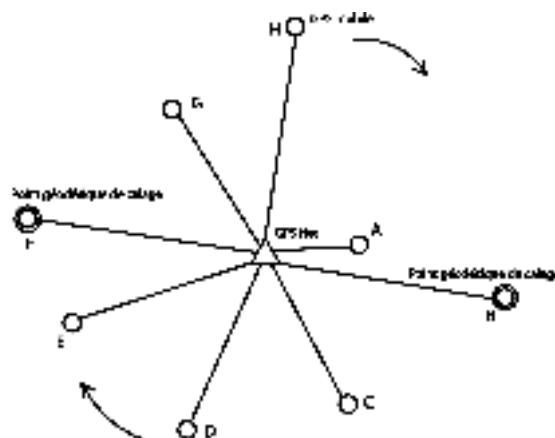
- Le positionnement absolu est celui déterminé par un seul récepteur indépendant recevant les signaux émis par les satellites. Le récepteur encaisse alors toutes les erreurs du



Le positionnement absolu est celui déterminé par un seul récepteur indépendant et captant un minimum de quatre satellites, trois pour le positionnement géométrique et un quatrième pour résoudre le biais entre l'horloge récepteur et celle des satellites.

système, en particulier les erreurs atmosphériques et troposphériques. De plus, jusqu'à 2001, le système GPS créait des dégradations sur la fréquence de l'horloge des satellites ou sur les éléments du message radiodiffusé pour en limiter l'utilisation par les civils. De ce fait, après deux ou trois heures d'observation, un GPS de précision ne donnait la position qu'à une vingtaine de mètres près. Quant au GPS de poche sa précision était de 50 à 100 mètres. En janvier 2001, la suppression de ces dégradations permet d'atteindre une précision de 2 mètres sur un GPS de précision et de 5 mètres sur un GPS de poche.

- C'est en mode différentiel, c'est-à-dire avec un récepteur fixe et un récepteur mobile, que le GPS donne toute la mesure de ses possibilités extraordinaires. En 1995, en post-traitement, à dix kilomètres on obtient une précision centimétrique sur la position relative du poste fixe et du poste itinérant après 15 minutes d'observation. Il suffit ensuite de placer le récepteur itinérant sur des points connus pour caler la figure sur un réseau existant. Adieu géodésie traditionnelle ! Ce qui paraît normal aux jeunes générations semble inouï à ceux



La figure du statique rapide illustre le fonctionnement du différentiel. Les vecteurs joignant le poste fixe (au centre) avec les diverses positions du GPS itinérant (rover) ont une précision centimétrique. Quand cette figure est calculée, il suffit de la caler sur les points connus observés par translation et éventuellement rotation.



- ■ ■ qui se sont échinés durant de longues soirées de tours d'horizon derrière un théodolite, puis qui ont eu à mettre en forme les observations et faire tous les calculs...

Cependant, la merveille et la précision ont leur prix. En 1995, une paire de bons bifréquences, nécessaire à un travail en différentiel, valait 400.000 francs, soit 75.000 euros d'aujourd'hui en tenant compte de l'érosion monétaire. Les prix ont baissé, mais pas de manière significative (-30 % environ) et le GPS de précision n'est pas encore à la portée de tous les géomètres et des petites structures. Je ne parle pas ici des GPS de poche, évidemment !

### ■ Le format Rinex

Ce format a été créé en 1989. C'est un format standard qui permet de travailler avec des GPS de marques différentes. Principalement lorsqu'on veut travailler avec une station de référence permanente (voir le paragraphe : *Les stations permanentes, le VRS*).

## Evolution du GPS

La technologie avance à pas de géants, elle s'emballe, les innovations n'arrêtent pas. En 1995, la carte mémoire d'un bifréquence Leica n'était que de 1 Mo. Elle ne permettait que 8 heures d'observation avec une fréquence de mesures de 10 secondes et 1 h 15 avec une fréquence de 1 seconde. Si une détermination à 1 km du poste fixe demandait moins de 5 minutes en post-traitement, il fallait 10 à 15 minutes à 10 km, 20 à 30 minutes à 20 km.

Aujourd'hui, la capacité des cartes mémoire a été multipliée par 100 ou plus. On trouve des cartes compact flash à 64, 256 Mo et même 1 Go. En cinématique, cela permet de travailler en permanence avec des fréquences inférieures à la seconde. Les algorithmes de calcul ont progressé, l'estimation des modèles atmosphériques aussi. On peut donc dépasser les 20 km qui étaient une limite pour les mesures courantes et leur logiciel de traitement en 1995. Les futurs satellites GPS et l'arrivée de GALILEO en 2010 laissent entrevoir de nouveaux progrès.

Nous rappelons la technique Bluetooth déjà mentionnée à la fin du chapitre sur les stations totales et qui, à partir de 2002 permet de s'affranchir des innombrables fils joignant les appareils électroniques.

### ■ Le GPS cinématique

La technique AROF (Ambiguity Resolution On the Fly) ou de résolution des ambiguïtés en vol, permet depuis 1995 d'enregistrer un mouvement en continu. Ses principales applications se sont faites dans le temps réel cinématique et dans le déplacement des véhicules. Elle avait été précédée par la méthode STOP and GO qui permettait, après initialisation du GPS mobile, de se déplacer et d'enregistrer des points après un arrêt de deux périodes (10 secondes si on avait fixé cette période à 5 secondes). Cette méthode STOP and GO permettait de faire des relevés topographiques dans les zones dégagées.



**GPS de construction chinoise, lors d'une intervention de l'auteur en Chine en 2003. Le récepteur et le contrôleur sont réunis en un seul élément. Les calculs se faisaient en post-traitement. La méthode comportait 3 GPS : 2 récepteurs en 2 points connus et un récepteur itinérant. Le schéma de calcul était en triangle et non en étoile. Le coût de ces appareils était entre 5 et 10 fois inférieur qu'en Europe...**

### ■ Temps réel, temps réel cinématique (Appelé RTK ou Real Time Kinematic en anglais)

Bien qu'il soit apparu en 1993-1994 aux Etats-Unis (Trimble) et qu'il ait suivi peu de temps après dans d'autres pays, l'utilisation du temps réel en France, freinée par la législation des télécommunications, ne s'est généralisée que début 1997. Alors que précédemment, les calculs se faisaient en post-traitement, une liaison radio entre le poste fixe placé sur un point connu et le poste mobile permet maintenant d'avoir directement sur le terrain les coordonnées de ce poste mobile.

En effet, les coordonnées du point de référence (GPS fixe) et celles des satellites étant connues à tout instant, on en déduit les distances géométriques correspondantes. La résolution des pseudo-distances permet d'estimer rapidement le décalage d'horloge de la référence et d'élaborer en permanence des termes de correction des satellites visibles. Ces corrections sont transmises à la station itinérante qui les ajoute à ses mesures directes de pseudo-distance et peut calculer sa position sur place après un temps d'initialisation de quelques minutes. L'initialisation faite, grâce à la technique AROF, on peut travailler en cinématique et ainsi faire des implantations à partir d'un fichier de points. Seul impératif : une liaison radio en VHF entre le fixe et l'itinérant, ce qui n'était pas toujours possible en région accidentée ou encaissée.

### ■ Le GPS submétrique

Avec les Systèmes d'Information Géographique, le GPS submétrique fait son apparition vers 1997-98. D'un coût moindre, il a une précision de quelques décimètres à un mètre. Mais il nécessite un système différentiel, obtenu soit avec un GPS

fixe et un mobile, soit par une liaison avec une station permanente. C'est le cas du système en temps réel submétrique RACAL. Un satellite géostationnaire sert de relais entre un ou plusieurs postes fixes et le poste mobile "client" qui peut être associé à un PC portable.

### ■ Les stations permanentes, le VRS (Virtual Reference Station) et le FKP (Flächen Korrektur Parameter)

Depuis longtemps, on pouvait se servir de stations permanentes fixes qui recevaient les signaux satellitaires en continu. Un seul récepteur mobile était alors nécessaire et l'on calculait les points en post-traitement, 24 ou 48 heures plus tard, après avoir reçu les données de la station permanente en format Rinex compressé. Le seul problème est qu'on ne pouvait guère travailler à plus de 20 km de la station de référence avec un bifrèquence.

Les stations permanentes se sont multipliées et depuis 2003 a été mis au point le "mode cinématique multistations de référence" qui exploite les données de plusieurs stations de référence réparties en réseau. On peut conserver la précision centimétrique en temps réel avec des stations distantes les unes des autres de 70 à 100 km. Ceci grâce à l'analyse des erreurs d'observation aux différentes stations du réseau, analyse mise à profit par l'utilisateur. Ce système présente une grande fiabilité du fait de la redondance des stations de référence et il peut générer un temps d'initialisation plus court. En 2005, la France est couverte partiellement par une cin-



**Un bifrèquence de la nouvelle génération, le Leica 1200. Il est évidemment équipé pour les liaisons radios nécessaires au temps réel. Le VRS arrivera avec le réseau Teria... Sur la photo, l'appareil fixe et le mobile (Rover) monté sur sa canne. Pour des raisons d'économie, il n'y a plus qu'un seul contrôleur, placé sur le poste fixe pour initialiser le chantier, il est ensuite placé sur le poste itinérant.**

quantaine de stations créées par l'IGN ou les collectivités locales. Dans la région de Toulon Marseille, bien encadrée, on peut actuellement travailler avec un récepteur unique, mais en faisant les calculs en post-traitement, dès le retour au bureau après s'être branché sur Internet. On peut ainsi travailler avec 4 ou 5 stations permanentes situées à 50 km ou plus. Le réseau Teria prévu en 2008 par l'Ordre des Géomètres-Experts devrait couvrir toute la France en complétant le nombre des stations existantes pour atteindre une centaine. Il permettra, si l'on est abonné, de travailler en temps réel avec un seul récepteur.

En 2004, deux techniques avaient été mises au point :

- Le VRS (Virtual Reference Station), qui utilise une communication bidirectionnelle entre le GPS mobile et le réseau des stations permanentes distantes de moins de 70 km. Ces communications sont assurées depuis 2003 par le téléphone portable fonctionnant en GSM (Global System for Mobile), ou GPRS (General Packet Radio Service) lequel permet un débit trois fois plus important, ou encore, CDMA (Code Division Multiple Access). Seule réserve à cette merveille, les portables ne sont pas utilisables partout ! Si en France, les réseaux de mobiles couvrent 98 % de la population, ils ne couvrent que 50 % du territoire...

A partir de la position approchée fournie par le GPS mobile, le réseau permanent génère une station virtuelle proche du récepteur et calcule les correctifs locaux, comme le ferait une station fixe traditionnelle située à peu de distance de la zone de travail. Ces correctifs sont renvoyés au récepteur et sont spécifiques à ce récepteur. La majorité de la charge de calcul est donc assurée par le réseau permanent au profit de chaque récepteur GPS mobile (client).

- Le système FKP (Sigle allemand Flächen Korrektur Parameter), différemment du précédent, est unidirectionnel. Les corrections sont valables pour une zone donnée et le récepteur GPS n'a pas à fournir sa position au réseau pour obtenir des corrections. Celles-ci sont émises par le réseau et la majorité de la charge de calcul est assurée par le récepteur GPS mobile.

Le grand atout du VRS réside dans la maîtrise de l'ensemble des calculs par le serveur, alors que les corrections transmises par le FKP peuvent être utilisées par le récepteur mobile avec une modélisation différente. Des réseaux mixtes prennent les avantages des deux systèmes.

### Les autres systèmes de géodésie spatiale

- Le GLONASS (GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema). C'est le système russe. Il comprend 3 plans orbitaux inclinés sur l'équateur de 64°,8 et sur chacun desquels 8 satellites tournent à une altitude de 19200 km. Cinq stations au sol suivent les satellites. Le premier satellite fut lancé en 1982, la constellation de 24 satellites était mise en place en 1993. Mais ces satellites n'ayant qu'une durée de vie de deux à trois ans, du fait des problèmes économiques de la Russie, il n'y en avait plus que 12 en 1995, période à partir de laquelle le système n'est plus que semi-opérationnel. Actuellement, une mise à niveau est en cours avec l'Inde, en utilisant des satellites plus





performants, d'une durée de vie de sept à huit ans. Le premier a été lancé en décembre 2004. Cependant, la Russie étant intéressée par une coopération au projet Galileo, Glonass pourrait être abandonné dans un futur proche (après 2010). Glonass utilise le système géodésique russe PZ 90, différent du WGS 84, ce qui pose des problèmes de transformation. De plus, comme le GPS à ses débuts, des dégradations sont créées sur les signaux, ce qui limite la précision à 50 m en mode absolu. Les militaires russes ont accès à un code Y précis. Certains constructeurs commercialisent des récepteurs qui peuvent utiliser le GPS et GLOSNASS, c'est le cas du Trimble R8 GNSS.

– Le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service). Ce programme lancé par l'Agence spatiale européenne en 1988 est opérationnel depuis le 25 juin 2005. Mais, actuellement en cours de certification, il ne sera accessible aux usagers qu'en 2007. Il comprend un réseau de 30 stations qui analysent les signaux des satellites GPS pour générer des corrections différentielles sur l'Europe. Trois satellites géostationnaires servent de relais pour ces corrections. En temps réel, un monofréquence peut atteindre une précision de 2 m à 95 %.

– Le système GNSS (Global Navigation Satellite System) c'est l'éventuel futur système de navigation mondiale. La première version utilise actuellement GPS et Glonass.

– GALILEO. C'est le futur système, strictement civil, supervisé par l'Union européenne et l'Agence Spatiale Européenne (ASE ou ESA en anglais). Il comportera 30 satellites (27 opérationnels + 3 en réserve), répartis sur trois orbites elliptiques présentant chacune une inclinaison de 56° par rapport à l'équateur et un demi-grand axe de 23616 kilomètres, la période des satellites étant de 14h22mn. Outre les horloges atomiques et les émetteurs-récepteurs, les satellites, d'un poids de 700 kg, seront munis de panneaux solaires de 1500 watts.

Galileo prévoit l'utilisation de quatre bandes de fréquence, dont deux seront partagées avec le GPS, grâce à l'accord conclu avec les Etats-Unis le 22 juin 2004. Un récepteur combiné Galileo-GPS sera en mesure de poursuivre entre 11 et 20 satellites en toute heure et en tout lieu de la planète. Cette caractéristique devrait permettre une meilleure utilisation en mode urbain.

La méthode RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) permettra de détecter d'éventuelles anomalies par comparaison de la qualité des données en provenance des divers satellites suivis. Ce qui améliorera grandement le niveau de fiabilité.

Le fait de disposer de quatre porteuses permettra d'obtenir un point de précision centimétrique en une seconde !

Galileo devrait fournir cinq types de service :

- Un service ouvert gratuit et sans restriction d'accès.
- Un service sûreté de vie
- Un service commercial
- Un service public réglementé
- Un service recherche et sauvetage.

Le 28 décembre 2005, le satellite expérimental Giove-A, destiné à tester un certain nombre de technologies pendant deux ans, a été lancé de la base de Baïkonour (Kazakhstan) par une fusée Soyouz-Fregat. Mais, la mise en place du programme final a pris du retard du fait des divergences des états européens sur le plan politique, pour le financement du projet et l'attribution des marchés. Un tiers du financement devrait être public et les deux-tiers privés.

Le 23 novembre 2007, les États membres de l'Union européenne se mettent d'accord sur le financement public du programme et les 2,7 milliards d'euros nécessaires. Un autre accord, conclu le 29 novembre 2007, permet de résoudre des différends entre pays participants sur l'attribution des appels d'offres. Cinq autres pays, la Chine, l'Inde, Israël, le Maroc et l'Ukraine, se sont associés au programme. Suite à ces accords, le second satellite expérimental devrait être lancé en 2008.

Après 2010, quatre satellites servant à valider les performances en vol (phase IOV pour *In Orbit Validation*), devraient être opérationnels. Le lancement et le déploiement des 26 satellites restants devraient être terminés et le système être opérationnel, début 2013.

– CNSS (Compass Navigation Satellite System). L'arrivée de la Chine se profile avec le lancement de satellites tests qui annoncent le système CNSS ou "BeiDou" qui devrait être en mesure de fournir un système de navigation et de positionnement en 2010.

## LE GPS à l'IGN

Comme vu précédemment, l'IGN fut l'un des pionniers en matière de Géodésie spatiale. Les GPS furent acquis dès le début, en 1985, pour la création du RRF (Réseau de Référence Français) et du RBF (Réseau de Base Français) appelés à remplacer la NTF, réseau géodésique terrestre moins précis et moins cohérent qu'un réseau géodésique spatial. Les observations des 23 points du RRF furent terminées en 1993, celles du millier de points du RBF en 1995. Les répertoires du nouveau réseau furent mis à la disposition du public à partir de 1997. Parallèlement aux travaux de terrain, le GPS est utilisé lors des prises de vue aériennes pour guider le pilote au bon recouvrement des bandes. Il est aussi essayé à partir de 1992

pour déterminer la position des centres de prises de vues aériennes, lors des missions photo. Cette nouvelle méthode permet de limiter la stéréopréparation sur le terrain, un petit nombre de points suffisant pour le calage de l'aérotriangulation et le contrôle.

Avec le modèle numérique du géoïde en France mis au point par Henri Duquenne et le remplacement de la NTF par le RBF, la précision altimétrique du GPS a fait un bond en avant. A tel point, qu'en adoptant une technique adéquate on peut atteindre une précision centimétrique et depuis 2002 le réseau de points de nivellement français est entretenu par le procédé NIVAG combinant GPS et nivellement classique.

## Le GPS en topographie

Les constructeurs ont longtemps entretenu une ambiguïté qui n'est pas encore totalement résolue à mon sens. C'est celle de l'emploi du GPS en lever topographique.

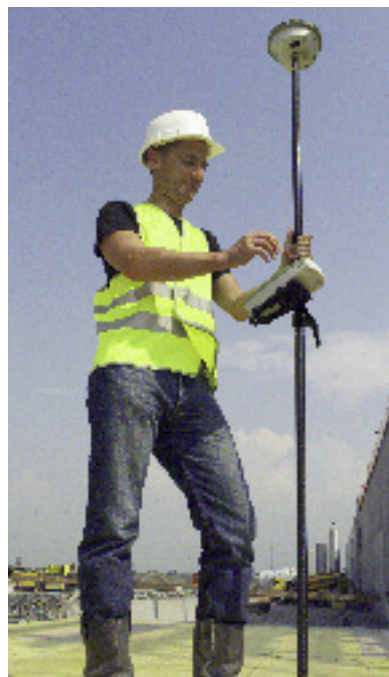


Photo Leica



**GPS Smart de Leica. Le GPS est placé sur le théodolite auquel il transmet sa position. Le lever sera orienté à la station suivante, lorsque le GPS en aura déterminé les coordonnées et que le théodolite aura fait la visée inverse. A gauche, implantation d'un point sur un chantier.**

En 1995, avec la méthode STOP and GO, j'avais fait un essai de lever en zone très dégagée. Cet essai s'était révélé très concluant. J'avais fait un second essai dans une zone située près d'une rivière bordée de grands peupliers. Bien que la majeure partie de la zone soit dégagée, le résultat avait été désastreux, d'autant plus que les arbres étaient vers le sud !

Aujourd'hui, LEICA a lancé son système SMART, dans lequel un GPS coiffe la station totale à laquelle il est associé. La démonstration que j'ai vue s'est montrée très astucieuse et séduisante. Mais, elle était faite dans une zone d'immeubles bas avec des espaces dégagés. Le résultat serait certainement moins bon en zone urbaine avec des immeubles plus hauts. On ne peut donc assurer que la méthode soit fiable avec la probabilité de 95 % chère aux constructeurs ! De plus, bien que les constructeurs aient fait un effort, l'acquisition d'un matériel matériel coûteux : antenne GPS et station totale adaptée, donne à réfléchir malgré son intérêt. En France, la mise en service du réseau Teria donnera plus d'intérêt à cet investissement.

Quant à TRIMBLE, sa démarche est différente, le GPS n'est pas sur le théodolite, mais sur la canne déplacée par l'opérateur pour la mesure de tous les points à lever. Cette méthode évite le problème de l'orientation et le calage du lever sur un grand nombre de points assure une meilleure cohérence. Leica a repris le même principe avec SMART rover. Mais, la même réserve que pour LEICA doit être faite en milieu urbain et en terme d'investissement.

Par contre, il est certain que l'avènement de Galileo amènera de grandes améliorations dans la fiabilité et dans la généralisation des levés au GPS.

## Interférométrie radar satellitaire de précision (IRSP)

L'interférométrie est connue depuis longtemps et, dès 1868, Hippolyte Fizeau envisagea son utilisation pour mesurer le diamètre des étoiles. L'idée fut reprise par Michelson qui, en 1891 puis 1921 mesura le diamètre de plusieurs astres. Mais, la difficulté de réalisation laissa la technique en hibernation jusqu'aux années 1970 où elle ressortit en force dans l'astronomie, puis avec l'interférométrie laser principalement utilisée en topométrie industrielle ou de laboratoire.

Quant à l'IRSP, elle fut mise en œuvre à partir de 1992 avec le lancement des deux satellites ERS1 et ERS2 de l'Agence Spatiale Européenne. Elle a pour objet, non pas la localisation, mais la déformation de structures bien déterminées, le sol en particulier. A partir de séries de tirs radars étalés sur de longues périodes et effectués conjointement à partir de ces deux satellites, on peut obtenir des précisions de quelques dixièmes de millimètre. Les déformations de l'écorce terrestre peuvent être calculées avec une précision qui laisse rêveur. Mais, de multiples autres applications en découlent. Bien que les mesures puissent se faire sans réflecteurs, il est évident

que des précisions inférieures au millimètre nécessitent l'utilisation de cibles stables et bien définies.

### Bibliographie

**LEVALLOIS J.J., 1988, Mesurer la terre,** (Chap. XVI, Géodésie spatiale, les premiers pas), A.F.T.-Paris

**BOUCHER Claude, 1988,** chap. XVII de l'ouvrage précédent : *La géodésie spatiale en France depuis 1971.*

**BOTTON S., DUQUENNE F., EGELS Y., EVEN M., WILLIS P., 1995,** *GPS localisation et navigation*, Hermès-Paris

**TECHNOLOGIE § PLUS,** Edition 2-2003 (lettre d'information Trimble) - Galileo.

**DUQUENNE Fr., BOTTON S., PEYRET F., BETAÏLE D., WILLIS P., 2005,** *GPS*, Lavoisier-Paris.

**PUGH Nathan, THOMPSON Carl, WALLACE Daniel, 2005,** *Naviguer dans le monde sans fil*, XYZ n°104







# LA PHOTOGRAMMETRIE

**O**n attribue la paternité de la photogrammétrie au capitaine Laussedat qui, en 1859 avait émis l'idée d'une cartographie à partir des photographies aériennes prises d'une montgolfière par Nadar. Il avait aussi émis le principe d'un photo-théodolite pour la photogrammétrie terrestre. Les débuts de la photogrammétrie dans cette seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle et au début du XX<sup>e</sup> sont bien décrits à la fin du tome II de l'ouvrage de Jean Hurault (voir bibliographie). Mais, elle connut ses développements décisifs entre les deux guerres, bien avant les percées technologiques des dernières décades.

Cependant, depuis les années 1970, elle a bénéficié de ces percées, en particulier de l'avènement de l'informatique, et a subi les évolutions très importantes qui en découlaient. Il n'y a plus aucun rapport entre le montage d'un couple stéréoscopique sur un écran de PC en 2003 et ce qui se faisait en 1970 sur les encombrants appareils de restitution opto-mécaniques. Le dessin de la carte ou du plan, qui se faisait alors par l'intermédiaire d'une liaison mécanique entre l'appareil de restitution et la table de dessin elle-même mécanique, n'a plus rien à voir avec la numérisation et les logiciels de DAO actuels, associés aux systèmes de restitution.

## *Stéréopréparation et aérotriangulation*

Après la prise de vue aérienne, l'équipement des photographies aériennes en points de calage nécessaires à la mise en place des couples avant leur restitution a complètement changé. Son allègement par l'aérotriangulation avait été envisagé depuis longtemps. L'IGN s'était penché sur le problème dès 1950 et avait mis au point des procédés d'aérocheminement employés à partir de 1952 dans la réalisation de cartes à petite échelle de territoires d'outre-mer. Mais la méthode qui supposait des simplifications, telle l'altitude constante de l'avion manquait encore de précision pour être employée à grande échelle. On employait aussi des méthodes mécaniques telle que la TPFR (Triangulation Par Fentes Radiales) ou la compensation mécanique du réseau altimétrique. En 1956, Paul Herget de l'Ohio State Université, puis à la fin des années 1950, G.H. Schut au Canada avaient développé des systèmes analytiques pour tenter d'y parvenir.

L'apparition de l'informatique amena les progrès décisifs. A l'IGN, Georges Masson d'Autume, puis André Créhange travaillèrent sur un programme qui aboutit en 1964 et fut utilisé dans un premier temps sur la cartographie Outre-Mer. Il fut employé plus tard en France.

En 1968, en France, la restitution de chaque couple demandait la détermination sur le terrain de deux points de mise à l'échelle XYZ, plus quatre points en Z. En 1981, lors de la stéréopréparation en vue de la cartographie 1:25.000 de la Province d'Irbid, en Jordanie, on ne demandait plus qu'un ou deux points XYZ en extrémité de chaque bande et un point en Z toutes les six photos. Aujourd'hui, la centrale inertielle et le GPS embarqué permettent de déterminer la position et l'orientation de la chambre de prise de vue au moment de cette prise de vue. Aussi, la densité de points terrains nécessaire a encore diminué. Il faut ajouter que la détermination de ces points est facilitée par l'emploi du GPS.

Toujours grâce au GPS, et à l'aérotriangulation, toutes les anciennes techniques qui permettaient le calage des missions photos pour les cartes 1/200.000 réalisées par l'IGN outre-mer : astronomie de position, TPFR (Triangulation Par Fentes Radiales), APR (Air Profiles Records), nivellement barométrique sont passées à la trappe ! Il faut dire aussi que de nombreuses cartes à petite échelle sont maintenant réalisées à partir des images satellite souvent géoréférencées.

# Restitution

## ■ Les restituteurs analogiques

En 1970, les ateliers de l'IGN comportaient d'impressionnantes rangées de restituteurs Poivilliers. On était frappé par la lourdeur de tous les dispositifs nécessaires à la reconstitution des faisceaux perspectifs des prises de vue, puis à la transmission des mouvements de l'index parcourant les photos jusqu'à la table traçante accolée. De par leur principe, ces restituteurs étaient dits analogiques.

Ils étaient de deux types. Dans les appareils à observation superficielle des clichés, les faisceaux perspectifs étaient réalisés mécaniquement au moyen de deux tiges métalliques coulissant chacun dans une articulation qui reconstituait le point nodal arrière de chaque prise de vue par rapport aux clichés. A l'autre extrémité de la tige, deux microscopes se déplaçaient parallèlement au cliché. Les images vues dans les deux microscopes étant alors renvoyées vers un binoculaire, où leur fusion permettait la vision en relief. C'était le cas du Poivilliers D ou du Wild A 6, remplacé après 1952 par le Wild A 8.

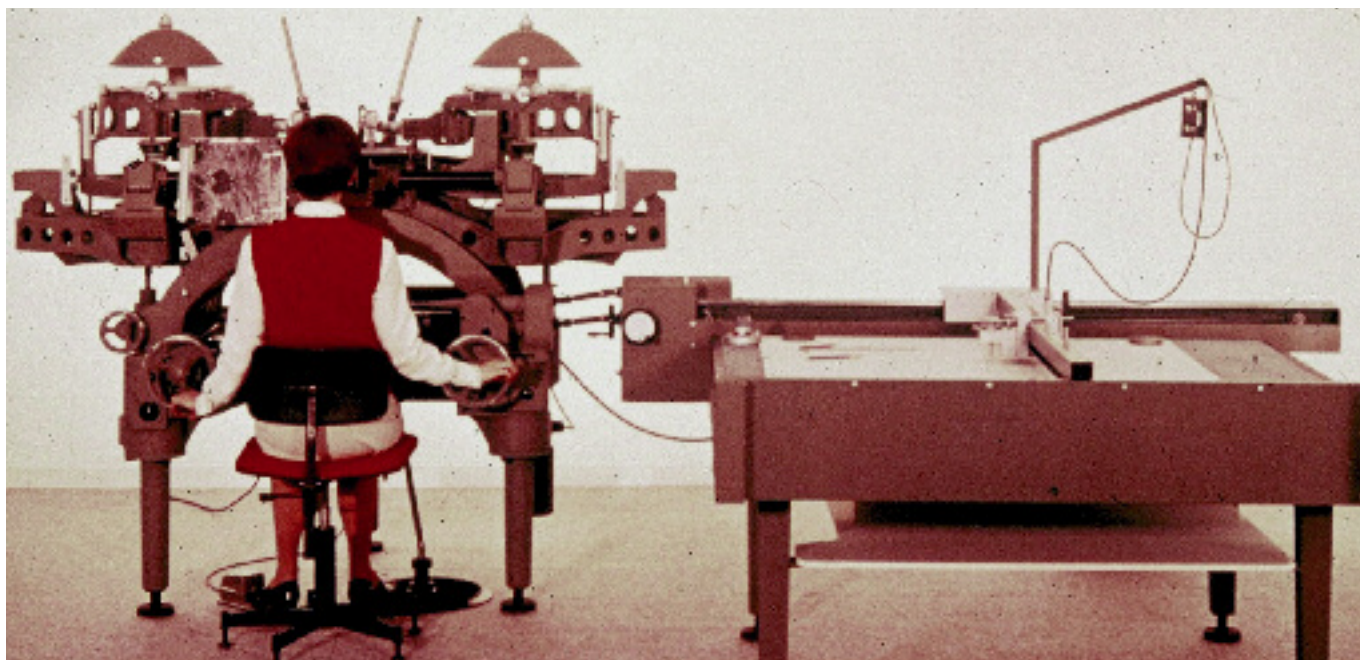
Dans les appareils à observation goniométrique, les faisceaux perspectifs étaient reconstitués par un dispositif optique, dont la réalisation était rendue complexe par le recours à de nombreux organes mécaniques. Mais la précision était meilleure que dans le dispositif purement mécanique précédent. C'était le cas du Poivilliers B. Il faut aussi citer les remarquables Planimat de Zeiss et A8 de Wild et aussi le Presa qui équipèrent plusieurs ateliers IGN à partir de 1970.

Dans ces deux types d'appareils, les mouvements de l'index visible dans le binoculaire et destiné à "filer" les éléments à restituer, étaient commandés par deux manivelles en X et Y et par un pédalier en Z. Une liaison mécanique par arbres et engrenages se faisait avec une table traçante à plat (coordinatographe) située à proximité du restituteur et qui reproduisait sur une feuille, par l'intermédiaire d'un crayon ou d'une plume, les mouvements de l'index.

## ■ L'arrivée de l'informatique et les restituteurs analytiques

**En 1968, une nouvelle version du Wild A8 permettait d'enregistrer les coordonnées des points déterminés au cours de la restitution. C'était le début de l'informatique en restitution. Informatique qui allait permettre la réalisation des restituteurs analytiques.**

Entrevus en 1956, réalisés pour la première fois en 1963 sous forme de prototype, parmi lesquels l'italien NISTRI en 1972, les restituteurs analytiques se sont développés à partir de 1976 avec les systèmes : Planicomp de Zeiss Oberkochen, Traster de Matra, AC puis S9-AP de Wild et DSR de Kern. Cette nouvelle génération bénéficiait des avancées de l'informatique et son but était de remplacer le mesurage tridimensionnel mécanique par le calcul et alléger ainsi les parties mécaniques de l'équipement, entre autres dans la mise en place des couples qui ne nécessitaient plus d'intervention manuelle.



Le "must" à partir de 1953 : le Wild A8. Un gros coléoptère peu esthétique pour ne pas dire monstrueux ! L'observation superficielle des clichés a amené la construction de deux tiges d'acier qui matérialisent les faisceaux perspectifs. Le tout donne un ensemble lourd et complexe. Le Poivilliers D était encore pire avec ses câbles et contrepoids ! La restitutrice fait mouvoir l'index qui suit les détails des photos avec les deux manivelles en X et Y et le pédalier en Z constitué d'un grand disque qu'on fait tourner avec le pied droit. Les mouvements de l'index sont transmis au coordinatographe (ou table traçante à plat) par un dispositif mécanique. Le dessin est souvent effectué au moyen d'un crayon et non à l'encre pour obtenir une minute brute (Archives auteur).



■ ■ ■ Mais les appareils de restitution représentant un investissement lourd, il paraissait difficile de remplacer du jour au lendemain les appareils analogiques par des appareils analytiques. Aussi, de nombreux utilisateurs demandèrent-ils au départ une adaptation de leurs appareils analogiques avec des encodeurs disposés sur les chariots. Ces encodeurs, évidemment, ne suffisaient pas à transformer les appareils analogiques en analytiques, ils permettaient surtout de numériser les points restitués et de créer des bases de données. Sur l'ordinateur associé, des logiciels spécifiques se chargeaient des tâches d'orientation, de calcul et de stockage des coordonnées XYZ déterminées à chaque pointé.

Sur les restituteurs analytiques de la génération suivante, toujours des encodeurs, mais avec une fonction différente. Les clichés argentiques sont placés sur deux chariots transparents nécessaires à leur examen, mais la mise en place des couples se fait numériquement, sur l'écran situé à côté du restituteur. Les opérations de restitution gardent apparemment la même structure mécanique : dans le binoculaire, l'opérateur voit l'image stéréoscopique et il déplace toujours l'index avec des manivelles en X, Y et un pédalier en Z. Mais en réalité, les encodeurs liés aux manivelles transmettent leur mouvement au logiciel qui les traduit et les transmet à son tour aux clichés en s'affranchissant de tous les procédés opto-mécaniques précédents. Chaque pointé est numérisé. La table traçante qui assurait, sur les premiers res-

tituteurs analytiques, le contrôle de la saisie du dessin est remplacée par l'écran de l'ordinateur où le dessin est exécuté avec un logiciel adapté, Microstation, par exemple.

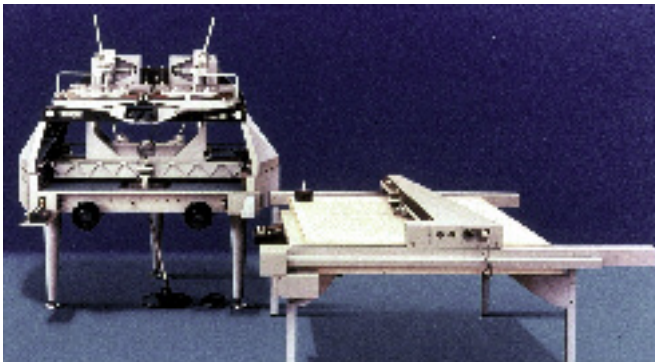
En 1996, avec le SD 2000 de Leica, le restituteur devient un stéréodigitaliseur. Cependant, avec les chariots portant les clichés photographiques et les commandes par manivelles et pédalier, la partie mécanique, bien que diminuée, reste encore importante. Mais, le logiciel tourne sur un PC et contrôle toutes les phases de l'opération de l'analyse jusqu'au transfert des données vers des logiciels d'application tournant sur une station "image".

### ■ Le tout numérique

Il fallut cependant attendre la fin des années 1990 pour que la puissance de calcul des ordinateurs permette de s'affranchir totalement du côté mécanique du restituteur.

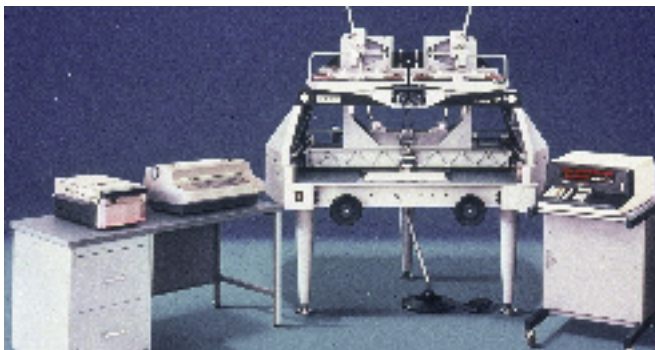
Le nouveau restituteur met alors deux écrans en parallèle : un écran sur lequel est monté le couple de prises de vue préalablement numérisées et un second écran sur lequel se font les calculs de mise en place du couple, puis le dessin en DAO. Il n'y a plus les manivelles, le pédalier et la grosse mécanique des précédents appareils, seulement une souris "topo mouse" avec une petite molette pour les Z, qui permet de pointer les contours à restituer. Une paire de lunettes spé-

Archives auteur



La génération suivante, plus esthétique, obéit aux mêmes principes. Ici, le Planimat D2 de Zeiss Oberkochen. La table traçante n'est plus entièrement mécanique : ses mouvements et sa liaison avec le restituteur sont électriques.

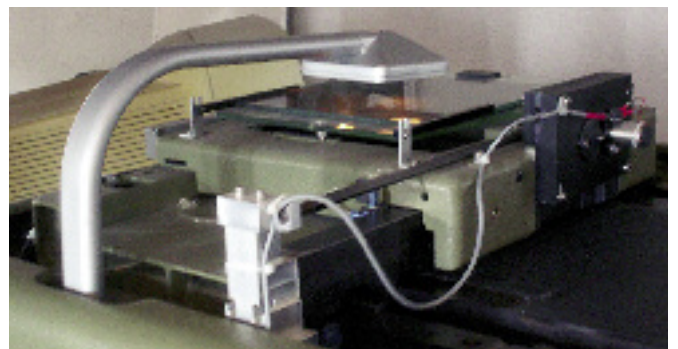
Archives auteur



Un planimat D2 modernisé des années 1970 : le restituteur est toujours le même, mais, il n'y a plus de table traçante. Les coordonnées et codes de chaque pointé sont enregistrés.

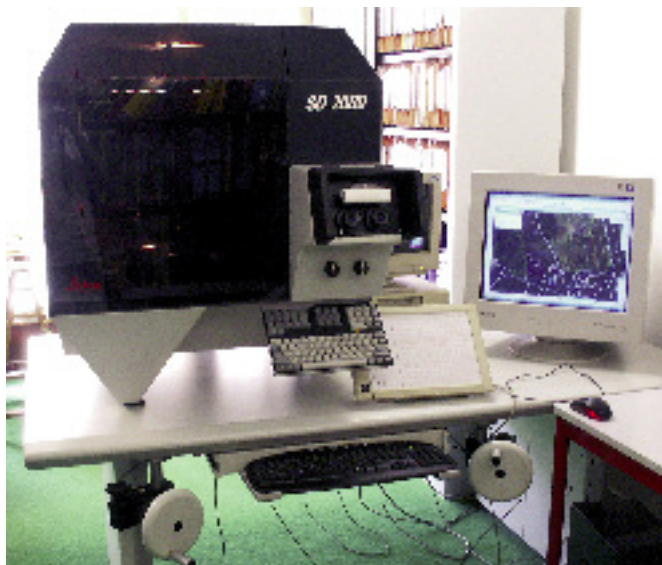


L'AM 2000 est un appareil hybride, qui se rapproche de l'analytique par les deux encodeurs dont on voit le boîtier noir sur les deux chariots portant les clichés. Sur la droite, l'écran qui permet la mise en place des couples, puis le dessin en DAO de la restitution.



Sur l'AM 2000, on voit bien l'encodeur fixé sur la droite du chariot et qui permet sa liaison avec l'ordinateur.

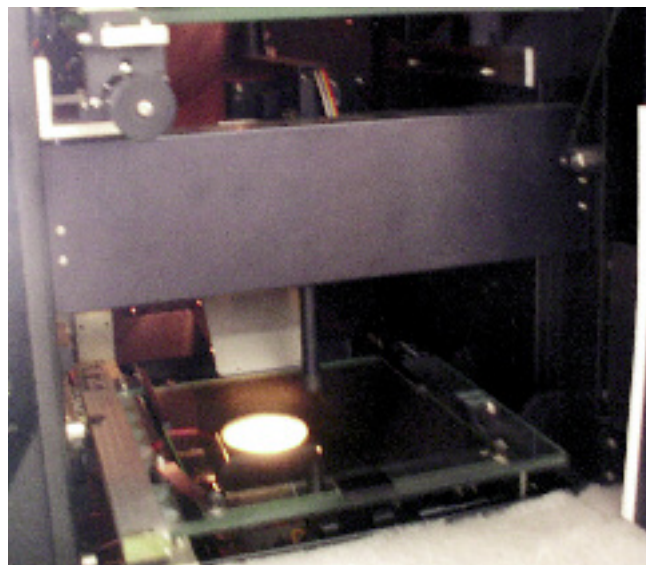
(Clichés P. Courbon au cabinet OPSIA à la Valette du Var).



**Le tout analytique : la "merveille" de Leica (Wild), le stéréo digitaliseur SD 2000 apparu en 1996. Bien que plus compact que les restituteurs de la génération précédente, la partie mécanique y reste importante. Toujours les manivelles en X et Y et le pédalier en Z.**

ciales, semblable à des lunettes de soleil est cependant nécessaire pour voir l'image de l'écran en relief. Les courbes de niveau peuvent se faire automatiquement par corrélation, mais aussi d'une manière classique... avec la souris.

A l'IGN, le tout numérique a commencé progressivement en 1996, mais les images utilisées pour la restitution étaient des photos argentiques scannées. La numérisation des chambres de prise de vue aérienne commença en 1996 avec les essais d'une caméra mise au point par l'IGN autour d'un capteur CDD matriciel Kodak de 6 Mégapixels. Les essais se continuèrent en 1997-98 en même temps que commençait la production d'images pour le CNES. Entre 2000 et 2003 est étudiée une technologie multicanal avec d'abord 3 caméras de 6 Mégapixels, synchronisées entre elles et munies de filtres différents. En 2002 un canal proche de l'infrarouge est rajouté pour une mission pilote sur le Tarn. En 2003, on passe du format 6 Mégapixels au format 16 Mégapixels. Les problèmes liés aux filtres, objectifs et post-traitement résolus, on peut aborder la production de masse. En 2005, les chambres de prise de vue numérique ont fini de remplacer totalement les argentiques. A propos de prises de vue, il est intéressant de rappeler que jusque dans les années 1960, l'IGN n'utilisait que des plaques



en verre comme support des négatifs photographiques. La stabilité dimensionnelle de ces plaques les faisait préférer aux pellicules. Les magasins cylindriques associés aux chambres de prise de vue Poivilliers-SOM contenaient 96, ou même 192 plaques 19x19. Il fallait des aptitudes de déménageur et du souffle pour changer les magasins en altitude et dans l'espace restreint des avions de prise de vue ! Leur remplacement par des pellicules sonna le glas des restituteurs Poivilliers qui ne travaillaient que sur plaques !

## ■ Les orthophotoplans

Depuis longtemps on avait pensé à redresser les photos pour obtenir une image dont les qualités métriques se rapprochent de celles du plan. Mais, le redressement opto-mécanique avec des appareils de redressement ne corrigeait que les déformations dues au défaut de verticalité de la prise de vue. Il ne corrigeait pas les différences d'échelles dues aux différences d'altitude. Le redressement n'était donc utilisable que dans les zones ou facettes de terrain très peu accidentées.

Là encore, les progrès décisifs furent apportés d'abord par l'informatique, puis, plus tard, par l'apparition des caméras numériques. L'informatique allait permettre de créer les Modèles Numériques de Terrain (MNT) nécessaires pour corriger les différences d'échelle dues aux différences d'altitude des points du terrain. Peu avant 1970, l'IGN faisait l'acquisition d'un Stéréomat, c'était un B8 Wild muni d'un dispositif qui gardait automatiquement le contact avec le terrain par corrélation lorsque l'opérateur suivait des lignes parallèles en X,Y. La sortie des profils constituant le MNT sur bandes perforées ou magnétiques s'avérait complexe et générait de nombreux problèmes. Vers 1975, L'IGN se lança dans la numérisation des courbes de niveau pour l'armée de l'air. Le résultat, assez médiocre, ne put être employé aussitôt pour la confection de MNT.

L'apparition des MNT maillés avec un semis de points régulièrement disposé est un peu confuse, car ces MNT faisaient



**Restitution moderne: plus de structures mécaniques lourdes, juste deux écrans reliés par wifi!**



■■■ appel au début, soit à des profils, soit à des fichiers de courbes. Leur pleine utilité apparut avec la numérisation des clichés en 1982. C'est juste après que l'IGN obtint la cartographie à grande échelle de la ville de Riyadh et qu'il fallut sortir industriellement des orthophotos, ce qui généra de nombreux problèmes. Cependant, mis à part le chantier de Riyadh, la confection des orthophotoplans IGN était insignifiante, alors qu'elle s'était développée dans certains pays, tels le Canada ou l'Allemagne.

Jusque dans les années 1990, les orthophotoplans se faisaient couple par couple, nécessitant la présence prolongée d'un opérateur spécialisé qui en alourdissait le prix de revient. Les orthophotoplans relatifs à plusieurs couples étaient réalisés par assemblage manuel.

A partir de 1988, l'IGN conscient de la lourdeur des procédés utilisés se lança dans l'étude de la confection automatique d'un bloc de plusieurs clichés à partir d'images numériques, cela sans monter de couples. Le programme baptisé Orthomat fut essayé en production en 1993.

Mais, il faudra attendre 1998 pour que l'IGN passe à la phase industrielle et décide de se lancer dans la BD ORTHO (Base de données orthophotographies). Au début, les clichés scannés au pas de 28  $\mu\text{m}$  et associés à un MNT (modèle numérique de terrain) permirent d'obtenir des clichés orthorectifiés. En 1999, six départements étaient couverts, puis 20 autres en 2000 et encore 23 en 2001. La première couverture a été terminée début 2004. Nous avons vu précédemment qu'à partir de cette date, les caméras argentiques furent remplacées petit à petit par des numériques.

Dans les zones urbaines, on atteint une précision inférieure à 0,5 m, environ 25 cm pour une dizaine de villes. Dans les autres zones, la précision est de l'ordre du mètre. Par contre, en montagne, on tombe dans une fourchette de 1,5 à 3,5 m. Autre progrès dû à l'informatique : comme pour les logiciels de dessin, l'établissement de documents sur différentes couches permet de les superposer. C'est ce qui est fait dans GEOPORTAIL, où depuis 2006, par internet, on peut superposer la carte 1/25.000, l'orthophotographie, le plan parcellaire du cadastre ou la carte géologique.

### ■ Les images satellites

La prise de vues régulières de l'ensemble de la terre pour un usage civil avait commencé en 1972 avec le lancement du satellite américain Landsat. La télédétection a été leur première application majeure. Avec leur pouvoir de résolution de plus en plus fin, elles sont de plus en plus employées en photogrammétrie pour les cartes de petite échelle. Au début de leur emploi en photogrammétrie, des logiciels de traitement durent être créés, car différemment de l'image photographique argentique prise instantanément, les images satellites étaient enregistrées par un balayage électronique, ligne par ligne et durant un temps beaucoup plus long. On ne pouvait plus reconstituer le faisceau perspectif des prises de vue classiques.

En 1986, sous la maîtrise du CNES, le projet franco-belgo-suédois SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) voyait le jour avec la mise en orbite de SPOT 1, d'une résolution de 20

mètres. Aujourd'hui, SPOT est devenu le leader mondial des images satellitaires civiles et le 3 mai 2002 est lancé SPOT 5. Il permet une résolution de 2,5m en mode panchromatique à partir de deux images à 5m acquises simultanément avec un demi pixel de décalage. En mode multi spectral, la résolution est de 10 mètres.

D'une orbite quasi polaire, de 822 km de demi grand axe, SPOT 5 fait le tour de la terre en 101 minutes, ce qui lui permet d'observer l'ensemble de la terre en 26 jours. C'est cette fréquence de prises de vue qui fait l'avantage de SPOT. Le système HRS (Haute Résolution Stéréoscopique) permet d'avoir une bonne vision relief du terrain. Dans les versions précédentes de SPOT, cette vision était obtenue en prenant une même zone de deux orbites différentes ; mais il se passait entre deux prises de vue un espace de temps trop long et préjudiciable. Avec SPOT 5 un télescope placé vers l'avant et un autre vers l'arrière permettent d'avoir deux images de la même zone dans un espace de temps beaucoup plus restreint. Les images sont enregistrées par une barrette munie de 12.000 capteurs CCD à la cadence de 1500 par seconde, soit une ligne tous les 5 mètres. Cette image couvre une largeur de 120 km, elle peut aller jusqu'à 600 km de long. Chaque ligne brute correspond à une perspective conique à partir de la barrette du capteur. Comme vu précédemment, différemment de la prise de vue instantanée d'une photographie aérienne, le centre de la perspective n'est pas fixe, mais se meut selon la ligne d'orbite. La cartographie à l'échelle 1/50.000 ne pose plus de problème.

D'autres satellites commerciaux existent, nous ne citerons que deux. IKONOS, lancé à la base de Vandenberg (USA) en septembre 1999 et qui fournit des images depuis 2000, avec une résolution de 1m en panchro et 4 m en multi spectral ; ces images couvrent 11 km par 11. Toujours de Vandenberg, QuickBird était lancé le 18 octobre 2001 avec une résolution de 0.61m en panchro et 2,4m en multispectral. Ces images couvrent 16,5 km par 16,5. Nous nous rapprochons de la finesse de la photo!

### ■ Les images radars en photogrammétrie

Avec les radars à synthèse d'ouverture (RSO ou SAR en anglais), très sensibles aux ondulations du terrain, de nouvelles techniques de photogrammétrie sont actuellement recherchées. Je ne pense pas qu'elles remplaceront la photogrammétrie classique, ou seulement dans certains cas particuliers. Ce sont :

#### La radargrammétrie RSO

Comme la photogrammétrie classique, elle utilise la parallaxe entre deux images acquises de deux points de vue différents. Une méthode analytique est nécessaire et la vision stéréoscopique est inconfortable.

#### L'interférométrie RSO

Elle consiste à calculer les différences d'altitude du terrain à partir de la différence de phase entre les échos radars acquis de deux positions très proches de l'antenne.

#### La radarclinométrie RSO

Alors que les deux procédés précédents utilisent un principe

stéréoscopique fondé sur la géométrie de deux images, la radarclinométrie utilise les différences d'intensité et peut travailler sur une seule image.

## Conclusion

Dans les années 1950, un ingénieur à l'esprit curieux et ouvert pouvait pratiquer toutes les techniques liées à la topographie et à la cartographie. Aujourd'hui, cela n'est plus possible et il est devenu nécessaire de se spécialiser.

Sans parler de révolution continue, toutes les techniques apparues précédemment évoluent en permanence, les logiciels s'améliorent, de nouvelles applications qu'il serait trop long et fastidieux d'énumérer apparaissent constamment. De nouvelles disciplines issues de la topographie font leur apparition et se généralisent : géomatique, Systèmes d'Information Géographique (SIG). Les mentalités changent. Le GPS fait son apparition dans la vie courante : en voiture, en randonnée. Les cartes sur CD-Rom se démocratisent. Des notions, telles que le géoréférencement, autrefois réservées à un cercle fermé de spécialistes commencent à être perçues par un nombre croissant d'utilisateurs.

Comme beaucoup d'autres, j'aurais tendance à penser que l'évolution technologique est exponentielle, que nous n'en sommes qu'au début d'une évolution folle et que la machine va encore s'emballer.

L'avenir de la nouvelle génération obligée de se remettre en cause constamment, avec des temps de pause de plus en plus courts me paraît peu enthousiasmant. Il y a aussi les problèmes d'investissement : à peine a-t-on acquis un appareil coûteux (la précision est toujours chère) qu'il devient obsolète. J'en avais fait l'amère expérience en 1995 en faisant l'acquisition d'une paire de GPS bifrèquence d'un prix de 400 000 F en compagnie d'autres géomètres.

Un an et demi après, le temps réel se généralisait en France, notre appareil était dépassé alors que nous étions loin de l'avoir amorti ! Il faut d'ailleurs ajouter, que produits en plus petit nombre et faisant l'objet de développements incessants, les appareils topographiques de précision n'ont pas connu la baisse spectaculaire de l'informatique de grande série. En dix ans le prix d'un GPS bifrèquence n'a été divisé que par 1,5, comparez ce chiffre à celui des PC !

Quant aux développements continus des appareils, il faut constater qu'ils sont souvent générés par la concurrence sans merci que se livrent les constructeurs.

Michel Kasser pense différemment. Pour lui, cette explosion était prévisible car elle correspond à des technologies en gestation depuis longtemps. Il a fallu plus de trente ans pour que l'on passe des premières expériences de la géodésie spatiale à la généralisation du GPS.

Même constatation pour l'informatique et l'électronique. Nous arrivons au sommet de la courbe et les principes de base vont encore rester les mêmes pendant longtemps. Seules se feront des améliorations de détail ou des applications nouvelles des techniques existantes.

L'avenir tranchera ! ●

## Remerciements

En premier lieu, l'Association française de topographie (AFT), dont le comité de lecture a permis l'amélioration de ce travail et en a permis la publication.

Nicolas Balard, enseignant à l'ESTP de Cachan pour sa relecture du chapitre GPS.

Serge Botton, Ingénieur des Travaux (IGN) pour ses réponses sur le GPS.

André Créhange, Ingénieur Géographe (IGN) pour les calculs à l'IGN.  
Robert Doustaly, Géomètre-Expert DPLG à Solliès-Toucas (Var) pour l'historique de la première table traçante, François Froment et Lionel Sagnol, du Cabinet Arragon à la même adresse.

Jean Ducloux, Ingénieur Géographe (IGN)

Jürg Dedual qui a réalisé un beau musée virtuel sur la société Wild Heerbrugg.

Françoise Duquenne, Ingénieur Géographe (IGN).

André Fontaine, Ingénieur Géographe (IGN) pour les calculs et la géodésie à l'IGN.

Patrice Gaubert de la société Leica.

Pierre Grussenmeyer, Professeur à l'INSA Strasbourg

Pierre Hecker, Ingénieur des Travaux (IGN) pour la cartographie automatique à l'IGN.

François Hospital, Nicolas Bouad, Audrey Alajouanine de la société Opsia à Toulon, qui m'ont fait visiter leur atelier de photogrammétrie avec les appareils récents.

Jean-Claude Leblanc, Ingénieur Géographe, qui a passé de longues années au service de la logistique IGN et a conservé de nombreux documents qui m'ont été d'une aide précieuse.

Hélène Leplomb, ingénieure commerciale de Leica Geosystems France

David Lhomme et la Société ATM3D pour la lasergrammétrie

Eliane Matter, IGN

Daniel Menet, documentation photographique de l'IGN.

Emmanuel Natchitz qui m'a ouvert la documentation de la section topographique de l'ESTP de Cachan et a même fait démonter deux stations totales pour que je puisse voir de près les procédés de lectures angulaires.

Bernard Piasco, Société SPIRAL à Toulon pour les tables traçantes.

Professeur Rudolf Staiger de Bochum, coauteur du "Instrumentenkunde der Vermessungstechnik" qui a toujours aimablement répondu à mes courriers et demandes de renseignements.

## Bibliographie

HURAUULT J., CRUZET J., 1956, *Manuel de photogrammétrie*, IGN

EGELS Y., KASSER M., 2001, *Photogrammétrie numérique*, Hermès-Lavoisier

GEOMETRE, Revue n° 8-9/août-septembre 1995, *l'instrumentation topographique*.

KASSER Michel, 2005, *Vers l'achèvement d'un cycle de modifications majeures dans le domaine de la topométrie ?* XYZ n°104

## Contact

Paul Courbon Ingénieur des Travaux géographiques (IGN)  
Géomètre-Expert DPLG - paul.courbon@yahoo.fr