

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

■ Paul COURBON



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

Après 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'appropriait 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^{er} 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.

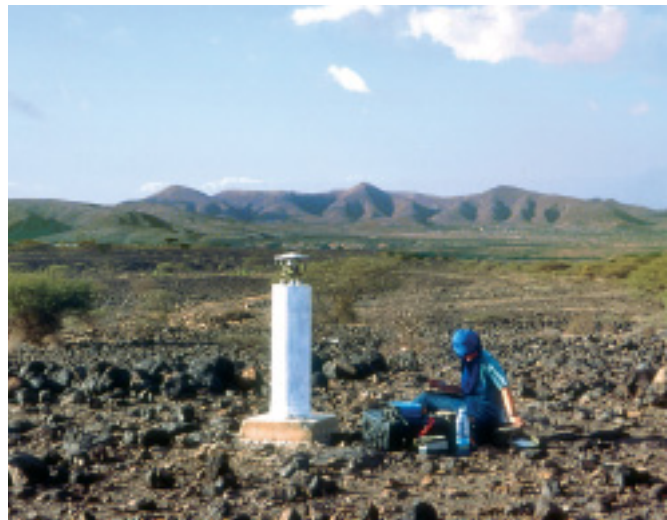
La France s'intéressa dès le début à cette aventure spatiale et, en 1961, était créé le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). La même année, l'IGN commençait ses études et ses

■ ■ ■ 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° 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.



IGN-droits réservés

Géodésie GPS du Yémen réalisée par l'IGN.

On peut encore parler du programme ISAGEX, initié en 1970 par le Centre National d'Etudes 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.

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



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.

détermination de ce temps permet de déduire les distances 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.

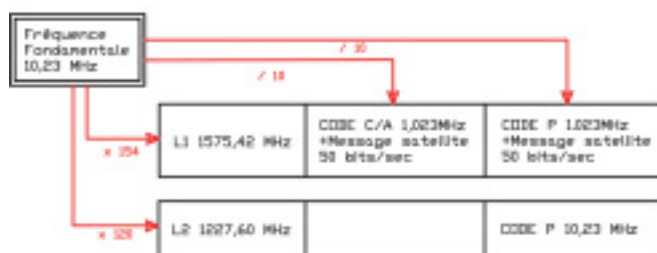
Ces fréquences porteuses sont ensuite modulées en phase par des codes pseudo-aléatoires propres à chaque satellite :

- 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



Structure des signaux GPS.

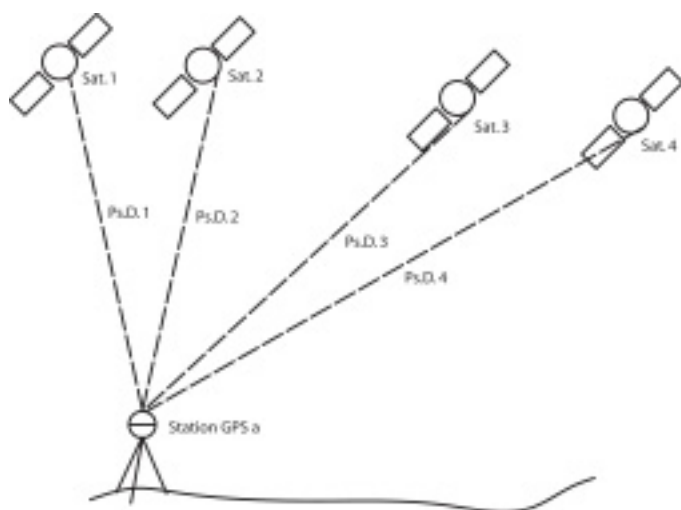


GPS de poche : 120 grammes, 200 euros, moins de deux minutes pour obtenir la position d'un point avec une précision de 5 mètres ! Pour celui qui a fait autrefois de l'astronomie de position pour trouver son chemin dans le Sahara, c'est à chaque mesure un émerveillement renouvelé...

■ ■ ■ à 5800 € HT la paire en 2005). Il peut donc être intéressant en fonction des structures et des types de travaux de l'entreprise. Mais, évidemment, il est moins performant que le bifréquence.

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 bifréquence. 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.

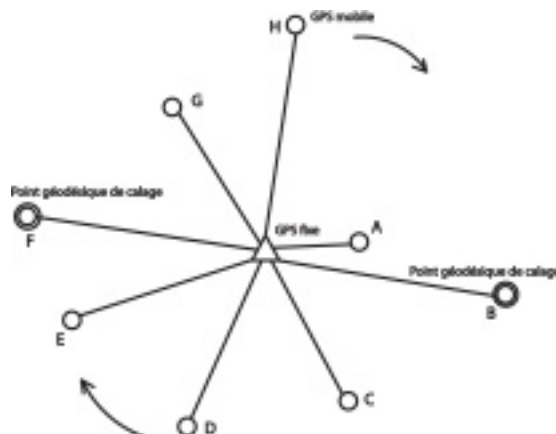
– **Le bifréquence**, dont la combinaison de L1 et L2 permet d'éliminer l'erreur ionosphérique et de résoudre plus facilement l'ambiguïté, est beaucoup plus performant. Mais, évidemment, il coûte plus cher.



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.

■ 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 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



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.

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 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

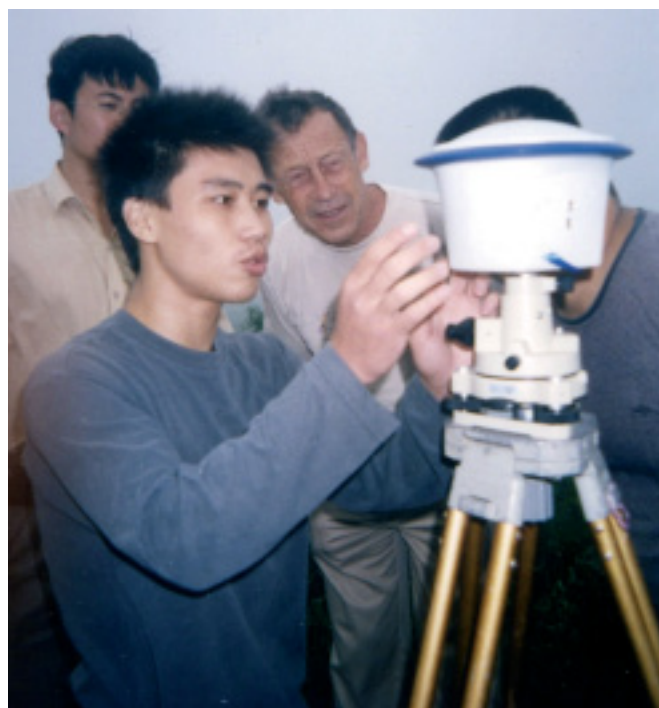
La technologie avance à pas de géants, elle s'emballe, les innovations n'arrêtent pas. En 1995, la carte mémoire d'un bifréquence Leica n'était que de 1 Mo. Elle ne permettait que 8 heures d'observation avec une fréquence de mesures de 10 secondes et 1 h 15 avec une fréquence de 1 seconde. Si une détermination 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'enre-



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...

gistrer 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.

■ 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.



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

■ 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 cinquantaine 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 acces-

sible 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 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 23 616 kilomètres, la période des satellites étant de 14 h 22 m. Galileo prévoit l'utilisation de quatre bandes de fréquence, dont deux seront partagées avec le GPS. 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 a été lancé de la base de Baïkonour (Kazakhstan) par une fusée Soyouz-Fregat. Ce satellite préfigure les suivants dont le dernier devrait être lancé en 2008.

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.

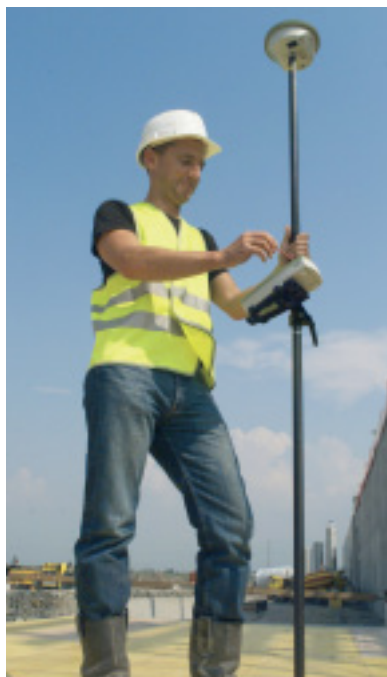


Photo Leica



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

On 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^e siècle et au début du XX^e 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 me 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 couissant 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 nom-

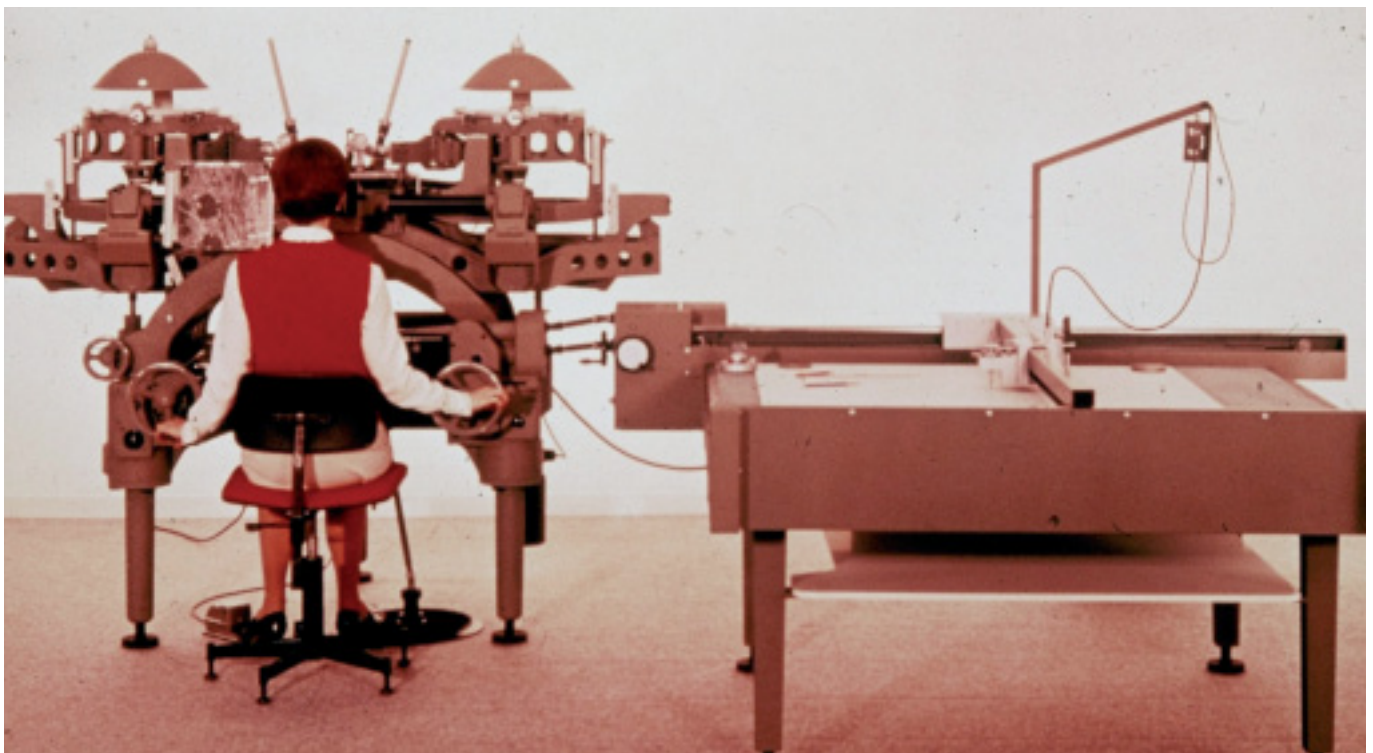
breux organes mécaniques. Mais la précision était meilleure que dans le dispositif purement mécanique précédent. C'était le cas du Poivilliers B.

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.

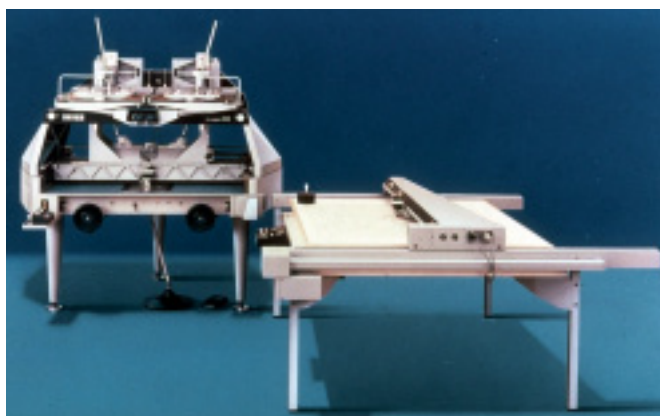
Dans ces deux types d'appareils, les mouvements de l'index visible dans le binoculaire et destiné à "filer" les éléments à restituer, étaient commandés par deux manivelles en X et Y et par un pédalier en Z. Une liaison mécanique par arbres et engrenages se faisait avec une table traçante à plat (coordinatographe)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



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).



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.



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.

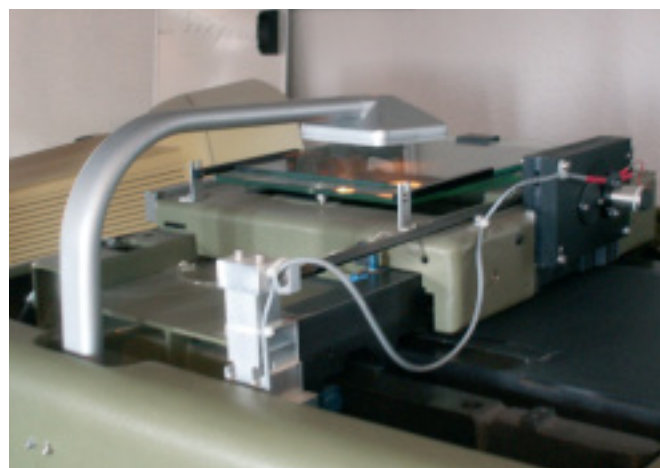


L'AM 2000 est un appareil hybride, qui se rapproche de l'analytique par les deux encodeurs dont on voit le boîtier noir sur les deux chariots portant les clichés. Sur la droite, l'écran qui permet la mise en place des couples, puis le dessin en DAO de la restitution.

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 nécessitait plus d'intervention manuelle.

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 restituteurs analytiques, le contrôle de la saisie du dessin est remplacée par l'écran de l'ordinateur ■ ■ ■



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 OPS/A 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.

où le dessin est exécuté avec un logiciel adapté, Microstation, par exemple.

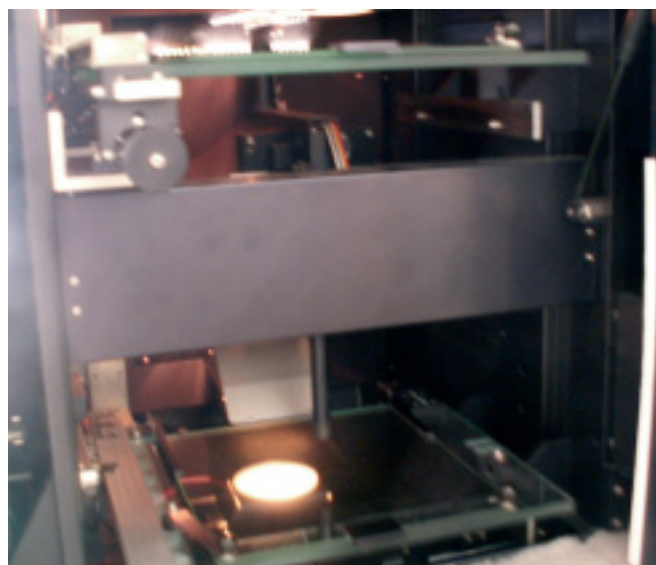
En 1996, avec le SD 2000 de Leica, le restituteur devient un stéréodigitaliseur. Cependant, avec les chariots portant les clichés photographiques et les commandes par manivelles et pédalier, la partie mécanique, bien que diminuée, reste encore importante. Mais, le logiciel tourne sur un PC et contrôle 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 spéciales, 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



Un appareil de restitution moderne : deux écrans, une souris et un PC muni des logiciels adéquats ! Sur l'écran de gauche, deux photos numérisées ont permis de monter le couple ; sur celui de droite, les calculs de mises en place du couple seront suivis par le dessin en DAO.

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 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 μ 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 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. Aujourd'hui, les images du satellite Quickbird ont une résolution de 0,6m qui les rapproche 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 000F 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 ! 1

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