

RENCONTRE AFT - SICOB

1^{er} octobre 1981

Exposition de matériel avec **200 personnes, 9 constructeurs** pendant **8 heures** de rencontre et 3 conférenciers : compte rendu par MM. POUPARD et EGELS (IGN), BOUCHER (IGN), COUSIN (Communauté Urbaine de LILLE)

Métrologie et informatique

par M. POUPARD
Institut Géographique National

Dans le domaine de la métrologie, comme dans bien d'autres, innovation rime avec informatique, car les développements récents proviennent principalement de l'utilisation de la technologie électronique et informatique. S'agissant d'un domaine en constante évolution et pour lequel les axes de recherche et de développement sont nombreux et variés, faire d'une manière exhaustive, le point de la situation est en quelque sorte une gageure. Cette présentation sera plus modeste et se limitera aux études, recherches et expérimentations menées par l'IGN.

D'une manière générale, cette évolution vers l'informatique s'effectue suivant deux directions principales :

- adaptation informatique des matériels et méthodes traditionnels ;
- développement de nouveaux systèmes de localisation et de mesures qui nécessitent un traitement numérique complexe d'un volume important d'informations.

C'est bien évidemment la puissance de calcul offerte par les microprocesseurs à un faible prix (80 F pour un microprocesseur à 8 bits), qui a rendu possible la réalisation de ces nouveaux systèmes. Les théodolites numériques, les restituteurs analytiques sont représentatifs du premier courant. Les systèmes de localisation DOPPLER, TRIDENT, ainsi que les centrales à inertie, illustrent les nouvelles possibilités de mesures, qu'offrent au géomètre, l'électronique et l'informatique.

Informatisation des méthodes et matériels traditionnels :

L'envahissante technologie informatique s'empare du "hard" comme du "soft", des matériels comme des traitements. Il peut s'agir d'une simple copie ; on réalise mieux ou moins cher les mêmes appareils, on effectue plus vite les mêmes calculs auparavant faits à la main. Mais l'assimilation informatique peut être plus poussée, en intégrant appareil et traitement, c'est le cas des théodolites numériques.

Avant d'examiner quelques exemples, quelques mots sur la tendance générale concernant l'évolution des matériels : elle se caractérise principalement par un passage de l'analogique au numérique par un remplacement des dispositifs mécaniques par des circuits électroniques. Usiner une pièce avec précision coûte très cher, surtout quand il faut presque atteindre le micron comme sur les tiges d'appareils de restitution. Tout dispositif mécanique de calcul analogique sera donc avantageusement remplacé par un microprocesseur. Le TRASTER est une brillante illustration de ce principe, les dispositifs mécaniques et optiques, qui sont l'essentiel d'un appareil de restitution sont réduits à leur plus simple expression et peuvent être usinés grossièrement, seule la qualité du système de mesure importe, les calculateurs prenant en charge la correction des défauts mécaniques comme la non-perpendicularité des mouvements x et y des clichés.

Théodolites numériques :

Avec les progrès récents rendant possible la réalisation de cercles codés de précision sous des volumes modestes, sont apparues des "stations complètes", d'encombrement comparable à celui d'un gros théodolite et permettant de mesurer angle horizontal, angle vertical et distance, de façon automatique sans faire aucune lecture. Un microprocesseur incorporé permet de calculer toute combinaison intéressante entre ces trois données. Il est évidemment prévu de le coupler à un système de stockage des données sur mémoires vives ou sur magnétophone à cassettes. Premiers maillons d'une chaîne cartographique, ils n'atteignent pas encore la précision des théodolites classiques ; ce qui explique qu'ils ne soient pas utilisés à l'Institut. Mais l'arrivée sur le marché d'appareil du type du VECTRON II KEUFFEL et ESSER qui permettent des lectures avec une précision de l'ordre de 2 décimilligrades est de nature à modifier notre attitude. Ils ne permettent cependant pas la répétabilité des lectures par rotation du limbe et le prétraitement n'est pas encore programmable à volonté ; ce qui est

assez gênant du point de vue de la souplesse d'emploi.

Gyrothéodolite :

L'appareil est muni d'un gyroscope, dont l'axe oscille autour du méridien. Il est donc nécessaire d'observer ce mouvement pendant une durée de l'ordre d'une période (7 minutes) pour déterminer le centre des oscillations, et par là le NORD.

Les appareils actuellement commercialisés sont de trois types :

- les premiers purement mécaniques et optiques, mis à part le système d'asservissement du moteur du gyroscope.

- les seconds, automatiques, suppléent l'œil humain et les calculs manuels par des circuits électroniques utilisant des principes simples de comptage.

- les derniers intègrent un microprocesseur ; ce qui permet, en utilisant des algorithmes plus rigoureux, d'améliorer notablement la précision des résultats, comme le montre le tableau donnant la précision obtenue en fonction de la durée d'observation :

Précision	0,01 G	0,003 G	0,001 G
Appareil			
<u>Manuel</u>			
MOM WILD GAK 1	20 minutes	2 heures	inaccessible
<u>Automatique</u>			
SFIM GYMO	7 minutes	20 minutes	2 heures
<u>Informatique</u>			
GG1 GYROMAT	90 secondes	7 minutes	20 minutes

Expérimentalement, le traitement en différé des observations d'un appareil manuel, le WILD GAK 1, notamment l'ajustement d'une courbe sinusoïdale par moindres carrés, a été étudié à l'IGN. Il améliore sensiblement la précision, puisque des déterminations meilleures que 30 décimilligrades ont été faites avec un appareil donné pour le centigrade. Avec la précision atteinte par les gyrothéodolites modernes, leur utilisation pour des travaux géodésiques peut s'envisager principalement pour réorienter des polygones comme l'atteste un essai mené à l'IGN sur une polygone fermée de 4^e ordre, comportant 13 côtés de 3 à 5 km, dont tous les sommets ont été réorientés. Par rapport aux coordonnées géodésiques,

2 — Gyro-théodolite MOM



1 — Gyro-théodolite WILD GAK-1

qui ont servi d'étalon — il s'agissait d'un bloc du programme 80 — la polygone géodésique présente un ventre de 12 cm, la réorientation avec le GAK 1 a réduit cet écart à 3. Néanmoins, leur prix élevé (200 000 F) reste un obstacle de taille à leur diffusion.

En ce qui concerne les traitements, il est plus difficile de distinguer une tendance générale. C'est un développement tout azimut, auquel on assiste. Toute la gamme des systèmes de traitements est sollicitée, de la calculette programmable à l'ordinateur de grande puissance, la télétransmission des données, dont un essai est actuellement en cours, réalisant la synthèse entre ces deux types d'informatique.

Calcul du nivellement en temps réel :

L'Institut, s'inspirant des réalisations d'autres organismes, a mis au point un équipement permettant d'effectuer le nivellement en voiture. Plus rapide dans certaines conditions, plus précise, plus confortable pour les opérateurs, cette solution a en outre l'avantage de pouvoir transporter un calculateur, un HP 41 C qui effectue les contrôles (contrôle de marche, écart entre les deux nivellements) et les calculs, signalant au besoin à l'opérateur la nécessité d'une reprise quelques secondes après la dernière observation de la station. Il est également possible d'utiliser un SHARP PC 1211, qui est connectable à un magnétophone, permettant ainsi la mémorisation en séquentiel des observations. C'est le conducteur du véhicule, qui introduit les lectures, que lui communique, par un système d'interphone, l'opérateur installé sur la plate forme d'observation. Il serait bien sûr souhaitable d'éviter cet intermédiaire vocal et manuel, mais on ne voit pas comment coder les lectures sur les mires ! Ce raccourci serait par contre envisageable en nivellement trigonométrique avec un théodolite numérique.

Le nivellement du Boulevard périphérique donne une idée de la précision atteinte par cette méthode ; l'écart de fermeture ne dépassait pas 3 mm pour 30 km et les écarts en trois points de contrôle sont tous inférieurs à 3 mm. La qualité du niveau (NI 002 de ZEISS), le poids du trépied et des crapauds, la hauteur d'observation sont les principaux facteurs d'amélioration de la qualité des observations.

Les calculs de nivellement n'exigent pas une grande puissance de calcul, ni une mémoire importante, car ils sont cumulatifs. L'introduction de l'informatique n'a donc pas changé les méthodes de calcul, mais, en effectuant simultanément les observations et les traitements et en supprimant aussi des

intermédiaires, elle augmente la fiabilité de la méthode et diminue les délais d'obtention des résultats.



A — Nivellement motorisé sur le périphérique



B — Véhicule d'observation



C — Véhicule porte-mire



D — Introduction des observations (HP41C)



E — Edition des résultats sur l'imprimante

Aérotriangulation de précision :

A l'autre extrémité de l'échelle de puissance, les gros ordinateurs rendent possibles des calculs par ajustement d'ensemble d'un nombre important d'inconnus, c'est le cas de la compensation d'un réseau géodésique ou de l'aérotriangulation de bloc de grande dimension. Leur emploi permet aussi d'appliquer des modèles mathématiques plus rigoureux, des systématismes, qui passaient auparavant inaperçus, sont mis en évidence et éliminés. La qualité des résultats en est d'autant améliorée. Le chantier test de MODANE sur la voie d'accès au Tunnel du FREJUS montre ce que la conjonction d'un modèle mathématique rigoureux et la prise en compte des systématismes peut apporter.

La méthode employée est très connue, puisqu'il s'agit d'une aérotriangulation prébalisée à partir d'une prise de vues au 1/2 500^e à fort recouvrement (90 %). Les points d'appui, au nombre d'une dizaine ont été déterminés par microtriangulation de précision, avec une tolérance inférieure au centimètre. Sur une zone de 2 500 mètres par 500 mètres, des tests statistiques et des contrôles directs — déplacements de cibles effectués par la DDE — ont prouvé que la précision de détermination obtenue par cette méthode s'exprimait par une tolérance planimétrique inférieure au centimètre (8 millimètres exactement) et légèrement supérieure, 12 millimètres en altimétrie en faisant abstraction des erreurs de positionnement des points d'appui.

Cette précision est quatre à cinq fois meilleure que celle que donnent les méthodes usuelles d'aérotriangulation.

Sur ce chantier, la photogrammétrie analytique a atteint la précision de la microtriangulation, c'est une conclusion qui mérite d'être soulignée et dont les

auteurs du projet ont été les premiers surpris. La qualité de ces résultats n'est pas à porter au seul crédit du programme de calcul ; le prébalisage d'une centaine de points de liaison, le fort recouvrement, la précision du mono-comparateur PK 1, y ont également largement contribué.

Un ordinateur de la taille de l'IRIS 80 pourrait inverser en mémoire centrale, la matrice normale d'un système comportant une centaine de points, mais cela n'irait pas sans de sérieuses contraintes d'utilisation puisqu'une grande part des ressources de l'ordinateur, qui fonctionne habituellement en multiprogrammation, devrait être sollicitée. Pour s'affranchir de cette contrainte et de la limite d'une centaine de points, un programme d'inversion de matières "creuses", c'est-à-dire comportant de nombreux zéros, a été mis au point par M. de MASSON d'AUTUME.

Télétransmissions des données :

Il est tentant de bénéficier à la fois de la souplesse d'utilisation des micro-ordinateurs et de la puissance de calcul des gros ordinateurs. Les premiers prenant en charge un prétraitement effectuant des contrôles simples de validité et de fermeture, les seconds s'acquittant du calcul final, quand il est trop complexe ou quand il implique des fichiers de taille importante. Dans cet esprit, un essai de télétransmission des données est en cours dans une brigade de géodésie en FRANCE. La transmission n'a pas lieu en temps réel, sur le point stationné et ne concerne pas l'ensemble des observations (les tours d'horizon). Cette manière de procéder ne sera concevable qu'avec des appareils à sortie numérique et avec des liaisons radio ; elle pourra être envisagée dans un deuxième temps. Pour le moment les moyennes des tours d'horizon sont transmises avec une périodicité de quelques jours en utilisant le réseau commuté, c'est-à-dire une simple ligne téléphonique. Un logiciel d'accueil, dont l'étude reste à faire, déterminera, au fur et à mesure de l'avancement du chantier, les blocs de point calculables, les déterminera à partir d'un fichier de points d'ordre supérieur et signalera les résidus importants. On en attend, bien sûr, une détection rapide des erreurs, toujours plus faciles à repérer, quand les équipes sont encore sur le terrain et des résultats disponibles dès la fin des travaux de terrain. Cette expérience n'en est qu'à ses débuts et il est trop tôt pour tirer des conclusions.

Méthodes modernes de positionnement :

Si elles apportent un peu plus de souplesse, de fiabilité et de précision, les utilisations de l'informatique, qui ont été présentées ne changent pas fondamentalement la méthodologie métrologique. Il n'en est pas de même des systèmes de localisation, qui pourraient dans un avenir qui n'est quand même pas proche, bouleverser le travail du géomètre.

Pour l'essentiel, la géodésie et la topométrie classiques utilisent des propriétés simples de la propagation des ondes lumineuses et électromagnétiques, trajectoire rectiligne et vitesse constante en première approximation. Le développement des microprocesseurs a ouvert de nouvelles perspectives en permettant l'utilisation de phénomènes physiques, qui s'expriment par des équations plus complexes, notamment, intégrales ; effet DOPPLER, principes inertiels.

Géodésie DOPPLER :

En mesurant l'intégrale entre deux instants, t_1 et t_2 , du décalage de fréquence provoqué par le déplacement radial d'un satellite émettant une onde de fréquence donnée, on positionne le point de réception sur un hyperboloïde de révolution d'axe $S_1 S_2$. S_1 et S_2 étant les positions supposées connues du satellite aux instants t_1 et t_2 . Il suffit de multiplier les observations pour déterminer les coordonnées du point de station dans le système de référence choisie pour exprimer la trajectoire du satellite émetteur. Suivant la précision requise (de 5 mètres à 1 mètre), les observations durent de 3 à 11 jours et plusieurs méthodes de calcul existent, sur lesquelles nous n'insisterons pas.

La principale utilisation de ces méthodes DOPPLER est d'ordre géodésique. Les points DOPPLER permettent de raccorder des réseaux géodésiques établis par des méthodes classiques (géométriques et astronomiques) sur des ellipsoïdes différents. Judicieusement répartis, ils peuvent également servir de points d'appui (réorientation, remise à l'échelle) d'un réseau géodésique.

Centrale à inertie :

Il existe plusieurs principes de fonctionnement pour ces ensembles de mesures très complexes comportant des gyroscopes et des accéléromètres. Deux ou trois gyroscopes matérialisent un référentiel invariant dans un repère galiléen, par rapport auquel la terre est donc mobile. Une autre solution également adoptée revient à matérialiser le trièdre local classique (NORD, EST, Verticale). Dans ce dernier cas, il faut, bien entendu, tenir compte de la rotation terrestre et du déplacement du véhicule porteur — ce qui implique nécessairement un processus de calcul itératif, parce que l'on est sensé connaître la solution ! — et contraindre les gyroscopes en leur appliquant des couples appropriés. Des accéléromètres mesurent en continu les accélérations dans les trois directions, il suffit d'intégrer deux fois ces variables pour obtenir les coordonnées dans le repère choisi puisque les conditions aux limites (vitesse nulle, position de départ corp déterminent complètement la solution.

Sans entrer dans le détail des calculs, il est évident que seule l'utilisation de microprocesseurs permet de les effectuer en temps réel d'autant qu'il est parfois nécessaire d'avoir recours à un processus itératif.

L'utilisation des centrales actuelles comporte de sérieuses contraintes : alignement au départ et à l'arrivée, c'est-à-dire, orientation des gyroscopes, et surtout réalisation de points fixes (accélération et vitesse nulles) toutes les quatre minutes.

Néanmoins, les Canadiens l'utilisent couramment pour ce qu'ils qualifient de géodésie de 2^e ordre, mais que l'on appellerait en FRANCE des travaux de stéréopréparation. Sur un cheminement en aller et retour d'une vingtaine de kilomètres, la précision obtenue est de l'ordre de 50 m. Ces méthodes de géodésie inertielle semblent donc être particulièrement prometteuses cependant l'utilisation par le géomètre de tels systèmes, pour des mesures topométriques est encore un scénario de science-fiction, étant donné les progrès qui restent à faire en ce qui concerne la précision.