

MÉTROLOGIE GÉODÉSIQUE DES GRANDS ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

Jean Gervaise, ancien directeur du groupe Géodésie Appliquée - CERN.

En guise d'introduction, j'aimerais citer quelques lignes de Louis Leprince-Ringuet, tirées de son dernier livre «Noces de Diamant avec l'Atome». Les principes énoncés semblent parfaitement convenir à l'introduction de ce Colloque. Il me suffira alors de donner des exemples qui les illustreront.

«La méthode scientifique, essentiellement rationnelle, est le fruit d'une longue et rigoureuse préparation ; elle est universelle, elle est fondamentale pour l'activité de la recherche.

La méthode rationnelle doit être accompagnée d'un certain nombre de qualités fondamentales : la ténacité, l'honnêteté scrupuleuse dans la description des expériences et des résultats, la précision sans laquelle la plus grande confusion peut régner, l'esprit d'équipe, car tout progrès devient de plus en plus collectif. Mais deux attitudes y dominent : l'ouverture d'esprit, qui permet de découvrir, d'accueillir ce que l'on n'avait pas prévu, et l'esprit de remise en question successives, si bien qu'une œuvre scientifique est rarement définitive, complète, achevée. Elle apporte une pièce nouvelle, supplémentaire, à un édifice immense et magnifique dont la construction se poursuit toujours.

Si la méthode scientifique est rationnelle, si notre éthique se montre exigeante, il nous faut absolument faire preuve d'imagination créatrice. Mais nous, les «manuels» de la science, que faisons-nous ? Toute notre imagination, notre ténacité s'appliquent au détail d'un appareillage, elles s'appliquent à l'examen des résultats, à l'observation critique, à la recherche de signes. Nous sommes attentifs aux signes, même peu perceptibles, que des circonstances fortuites placeront devant nos yeux».

Peut-être cette introduction est-elle trop longue, mais, à la réflexion, elle fournit bien les éléments qui ont dominé les travaux du Groupe de Géodésie Appliquée du CERN depuis sa création, en décembre 1954, jusqu'à nos jours.

I - 1954-1960 : LE PS

Qu'avions-nous à notre disposition, le lundi 13 décembre 1954, lorsqu'André Decae et moi-même sommes arrivés au CERN. Nous étions tous les deux des géodésiens appartenant à la Section de Géodésie Primordiale de l'I.G.N. Nous avions l'arsenal classique de la géodésie et notre expérience.

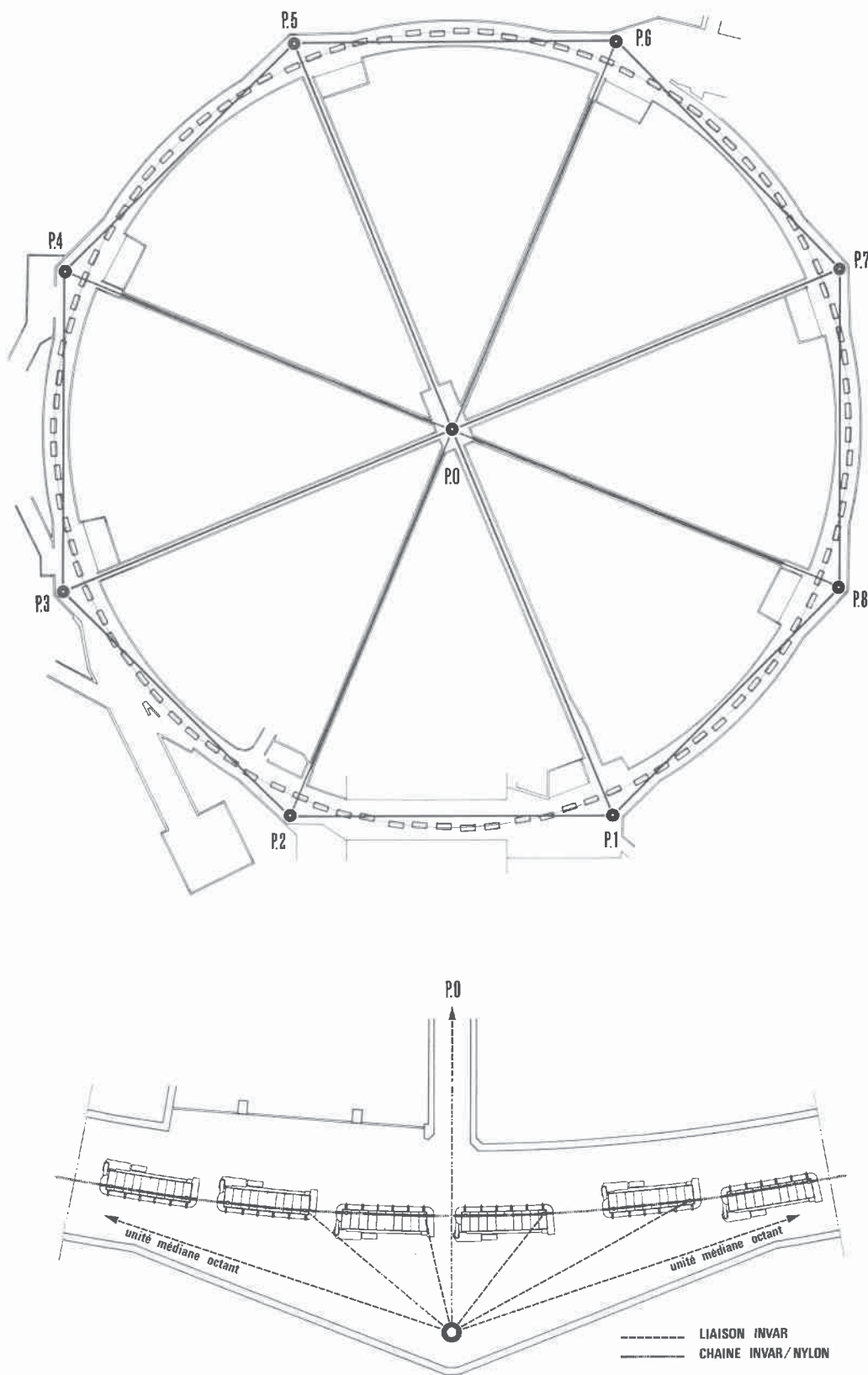
J'avais eu la chance de participer à deux mesures de base d'environ 10 km, l'une dans la presqu'île de Crozon en Bretagne, et l'autre sur une plage méditerranéenne près d'Antibes. Une base géodésique, c'est la mesure d'une distance d'environ 10 km, aller et retour, avec trois fils d'invar de 24 m - précision 10^{-6} .

En plus de notre expérience, nous disposions d'une petite brochure éditée par le Service Topographique Fédéral, Section de Géodésie, Wabern, 1954, intitulée «Méthode géodésique pour la détermination des déformations de barages» et qui introduisait la notion de centrage forcé dans les mesures géodésiques de précision.

A la première réunion des chefs de groupe de la Division Synchrotron à Protons à laquelle nous avons assisté, nous découvrîmes avec surprise qu'un ingénieur du CERN venait d'inventer un théodolite de précision pour les mesures d'angles ! Déjà, il fallut nous battre pour obtenir huit tunnels radiaux pour les mesures de la figure géodésique de référence du PS au lieu de quatre initialement prévus (figure 1).

Avant le début des travaux du PS, il nous fallut entreprendre une étude de la stabilité du sol. Une base de 72 m, mesurée à l'invar, des mesures angulaires au T3 et des nivellements répétés, le tout sur des piliers en béton avec centrage forcé (étude des mouvements de la moraine). Des essais suivirent pour mesurer les mouvements de ces piliers, ancrés dans la moraine, par rapport à la molasse sous-jacente (étude des mouvements de la molasse) au moyen de pendules inversés. Trois fois par semaine, des nivellements de plusieurs kilomètres, partant d'un repère profondément ancré dans la molasse pour rejoindre les piliers, permirent de contrôler les mouvements de la figure géodésique du site. Ceci nous permit d'entrevoir l'influence du choc des marées de l'Atlantique sur le socle molassique dans lequel serait construit le PS. On en reparlera certainement d'ici quelques années sous la forme de l'influence des marées de l'écorce terrestre.

Notre esprit critique fut vite mis à l'épreuve par les précisions annoncées par deux firmes et non des moindres : la maison Wild et la Société Genevoise d'Instruments de Physique, précisions qui ne correspondaient pas avec les résultats des mesures. Ces leçons nous servirent beaucoup par la suite.



Métrieologie du Synchrotron à protons de 28 GeV

Figure 1

Nous procédâmes par la suite à l'étude de la stabilité de la poutre devant porter les 100 aimants du PS, à l'installation de la base d'étalonnage dans un des tunnels radiaux de l'accélérateur, à la mise en place des aimants, aux contrôles de leur stabilité : mesures au fil d'invar, mesures d'angles et nivellement de précision.

Dès les premières mesures des distances de 105,85 m, séparant le pilier central des piliers radiaux, nous mîmes en évidence un allongement anormal des fils d'invar dû à une tension trop élevée. Nous fûmes obligés de diminuer la tension pour rester dans des valeurs d'allongement raisonnables. Cette découverte fut confirmée par le Bureau International des Poids et Mesures (figure 2) dans les années suivantes.

Nous avons aussi confirmé la difficulté des mesures d'angle, leur fragilité en atmosphère confinée en constatant l'effet que pouvait avoir l'ouverture ou la fermeture d'une porte dans le tunnel radial P0-P1.

Un an avant la mise en marche de l'accélérateur américain de Brookhaven, le 24 novembre 1959 à 19h30, le premier faisceau de protons circule dans le PS, pratiquement sans perte.

II - 1960-1971 : LES ISR

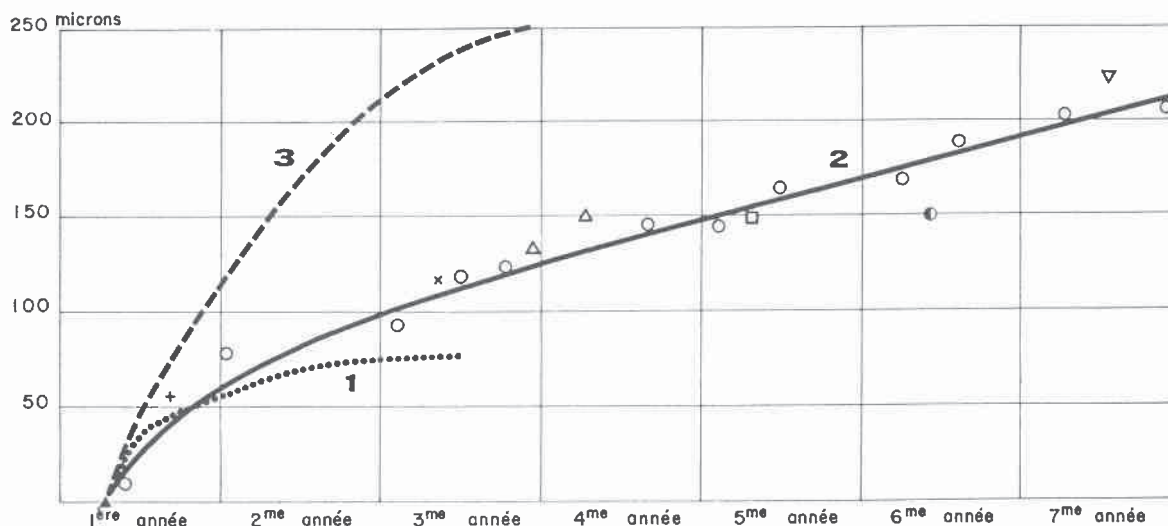
Intersecting Storage Rings
Anneaux de Stockage à Intersections

Installation des expériences dans les halls Sud et Nord du PS. Construction et mise en place des chambres à bulles.

Mesure de la stabilité de la poutre qui supporte les aimants du PS. Mesure des variations et des tassements dus aux changements de blindage.

1961 : invention du Distinvar ; apparition de la lumière cohérente, les lasers ; mesure de franges d'interférence au CISE à Milan, avec un interféromètre Hewlett-Packard. Essai de construction d'un mekomètre avec le Dr. Froome du NPL, Teddington - échec.

1962 - 1963 : mesures de stabilité sur les sites proposés par les Etats-Membres, pour la construction d'un accélérateur de 300 GeV. Extensomètres horizontaux : mesures horizontales sur un site en calcaire (Vitrolles - F), dans le grès permien (Le Luc - F), dans la craie (Mundford, U.K.). Extensomètres vertical : (Focant - B) pour la mesure des mouvements de terrain en fonction des variations de la nappe aquifère.



- | | | |
|----------|----------------------------------|-------------------|
| 1 | fil d'invar BIPM de 24 m n° 796 | traction 98,09 N |
| 2 | ruban voyageur BIPM de 24 m n° 2 | traction 98,09 N |
| 3 | fil d'invar CERN de 24m | traction 196,18 N |

Lieux d'utilisation du ruban voyageur

○ Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres.

▲ National Bureau of Standards, Washington.

+ National Physical Laboratory, Teddington.

× National Standards Laboratory, Chippendale.

△ Institut Central de Recherches Scientifiques de Géodésie, Moscou.

□ Physikalisch - Technische Bundesanstalt, Braunschweig.

● Institut Géodésique de Finlande, Helsinki.

▽ Geographical Survey Institute, Tokyo.

Figure 2

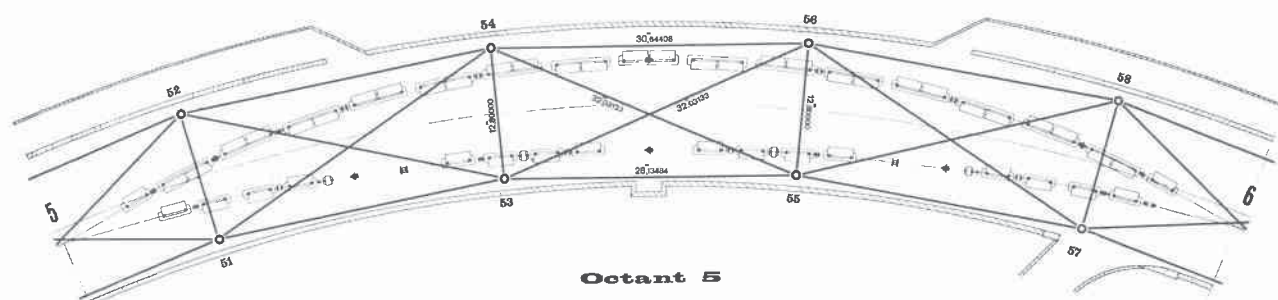


Figure 3

1966 - 1971 : Construction des ISR. Grâce à la maîtrise des mesures de distances avec le Distinvar acquise par le Groupe, une nouvelle figure de référence est conçue pour les anneaux de stockage, avec suppression des tunnels radiaux. Ce sera une chaîne de quadrilatères complets, dont les sommets seront matérialisés par des piliers ancrés dans la molasse et qui nécessitera uniquement des mesures de distances (figure 3).

Installation d'une nouvelle base d'étalonnage pour les fils d'invar. On ne conserve de l'ancienne du PS que la règle étalon de 4 m et les microscopes de lecture d'appoint. On utilise le Distinvar automatique pour les mesures de distances et l'écartomètre au fil nylon pour l'alignement final des aimants des anneaux. Le 27 janvier 1971 : mise en marche des ISR.

III - 1971 - 1980 : LE SPS

Super Proton Synchrotron
Super Synchrotron à Protons

Après l'échec des négociations (fin janvier 1970) relatives au choix d'un nouveau site en Europe, démarrage des sondages et de l'implantation du SPS sur un terrain voisin du Laboratoire du CERN. Les sondages montrent alors que l'on peut construire un synchrotron à protons de 2 200 m de diamètre dans l'anticlinal de molasse de Chouilly, Suisse, qui se prolonge en France.

Jusqu'au début des travaux souterrains du SPS, l'équipe du Groupe de Géodésie s'était constituée en fonction des circonstances, sans systématisme aucun, mais surtout en fonction des besoins. Son succès n'en fut pas moins certain. C'est le groupe, chargé de la géométrie de surface, du contrôle et de l'entretien géodésique et dimensionnel du PS, des ISR, qui se voyait confier les travaux de la géodésie du futur SPS.

Grâce au succès du PS et des ISR, le groupe commençait à être connu à l'extérieur ; des camarades de l'IGN, des géomètres vinrent alors visiter le CERN. Mais c'est surtout grâce à l'appui de

mon ami Frédéric Coutel, Directeur de l'ESGT, et à ses demandes repérées auprès de l'Ordre des Géomètres-Experts, que celui-ci m'accepta comme Maître de stages, servant à l'obtention du Diplôme de Géomètre-Expert, pour une durée d'un an d'abord, puis devant le succès des stages et les besoins pressants du Groupe de Géodésie, pour une période de deux ans.

A l'IGN, Messieurs Laclavère et Levallois, entre autres, avaient toujours suivi les travaux du CERN avec intérêt et même détaché deux ingénieurs au Groupe. La reconnaissance par un organisme officiel, l'Ordre des Géomètres-Experts, me donnait la possibilité d'un recrutement de qualité : mon premier stagiaire fut Jean-Pierre Quesnel. Il est toujours au CERN, ainsi que son camarade Christian Lasseur, tous deux responsables de deux sections du Groupe. A la suite de ce succès avec les autorités françaises, je me tournai alors vers nos amis anglais : le RICS, Royal Institution of Chartered Surveyor ne fit aucune difficulté pour me confier des «Probationers» - stagiaires anglais - pour une durée équivalente de deux ans. L'équipe prenait alors une dimension internationale mais devenait surtout un noyau formateur officiellement reconnu. Il me fut impossible d'aller plus avant dans la recherche d'organismes nationaux car le cursus universitaire de ces pays ne comportait pas, en général, des stages d'aussi longue durée qu'en France et en Angleterre.

Une nouveauté : construire un accélérateur dans un tunnel profondément installé dans une roche relativement homogène : la molasse. Sans compter les tunnels de transfert, ceci implique : une géodésie de surface, la descente des verticales et, pour guider la foreuse, l'emploi du gyroscope, instrument dont tous les confrères se méfiaient comme de la peste, ce qui n'était pas encourageant pour décider de l'utilisation d'un tel appareil. Le gyrothéodolite : la galère d'après notre spécialiste au CERN, Gabriel Trouche. Pour résumer, laissez-moi citer ici le Professeur Wolfgang Paul, dans son discours du 7 mai 1977 lors de l'inauguration du SPS de 400 GeV.

«Le tunnel dans lequel l'accélérateur a été installé a été foré dans le rocher par une énorme foreuse, à la vitesse de 20 m par jour. Son système de guidage était un gyro-théodolite dont la référence était l'axe de rotation de la Terre. Après avoir foré la circonférence de 7 km, la foreuse est retournée à son point de départ avec une erreur de 1 cm seulement. Cette prouesse, ainsi que l'alignement subséquent des aimants dans le tunnel est sûrement un chef d'œuvre de la technologie des mesures géodésiques». Merci, Monsieur le Professeur.

Et maintenant, les calculs. Fin 1954, à l'IGN, on attendait le premier ordinateur. Au CERN, jusqu'en 1960 : moindres carrés, Friden électrique et tables de valeurs naturelles à 8 décimales. Dès 1961, les premiers ordinateurs apparurent au CERN et furent utilisés entre autre pour les calculs de mesures sur les sites, l'étude des résultats, les simulations pour les ISR et les calculs de la figure de référence.

Avec l'arrivée de Michel Mayoud au début du SPS : développement du calcul électronique et du traitement des données. Ceci permit, en 1977, l'organisation au CERN d'un Workshop du 1er au 4 mars : «Traitement des grandes matrices particulières en géodésie - interprétation des résultats» sous l'égide de l'Association Internationale de Géodésie. Comparaison des deux méthodes fondamentales : élimination selon Choleski, gradients ou résidus conjugués selon J.-M. Dufour pour l'implantation des aimants du SPS (1 000 équations). Ces problèmes, en géodésie, portent actuellement sur 10'000 - 100'000 - 1'000'000 d'équations.

Pour l'installation des aimants, nous parvinrent à une automation presque totale du matériel du groupe et à la mise au point d'un système laser pour l'écartomètre - qui servit à doubler l'écartomètre à fil nylon - pour la mesure des diagonales de la figure de référence et l'installation des aimants.

Le 17 juin 1976, à 15h35, le SPS accélérât des protons à 400 GeV. Peu de temps après, un interféromètre avec récepteur asservi fut mis au point, ce qui supprimait la nécessité des rails et permettait une utilisation aussi précise mais beaucoup plus souple.

IV - 1980 - 1988 : LE LEP

Large Electron Positron Collider
Collisionneur d'Electrons-Positons

L'explosion : un anneau de 29 km de circonférence, enfin, un vrai réseau géodésique (figure 4).

De nouveau, piliers centrage forcé, uniquement des mesures de distances. La trilatération, mesurée au Terramètre - Electro-magnetic Distance Measurement - EDM à deux fréquences. Un

monstre en voie de disparition. Précision de la mesure 10^{-7} de la distance séparant deux points.

Puis - mais est-ce de la chance ? - l'apparition des satellites artificiels GPS Navstar. La mesure du réseau de base est effectuée au Terramètre, du 11 au 16 décembre 1984, avec trois récepteurs Macrometer V.1000. Plusieurs calculs ont été réalisés afin d'évaluer les effets de divers éléments tels que la précision des données orbitales ou l'influence de l'ionosphère. Il est particulièrement remarquable que ces facteurs aient altéré l'échelle de la figure GPS sans distorsion notable. En effet, dans tous les cas, l'adaptation de comparaison avec les coordonnées issues des mesures de distance avec le Terramètre a été caractérisée par un écart-type inférieur à 4 mm.

Et maintenant, en guise de conclusion, l'observation critique, la recherche des signes, les remises en question successives...

L'utilisation des satellites GPS Navstar, combinée avec celle des satellites GLONASS, va devenir l'outil de demain.

Attention : les coordonnées XYZ obtenues à partir de GPS sont calculées dans le système géodésique de référence WGS84. Ce sont des coordonnées ellipsoïdales. Pour les travaux exécutés en France métropolitaine, le système de référence et de coordonnées de la nouvelle triangulation de la France (NTF) est un système bidimensionnel qui fournit les coordonnées dans l'une des quatre zones Lambert.

L'altitude géométrique nécessaire en géodésie spatiale n'est pas diffusée. Les altitudes IGN 69 fournissent les altitudes orthométriques. Le géoïde est une surface équipotentielle du champ de pesanteur, voisine du niveau moyen des mers.

Si h : altitude au-dessus de l'ellipsoïde, H : altitude orthométrique par rapport au géoïde, N : cote du géoïde

$$h = H + N$$

La méconnaissance du géoïde ou de ses oscillations, même sur des zones peu étendues, induit des différences non négligeables entre H et h - Attention danger !

V - CONCLUSION

Ce résumé très rapide montre bien l'évolution des mesures de précision durant la période 1955 - 1986. Michel Mayoud, mon successeur au CERN, décrira dans le prochain numéro (XYZ n° 50) la géodésie d'installation des composants du LEP dans les tunnels de transfert et le long des 29 km de l'anneau principal, ainsi que l'installation des expériences dans les quatre zones prévues à cet effet.

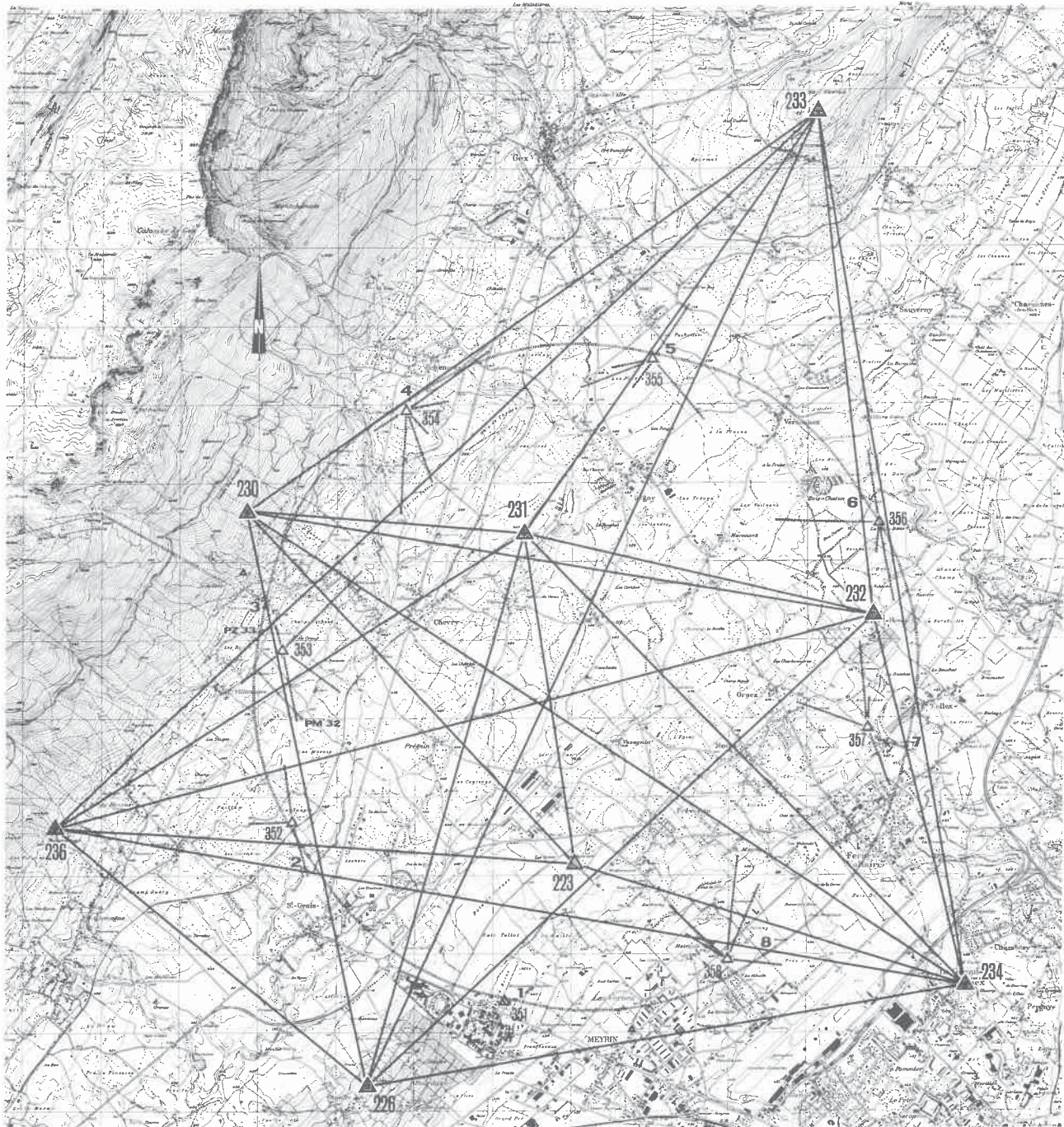


Figure 4
Le nivellement de précision - mesure de g. Fermeture des
boucles inférieure à 3 mm.



Figure 5