

# MÉTROLOGIE :

## Une source d'économie pour l'Entreprise

*par le Docteur Jean Gervaise - CERN*

As a first approximation, it is generally believed that accuracy is costly in terms of time, money and staff. The term "costly" is misleading and only used for budget purposes. The speed and accuracy with which the CERN Survey Group installed the quadrupole and dipole magnets in the Super Proton Synchrotron (SPS) tunnel resulted in substantial savings. Only two months elapsed between the moment when protons were first injected into the accelerator and when they reached the design energy of 400 GeV at an intensity of  $3 \cdot 10^{12}$  protons per pulse. This time would certainly have been greater if the elements in the ring had not been installed within the prescribed tolerances. Although it is impossible to place a monetary figure on the time saved by CERN, it is likely to have been considerably greater than the budget of the Survey Group.

J. Gervaise  
" Geodesy and Metrology at  
CERN - A Source of Economy  
for the SPS Programme "  
CERN 76-19/SPS, 17.11.1976

### SUMMARY

At CERN, precision requirements necessitated the development of a specialized technique, which led to substantial financial savings. As result, the large-scale accelerators were able to operate at the planned intensities and luminosities right from the moment of the switch-on, and on the scheduled date. The Survey Group provided the technical assistance expected of it. It is not alone in claiming its part in this achievement, but its contribution was nonetheless very considerable.

At the outset, the support given to the experimental teams in setting up physics experiments was purely empirical. Today, the very size of the large detectors and their high resolution require the use of a specially adapted form of industrial metrology. Wherever possible, repeated microtriangulations are backed up by photogrammetric measurements.

To achieve the above mentioned precision, the Survey Group took certain major options. One of these was, without any doubt, the intensive use of distance measurements. The present paper gives a detailed description of six instruments which were entirely designed and built by the Group's Mechanics and Electronics Section. Not all of them are fully versatile, indeed they are specifically used for high-precision survey measurements at CERN. Others, however, are already being used both inside and outside the laboratory or are the centre of great hopes for the future of metrology. They are not only reliable and high-quality instruments but also offer major savings, is the accuracy/measurement-time ratio is taken into account.

### RESUME

Au CERN, les exigences de précision ont donné lieu à une méthodologie spécifique, qui a conduit à des économies substantielles. Les grands accélérateurs ont fonctionné dès leur mise en service, à la date prévue, avec les intensités et les luminosités espérées. Le Service de Géodésie et des Sciences de la Terre a apporté le support technique que l'on attendait de lui. Il n'est pas le seul service à pouvoir revendiquer ces succès, mais sa part n'en a pas moins été très importante.

L'appui donné aux équipes expérimentales pour l'installation des expériences de physique a commencé d'une façon très artisanale. Aujourd'hui, les dimensions des grands détecteurs, leur finesse de résolution, exigent l'adaptation d'une métrologie industrielle. Aux microtriangulations répétées viennent s'ajouter, quand cela est possible, des mesures photogrammétriques.

Les exigences de la précision ont obligé le Service de Géodésie et des Sciences de la Terre du CERN à prendre des options capitales. L'une d'elles a été sans aucun doute l'emploi intensif des mesures de longueurs et l'abandon des mesures angulaires. Dans cet exposé, on trouvera la description détaillée de six instruments, qui ont été entièrement développés et construits par la Section de Mécanique et d'Électronique du Groupe. Ils ne sont pas tous d'un emploi universel, leur utilisation reste spécifique de la métrologie du CERN. Par contre, d'autres sont déjà utilisés hors du laboratoire ou sont porteurs d'une grande espérance quant à la métrologie future. Ils apportent une instrumentation fiable et de haute qualité et également une économie importante, si l'on veut bien prendre en considération le rapport précision-temps consacré aux mesures.

---

## TABLE DES MATIÈRES

---

	Page
I. Les exigences de précision .....	1
II. Les exigences de la précision .....	11
II.1. Les retombées technologiques du CERN .....	11
II.2. La base d'étalonnage du CERN .....	12
II.3. Les instruments de mesure de longueur .....	14
II.3.1. Le Distinvar .....	14
II.3.2. L'Interféromètre à réflecteur asservi .....	16
II.4. Les systèmes d'alignement .....	20
II.4.1 Le système d'alignement au fil nylon .....	20
II.4.2 Le système d'alignement laser à récepteur asservi .....	22
II.5. Les appareils de nivellement et de clinométrie .....	25
II.5.1. Le niveau hydrostatique automatique .....	25
II.5.2. Le clinomètre électronique .....	27
III. Conclusion .....	31
Bibliographie .....	33

---



---

## TABLE DES FIGURES

---

	Page		Page
1 : Équipement entourant l'aimant à champ inversé dans l'intersection 4 des ISR .....	3	12 : Schéma de principe de l'interféromètre laser à réflecteur asservi .....	17
2 : Correction de l'orbite fermée horizontale et verticale au moyen du déplacement de trois quadrupoles dans le sens radial et de deux quadrupoles dans le sens vertical - il y a en tout 216 quadrupoles au SPS .....	4	13 : Réflecteur asservi vu de face .....	18
3 : Expérience WA1 - détecteur neutrino avec chambres à dérive intercalées .....	5	14 : Réflecteur asservi vu de profil .....	19
4 : Grande chambre à bulles européenne (BEBC) - installation des chambres à muons périphériques (EMI) .....	6	15 : Détecteur du système d'alignement au fil nylon - schéma de principe .....	21
5 : Projet LEP - schéma d'implantation .....	7	16 : Détecteur et boîte de commande du système d'alignement au fil nylon .....	21
6 : Alésage verticalisable type CERN pour centrage forcé .....	11	17 : Système d'alignement laser à récepteur asservi - en fonctionnement dans l'anneau SPS .....	23
7 : Interféromètre laser et diviseur de lumière dans la base d'étalonnage CERN .....	12	18 : Schéma de principe du système d'alignement laser à récepteur asservi .....	24
8 : Coin de cube monté sur le chariot de la règle de 4 m (base d'étalonnage CERN) ..	13	19 : Niveau hydrostatique automatique .....	25
9 : Distinvar - appareil de mesure des appoints, fil d'invar, point fixe .....	15	20 : Schéma de principe du niveau hydrostatique automatique .....	26
10 : Schéma de l'appareil de mesure des appoints du Distinvar .....	15	21 : Clinomètre électronique - schéma de la suspension de la masse .....	28
11 : Interféromètre laser à réflecteur asservi ..	17	22 : Schéma de principe du clinomètre électronique .....	28
		23 : Clinomètre électronique vu de face .....	29
		24 : Clinomètre électronique vu de profil (noter les fils de suspension) .....	29



## I. LES EXIGENCES DE PRÉCISION

La définition du mot *précision* a fait l'objet d'un grand nombre de développements dans tous les ouvrages traitant de métrologie, de géodésie et, en général, dans tous les livres scientifiques, puisqu'en fait, c'est un qualificatif qui est lié au mot *mesure*.

L'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire a pour vocation de construire les accélérateurs de protons de classe internationale et de faire, autour des accélérateurs ou des anneaux de stockage à intersections, la physique fondamentale liée aux particules. Voici le troisième mot clé employé : *physique*. Il forme avec les deux premiers : " précision ", " mesure ", le triptyque majeur de la science du 20<sup>e</sup> siècle.

C'est à partir de ces notions qu'il est possible de dégager la spécificité du domaine des mesures au CERN et de définir le créneau dans lequel elles s'insèrent.

Il est facile de donner la *limite inférieure* d'emploi des techniques mises au point par le Service de Géodésie et des Sciences de la Terre. Ces techniques commencent là où les dimensions des *objets* à mesurer interdisent l'emploi des techniques de la métrologie d'atelier.

Au début du CERN, en 1954, le Groupe de mesure devait installer *cent aimants* sur une courbe compliquée, dont le rayon moyen était de 100 m. Les paramètres agissant directement sur les protons circulant à une vitesse voisine de celle de la lumière dans le système de confinement magnétique du Synchrotron à protons de 28 GeV (PS) étaient :

- l'écart radial  $\delta r$ , écart à la courbe théorique,
- l'écart vertical  $\delta h$ , écart au plan de définition de l'accélérateur,
- le tilt  $\delta \theta$ , variation de l'inclinaison transversale des aimants.

La figure de référence était un octogone à point central. Il était possible de mesurer physiquement les huit rayons et d'obtenir ainsi les coordonnées tridimensionnelles des huit piliers périphériques. A partir de ces piliers, les aimants étaient installés dans le tunnel de l'accélérateur. En janvier 1960, le PS fonctionnait régulièrement. Il fallut alors mettre en place et aligner les éléments magnétiques des faisceaux de transfert conduisant les particules des cibles internes aux détecteurs situés dans les halls d'expériences Sud et Nord.

Une méthodologie spécifique avait été développée pour la métrologie de l'accélérateur. Ce furent, par

contre, des méthodes artisanales, au coup par coup, qui permirent de satisfaire les besoins de la physique.

Les travaux de construction des anneaux de stockage à intersections (ISR) commencèrent en 1967. On doit noter immédiatement la différence d'échelle des travaux confiés au Groupe de Métrologie, par rapport à ceux effectués au PS. Si l'augmentation du rayon moyen des anneaux, 150 m par rapport à 100 m, n'était pas significative, la circonférence totale des deux anneaux situés dans le même tunnel représente deux kilomètres. Les tunnels de transfert entre le PS, utilisé comme injecteur, et les ISR sont également longs de deux kilomètres. L'ensemble représente donc plus de quatre kilomètres de tunnels dans lesquels il fallait installer et aligner quelque 2 000 éléments fonctionnels. L'apparition des ordinateurs et une bien meilleure analyse des besoins par les responsables des orbites des protons, permirent de supprimer les tunnels radiaux tels qu'ils avaient été utilisés au PS et de réaliser ainsi une sérieuse économie du coût du génie civil.

Les ISR fonctionnèrent en 1971. L'installation des expériences dans les huit zones d'intersections commencèrent à donner sérieusement à réfléchir. L'utilisation de cibles mobiles, les protons circulant dans un des anneaux se heurtant aux protons circulant en sens inverse dans l'autre anneau, nécessita l'installation de détecteurs de plus en plus gigantesques afin de couvrir le volume complet entourant les zones d'interaction (figure 1). L'embryon d'une méthodologie pour l'installation des expériences apparaissait. Elle fait appel à des microtriangulations très structurées, qui restent longues à exécuter, mais donnent des résultats qui doivent sans cesse s'améliorer puisque les définitions géométriques des détecteurs et leurs résolutions vont elles aussi en s'améliorant. Il n'est plus possible que la métrologie d'installation fasse perdre quoi que ce soit à la métrologie de construction mécanique des chambres de détection.

La construction du Super Synchrotron à Protons (SPS) fut décidée en 1971 et les travaux commencèrent aussitôt. Le rayon moyen de cet accélérateur est de 1.100 m, soit une circonférence de sept kilomètres. L'expérience acquise lors de l'installation des aimants du PS et des ISR permit de définir dès le début la méthode et les instruments qui devaient servir à l'installation des 216 lentilles quadrupolaires et des 744 aimants dipolaires, ainsi que des aimants de correction dipolaires, sextupolaires et octupolaires, nécessaires pour améliorer l'orbite des protons circulant.



Pour la première fois au CERN, le SPS était une grande machine à fonctions séparées. En effet, au PS et aux ISR, les aimants à profil polaire hyperbolique assuraient simultanément la courbure et la focalisation du faisceau de protons.

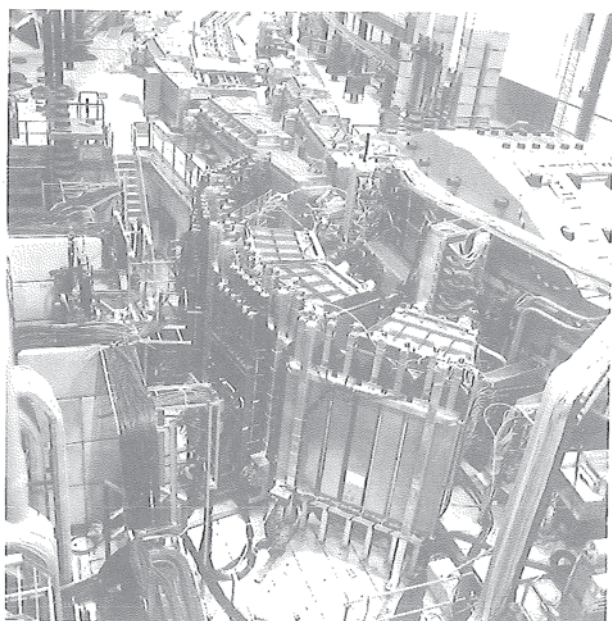


Fig. 1

Dans une machine à fonctions séparées, la courbure est assurée par des dipôles simples, et la focalisation par un nombre relativement restreint de quadrupoles. L'effort du Groupe de Métrologie se porta donc sur l'installation des lentilles quadrupolaires qui définissent la géométrie du faisceau. En déplaçant radialement ou verticalement une ou plusieurs lentilles de la maille normale, choisies après calculs de simulation et décomposition en série de Fourier, on peut améliorer l'orbite des protons (figure 2). Cette figure démontre la compréhension par les responsables de l'orbite de la corrélation étroite qui existe entre l'orbite fermée et la géométrie de l'accélérateur.

En plus des sept kilomètres du SPS, les tunnels d'injection, le PS servant là aussi d'injecteur, et d'éjection vers les zones expérimentales Ouest et Nord, abritent plus de dix kilomètres de faisceaux de transfert amenant les protons accélérés sur des cibles fixes, puis les particules sur les détecteurs.

Les dimensions de ces détecteurs deviennent de plus en plus grandes (figure 3). Le détecteur neutrino de l'expérience WA 1, utilise 1 500 tonnes d'acier magnétisé et des chambres à dérive installées entre les éléments magnétiques. Ces chambres permettent la reconstruction des trajectoires des muons de haute énergie produits par des neutrinos de plusieurs centaines de GeV.

La figure ci-contre donne une très bonne idée de la dimension de cette expérience, qui n'est pas une des plus gigantesques du CERN. La précision avec laquelle les traces des particules sont déterminées est inférieure à 1 mm. Il est bien évident que la géométrie

doit assurer, lors du contrôle mécanique des aimants et des chambres, et lors de l'installation de l'ensemble, une homogénéité, dans le référentiel propre de l'expérience, de quelques dixièmes de millimètre.

Il y a actuellement autour du SPS quelque 40 expériences installées dans la zone d'expérience Ouest et dans les trois halls de la zone Nord.

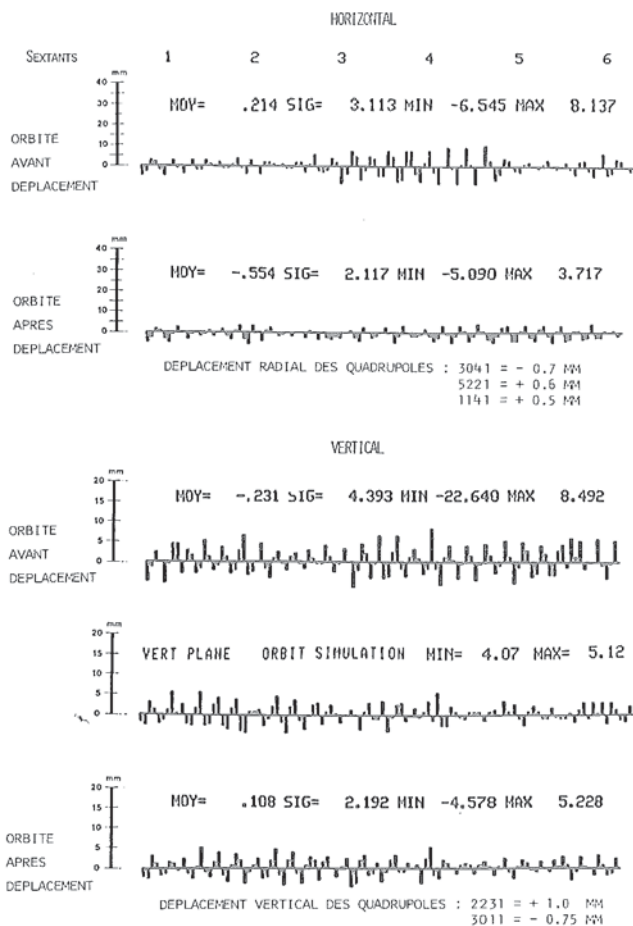


Fig. 2

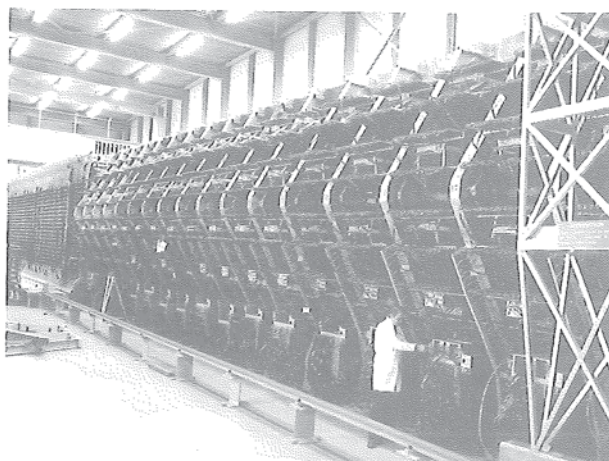
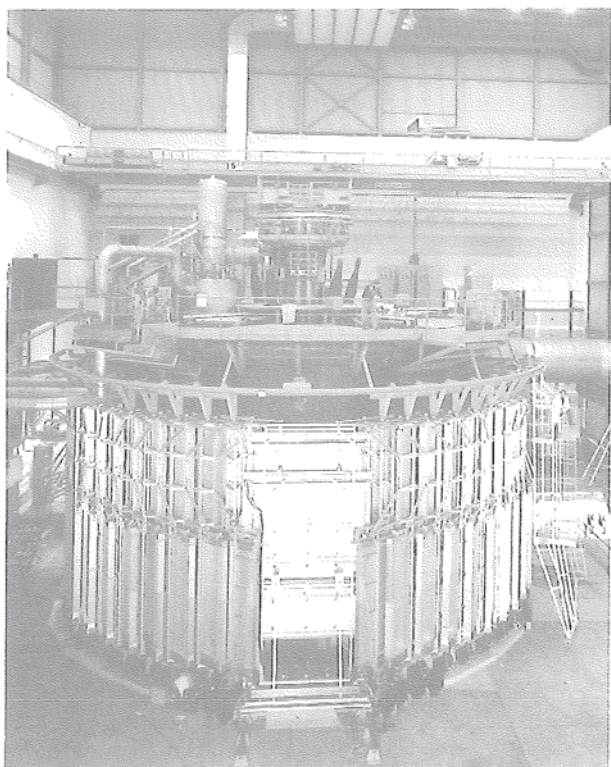


Fig. 3

Petit à petit, on voit se dessiner une technologie propre à ces travaux et apparaître la nécessité de la formation d'un personnel de plus en plus spécialisé.





Dans le même esprit, le champ des méthodes s'élargit et, en plus des triangulations, trilatérations, on fait appel à la photogrammétrie analytique, par exemple, lors de l'installation des détecteurs de muons autour de la grande chambre à bulles européenne (BEBC). La photogrammétrie apporte un élément essentiel, celui de la saisie rapide des données, et donc une diminution de la gêne causée aux physiciens. Par contre, le dépouillement des photos fait perdre l'avantage de la rapidité. L'homogénéité des mesures a permis d'assurer 0,3 à 1,2 mm en fonction de l'éloignement (figure 4).

La limite supérieure d'emploi des techniques de géodésie et de métrologie va commencer à se préciser avec la construction d'un très grand anneau de stockage d'électrons et de positons (LEP), qui permettra à la communauté internationale des physiciens de concrétiser les nouveaux modèles de la physique des particules durant les deux dernières décades de ce siècle. La circonférence de l'anneau de stockage atteindra 30 km (figure 5).

Fig. 4

Fig. 5





Dès 1976, un groupe fut créé au CERN pour l'étude d'un anneau de collision électron-positon, anneau dans lequel chaque faisceau serait porté à des énergies pouvant aller de 70 à 100 GeV, voire au-delà.

Si, pour la première fois au CERN, on envisage d'abandonner les protons au profit des électrons, c'est que la structure interne des électrons (particules élémentaires) ne manifeste, au contraire des protons, aucune propriété, ni structure liée aux interactions fortes.

#### Les quatre interactions fondamentales.

<p>■ Les particules élémentaires interagissent entre elles à travers quatre types d'interactions, que l'on peut isoler à cause de leurs caractéristiques très différentes.</p> <p>Les essais d'unification entre les différentes formes d'interaction ont été nombreux. L'unification de l'électromagnétisme et de l'interaction faible peut être reliée aux nouveaux phénomènes décrits dans cet article.</p>				
type d'interaction	particules concernées	force de l'interaction	distance d'action	phénomènes résultants
forte	hadrons	$10^{-1}$	$10^{-15}$ cm	cohésion du noyau, fusion, fission
électromagnétique	hadrons leptons chargés photon	$10^{-2}$	infinie	électricité, magnétisme, ondes radio et optique, rayons X et $\gamma$ , structure des solides, liaisons chimiques
faible	hadrons leptons chargés leptons neutres	$10^{-16}$	$< 10^{-16}$ cm	désintégration $\beta$ des noyaux et des particules étranges, courant neutre
gravitation	hadrons leptons chargés leptons neutres photon	$10^{-38}$	infinie	attraction universelle de Newton, pesantueur, courbure de l'espace-temps

Les *hadrons* sont les seules particules à être soumises aux interactions fortes. On les considère aujourd'hui comme composés d'entités appelées *quarks*.

On connaît huit *leptons*, particules toutes plus légères que les hadrons et qui n'ont pas d'interactions fortes. Les leptons, chargés électriquement, électrons et muons négatifs et leurs antiparticules, positons et muons négatifs, ont des interactions électromagnétiques et des interactions faibles. Les leptons neutres, neutrinos du type électron et neutrinos du type muon et leurs antiparticules, les antineutrinos correspondants, n'ont que des interactions faibles. Les leptons chargés et les leptons neutres peuvent se transformer l'un en l'autre dans les interactions faibles dues au courant chargé, mais à condition de conserver le nombre leptonique, électronique ou muonique dans l'interaction.

La théorie de WEINBERG-SALAM permet de prévoir la masse des *bosons vecteurs intermédiaires* chargés ( $W^\pm$ ) aux alentours de 60 GeV et la masse du boson neutre ( $Z^0$ ) autour de 80 GeV.

Les collisions  $e^+e^-$  à haute énergie seront le terrain privilégié pour les recherches sur les interactions faibles. Elles devraient aussi produire de très nombreux résultats dans le domaine des interactions fortes. S'il est possible de communiquer à des quarks des impulsions de l'ordre de 100 GeV, ou bien ils s'échapperont, ou bien on apprendra beaucoup sur les forces qui les maintiennent confinés.

C'est donc en raison de l'importance primordiale de ces études qu'il a été décidé que le LEP puisse atteindre l'énergie suffisante pour la production de paire de bosons, avec un équipement "conventionnel", c'est-à-dire non supraconducteur. Ceci sera envisagé dans une phase postérieure au projet. Ces considérations déterminent la circonférence de LEP et ont une influence directe sur la géodésie.

La géodésie de surface, dont le rôle reste essentiel dans la définition de la figure géométrique d'accélérateurs de cette dimension, sera effectuée uniquement par trilatération. Toutes les mesures de distances seront faites avec le Terrameter LDM2. Cet appareil utilise deux lasers, l'un Hélium-Néon, d'une longueur d'onde de 632.8 nanomètres (rouge), l'autre Hélium-Cadmium, d'une longueur d'onde de 441,6 nanomètres (bleu). Un microprocesseur programme une unité de lecture qui fournit en permanence la distance corrigée à partir des données issues du système optique. L'utilisation des lasers, dans deux gammes d'ondes différentes, et le système de compensation éliminent les erreurs dues aux variations de l'atmosphère le long de la ligne de visée.

Le Terrameter est utilisable pour toute distance comprise entre 1 et 15 km et la précision annoncée est de  $1.10^{-7}$  de la longueur mesurée. Ceci permettra de résoudre le problème de la forme de la figure géométrique de LEP.

L'anneau de stockage à électrons — machine à fonctions séparées — est très sensible aux déformations de l'orbite fermée et dépend donc de la précision avec laquelle pourra être effectuée la mise en place des quadrupoles dans le tunnel.

Dans le projet LEP, actuellement à l'étude, les coefficients d'amplification des erreurs d'alignement, définis comme les rapports des *déformations maximum de l'orbite fermée*, à des endroits parfaitement définis de la circonférence, et la *valeur de l'erreur moyenne quadratique relative d'alignement calculée pour toutes les quadrupoles* sont les suivants :

— dans le plan horizontal	
Quadrupole Q2	290
Quadrupole Q12	370
Quadrupole QF de la maille normale	200
— dans le plan vertical	
Quadrupole Q1	529
Quadrupole Q11	437
Quadrupole QD de la maille normale	257

Pour donner un autre exemple de la sensibilité de LEP aux erreurs d'alignement, ainsi que la possibilité de corriger les distorsions de l'orbite fermée en déplaçant volontairement une ou plusieurs quadrupoles, il est possible de définir un autre facteur d'amplification.

Ce sera le rapport entre la *valeur du déplacement d'une seule quadrupole d'une quantité donnée et les valeurs des distorsions de l'orbite fermée aux endroits les plus sensibles*, soit dans les insertions à faible  $\beta$ ,

— dans le plan vertical	
Quadrupole Q11 :	70
— dans le plan horizontal	
Quadrupole Q12 :	40



Pour les quadrupoles QF et QD de la maille courante, ce rapport n'est que de 4. On voit ainsi apparaître, dans le plan horizontal, un facteur 10 entre les valeurs du coefficient d'amplification pour les quadrupoles QF et QD de la maille normale et celles des insertions à faible  $\beta'$ .

C'est donc la recherche d'une méthodologie et d'une technologie nouvelle qui va obliger à améliorer et à développer les instruments et les méthodes de calcul qui sont aujourd'hui à notre disposition. Entre les deux limites que l'on vient de définir, la métrologie nécessitera plus d'électronique, plus de microprocesseurs, une meilleure saisie des données et une meilleure analyse des résultats.

La démonstration de la nécessité de la précision apparaît dans les valeurs des coefficients d'amplification des erreurs de mesures. Les défis successifs lancés au Service de Géodésie et des Sciences de la Terre, ont toujours été relevés. Tous les accélérateurs du CERN, jusqu'à aujourd'hui, ont fonctionné dès leur mise en service, dans les limites du budget. Il a fallu des mois, voire des années, à d'autres accélérateurs ou anneaux d'intersections pour atteindre le niveau d'exploitation prévu. Ceci n'est sans doute par le fait uniquement de la métrologie, mais celle-ci a joué un rôle majeur dans le succès des accélérateurs du CERN.

Peut-on alors donner le CERN en exemple pour les travaux de métrologie ? Bien que très difficiles à chiffrer, les économies réalisées par le fonctionnement instantané des accélérateurs du CERN, dès leur mise en service, dépassent certainement très largement le budget du Service de Géodésie.

Si, au CERN, l'exigence de précision poussée à l'extrême a été une nécessité absolue, en est-il de même dans tous les domaines d'activités qui font appel à la métrologie ? C'est sans doute là le point crucial du *coût des mesures*. Sans qu'il soit nécessaire de philosopher longuement sur ce sujet, ce sont aux ingénieurs responsables des projets de définir les exigences de précision en fonction de leurs besoins réels et non des bénéfices financiers qu'ils espèrent tirer d'une métrologie sophistiquée et de l'utilisation d'instruments aux noms aussi compliqués qu'alléchants.

Les retombées technologiques des instruments développés au CERN nous ont montré que ceux-ci étaient trop souvent utilisés par des personnels qui n'en comprenaient ni le fonctionnement, ni la finalité de précision et ceci a été pour nous une très grosse déception. Par contre, d'autres utilisateurs se sont conformés aux exigences et aux soins que de tels instruments requièrent et les résultats des mesures ont dépassé leurs espérances.

Pour la compréhension du texte, il est nécessaire de définir la notion de *précision*. Elle sera définie dans tout ce qui va suivre en *écart-type* ou *écart moyen quadratique*, probabilité 0.683 de ne pas être dépassée.

## II. LES EXIGENCES DE LA PRÉCISION

### II.1. Les retombées technologiques du CERN

L'exigence de précision, qui a été définie dans le chapitre précédent, nécessite une méthodologie et une instrumentation particulières. Ce sera le but de ce chapitre, dans lequel les nouveaux instruments de mesure employés au CERN seront décrits. Il ne sera pas fait mention du théodolite à gyroscope, qui a été présenté au cours des Journées d'Étude des 5 et 6 mars 1974, journées organisées à Meyrin conjointement par le CAST et le CERN, et consacrées à la "Topométrie souterraine". Des améliorations ont été depuis lors apportées à cet appareil, mais elles ne présentent rien de fondamental par rapport à ce qui a été publié en 1974. De même, la méthodologie des calculs de compensation ne sera pas exposée ici. Les Journées d'Étude du 1<sup>er</sup> au 4 mars 1977, consacrées au "Traitement des grandes Matrices particulières en Géodésie — Interprétation des Résultats", organisées par l'AIG (Association Internationale de Géodésie), le CAST et le CERN, ont très largement couvert ce sujet qui reste toujours d'actualité.

Il est entendu une fois pour toutes que les mesures sont toujours effectuées sur des alésages verticalisables type CERN, permettant un centrage forcé (figure 6).

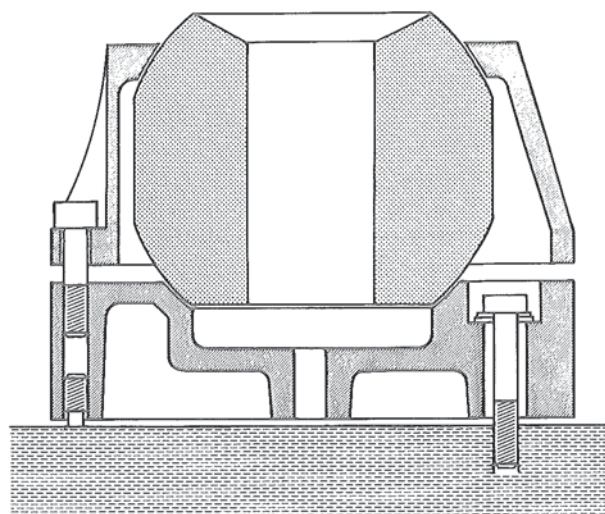


Fig. 6

### II.2. LA BASE D'ÉTALONNAGE DU CERN

L'étalon primaire, servant aux étalonnages des fils d'invar, était constitué d'une règle en invar de 4 m, fabriquée et étalonnée par la SIP à Genève en 1962. Cette règle est graduée tous les mètres et son premier mètre est divisé en millimètres. L'évolution de cette règle d'invar est contrôlée par l'intermédiaire d'une règle de 1 m en invar, tirée de la même coulée, qui est envoyée périodiquement au BIPM pour être étalonnée.



La base d'étalonnage CERN est installée dans une galerie souterraine de 70 m de long, dont la section est un carré de 2,50 m. L'épaisseur de la couverture de terre et un système de climatisation élaboré permettent de garantir une stabilité en température de  $\pm 0,5^\circ \text{C}$ . Une des parois du tunnel a été coulée en un seul bloc et c'est de ce côté que sont installés tous les microscopes de lecture. L'étalon primaire de 4 m est monté sur un chariot qui peut parcourir les 57 m de la base proprement dite sur un système de rails continus. La position de cette règle est repérée par un ensemble de microscopes fixes et de microscopes mobiles. Les quatorze microscopes fixes reposent tous les 4 m sur des supports le long des 48 premiers mètres de la base. Les microscopes mobiles reposent sur un banc continu de 9 m. L'utilisation de la règle et des microscopes se fait de façon tout à fait traditionnelle par la méthode des reports.

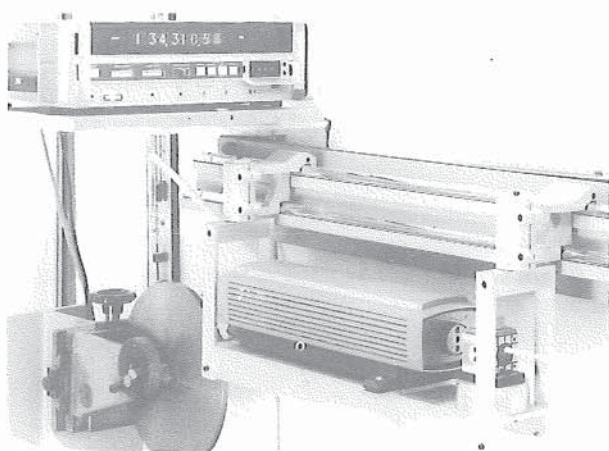


Fig. 7

En 1972, on décida de doubler l'étalon primaire en invar par un autre étalon primaire : la fréquence de l'interféromètre Hewlett Packard. L'interféromètre et son diviseur de lumière ont été installés à l'origine de la base d'étalonnage (figure 7), c'est-à-dire sur le premier demi-mètre des goupilles de positionnement des microscopes mobiles. Afin de pouvoir faire des mesures simultanées avec les deux étalons primaires, le réflecteur mobile de l'interféromètre a été fixé sur le chariot de la règle d'invar (figure 8). Ainsi, l'ensemble interféromètre, réflecteur mobile, règle d'invar, microscopes de lecture forme un tout et l'on peut, au choix, passer de l'un à l'autre pour étalonner les fils d'invar qui sont utilisés à l'extérieur de la base.

La tendance actuelle est d'utiliser uniquement l'interféromètre laser pour l'étalonnage des fils. En effet, depuis 1975, la concordance parfaite des résultats d'étalonnage obtenus avec la règle de 4 m et ceux obtenus avec l'interféromètre est à l'origine de cette décision. La règle de 4 m sert encore, pour des contrôles ponctuels, mais de moins en moins souvent. On est d'ailleurs en train de construire de nouveaux chariots pour le réflecteur mobile afin de ne plus utiliser du tout la règle de 4 m. Elle restera cependant opérationnelle en cas de besoin.

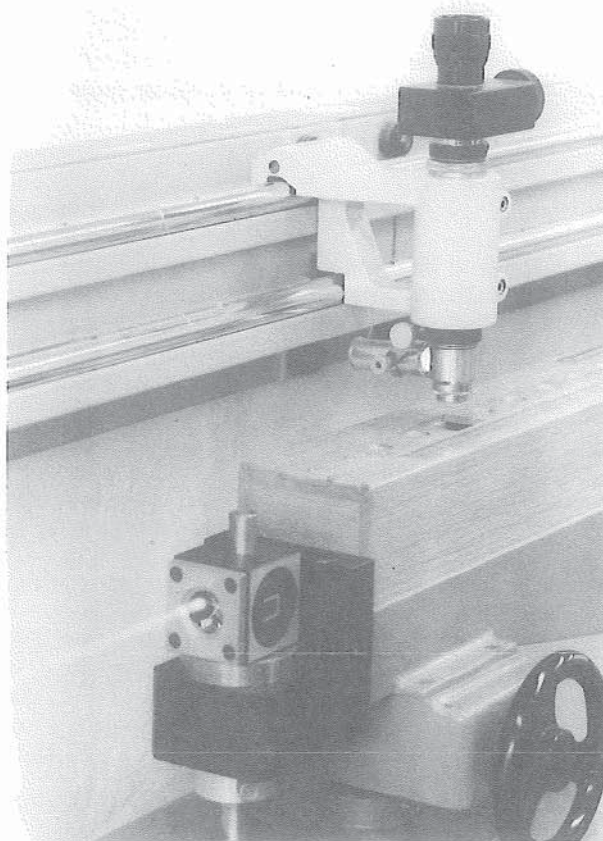


Fig. 8

## II.3. LES INSTRUMENTS DE MESURE DE LONGUEUR

### II.3.1. Le Distinvar

L'appareil automatique de mesure de distance, appelé Distinvar, développé au CERN depuis 1961, a été déjà longuement présenté. Comme il reste encore actuellement l'instrument le plus employé dans les mesures de la métrologie des accélérateurs et dans celles liées à l'installation des éléments fonctionnels, il est parfaitement justifié de le décrire à nouveau dans sa version 1979.

La précision relative demandée pour l'installation des éléments fonctionnels des accélérateurs est de l'ordre de 0,1 mm. C'est la raison pour laquelle les mesures géométriques qui doivent satisfaire ces tolérances sont faites à partir de mesures de longueurs de très haute précision. Quelques centièmes de millimètre peuvent être obtenus du fait de l'utilisation des fils d'invar.

Le Distinvar, réalisé par le Service de Géodésie et des Sciences de la Terre en 1961, a été utilisé lors de la construction des ISR, du Booster et des tunnels de transfert. Cet instrument a effectué des milliers de mesures et le modèle automatique décrit ci-dessous a été employé pour la métrologie de référence du SPS. Il peut servir à déterminer les longueurs absolues (base géodésique, métrologie, contrôle d'ouvrage), à condition qu'elles soient comparées à un étalon primaire. Il peut aussi servir à déterminer des mesures différentielles (pont, tunnel, barrage, bâtiment) sans qu'il soit nécessaire de les étalonner.



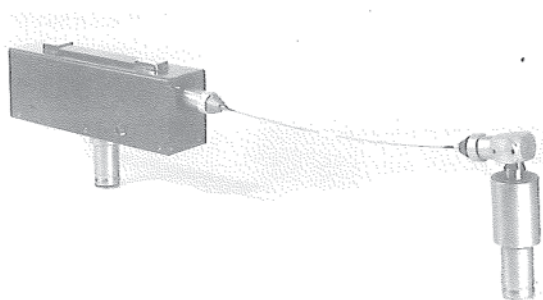


Fig. 9

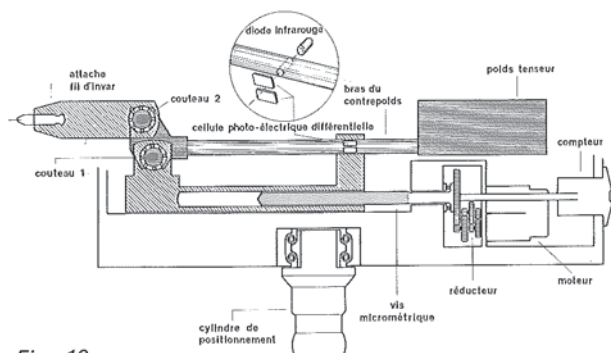


Fig. 10

Le Distinvar est composé de trois éléments, le fil d'invar géodésique, d'un diamètre de 1,65 mm, avec ses embouts de fixation, le point fixe et l'appareil de mesure des appoints (figure 9). Les deux derniers éléments comportent une pièce mâle permettant un centrage mécanique précis dans les alésages de 30 mm de diamètre. Ces alésages doivent être verticaux et matérialisent la longueur à mesurer.

L'appareil de mesure des appoints (figure 10) est une balance de précision montée sur un chariot. Le principe de base du système de la balance est qu'en fonction du rapport des bras de levier, un poids de 1,5 kg exerce une traction constante de 15 kg sur le fil. Le chariot, en se déplaçant longitudinalement, cherche le point d'équilibre de la balance. Ce point d'équilibre est défini par un système qui détecte la position verticale du bras de la balance. En fonction de l'information fournie par le système de détection, le chariot se déplace automatiquement en avant ou en arrière au moyen d'un moteur réversible et d'une vis micrométrique pour trouver le point d'équilibre. Un compteur mécanique solidaire de cette vis indique la position longitudinale du chariot. Ainsi, la différence de lecture du compteur entre la position du chariot sur la base d'étalonnage et la position sur la longueur à mesurer donne directement la différence de longueur entre ces deux mesures.

La course totale du chariot est de 50 mm. En fonction des fils d'invar utilisés, le Distinvar peut mesurer des longueurs comprises entre 0,40 et 50 m. La résolution du compteur est 0,01 mm. Néanmoins, la précision sur la mesure n'est pas fonction de la longueur des fils mais de la sensibilité de la balance. Des milliers de mesures faites à l'aide du Distinvar durant de nombreuses années montrent que la valeur moyenne de l'écart-type est de 0,03 mm.

Certaines précautions doivent être obligatoirement observées. En plus de la verticalité des alésages, il faut également se rappeler que, comme la traction exercée sur le fil est transmise directement aux éléments à mesurer, ceux-ci doivent être suffisamment rigides pour que cette traction n'altère pas les mesures. De ce fait, il est nécessaire de concevoir des piliers, des colonnes métalliques ou des supports qui ne se déforment pas sous l'effet de cette traction. Pour les mesures absolues de longueur, l'étalonnage doit être effectué très soigneusement avant et après les mesures elles-mêmes, afin de détecter toute erreur systématique.

### II.3.2. L'interféromètre à réflecteur asservi

Au printemps de 1979, cet appareil est venu bouleverser beaucoup d'idées reçues. Il devrait permettre de remplacer l'invar dans le créneau des mesures de distances comprises entre 0,10 m et 60 m. C'était là le domaine spécifique d'utilisation du fil d'invar, qui reste encore la solution la plus rapide d'emploi pour la précision recherchée, mais qui nécessite et nécessitera toujours des étalonnages fréquents dans la base.

Par contre, l'interféromètre à réflecteur asservi porte avec lui son propre étalon primaire et n'a donc plus besoin d'étalonnage.

Cet appareil permet également - ce qui est un grand avantage - de ne pas exercer de traction sur les points à mesurer, comme c'est le cas avec le Distinvar.

Le réflecteur asservi permet de mesurer des distances avec un interféromètre à laser sans utiliser de guidage mécanique (figures 11 et 12). Dans de bonnes conditions, des mesures pouvant atteindre 60 m peuvent être faites avec une erreur inférieure à 0,01 mm.

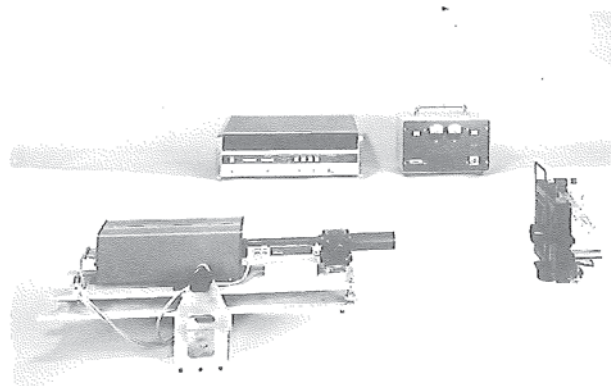


Fig. 11

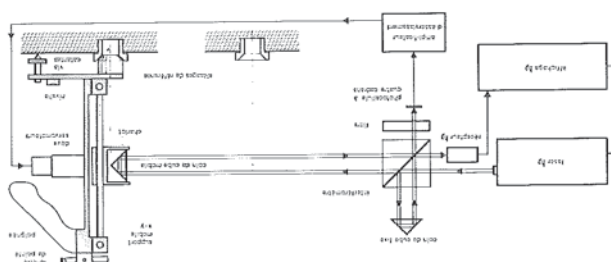


Fig. 12



L'interféromètre à laser est construit par Hewlett Packard et comprend un laser Helium-Néon stabilisé ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , puissance de sortie : 120 W), un prisme interférométrique avec un réflecteur fixe, un réflecteur mobile coin de cube, un récepteur et un système d'affichage.

Le faisceau du laser est séparé en deux par le prisme de l'interféromètre ; la première partie est renvoyée sur le prisme par le réflecteur fixe, la seconde partie par le réflecteur mobile. Les deux parties du faisceau se recombinaient et rentrent dans le récepteur dans lequel la différence de phase entre ces deux faisceaux est détectée. Cette différence de phase est proportionnelle au déplacement du réflecteur mobile. Par rapport au comptage de franges, la mesure du déphasage permet d'obtenir une résolution plus fine que le quart de longueur d'onde. Le signal du récepteur est transmis au système d'affichage qui fournit la distance mesurée en millimètres, en quarts de longueur d'onde ou en pouces.

L'interféromètre ne mesurant que les différences de phase, toute interruption de la réception du faisceau laser arrête le système de comptage et provoque donc la perte complète de l'information. La difficulté majeure dans l'utilisation du réflecteur mobile réside dans le fait qu'il doit être toujours aligné à mieux qu'un demi diamètre du faisceau laser. Le réflecteur est monté sur un chariot qui peut être déplacé verticalement et horizontalement par deux moteurs asservis (figures 13 et 14). Ces moteurs sont montés sur le support mobile XY et meuvent le chariot grâce à un système de fils tendus. Les moteurs sont contrôlés par l'amplificateur d'asservissement qui reçoit les signaux de la photodetecelle quatre quadrants. On obtient ainsi une boucle d'asservissement

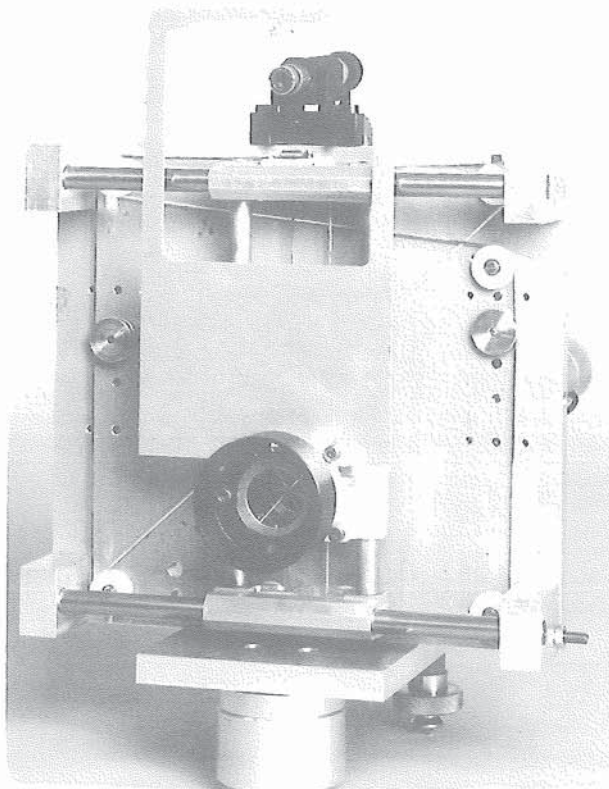


Fig. 13

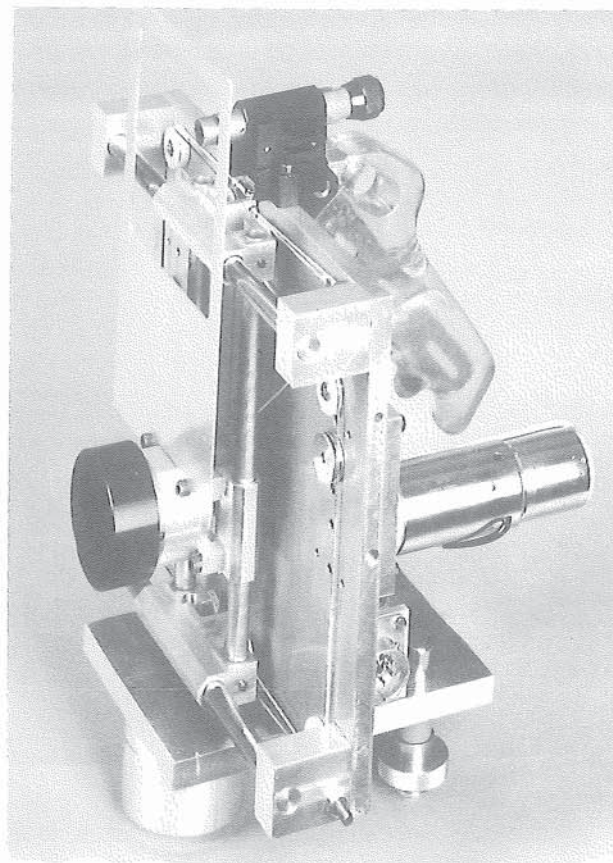


Fig. 14

qui, en déplaçant le réflecteur mobile, maintient le faisceau retour centré sur la photodetecelle.

Un niveau à bulle et deux vis de réglage servent à la verticalisation du support XY sur les alésages de référence.

Au moyen d'une petite lunette, le support XY est rendu perpendiculaire au faisceau laser. Le support est tourné jusqu'à ce que le réticule de la lunette soit centré sur le faisceau laser sortant du prisme interférométrique.

Le système laser avec son prisme interférométrique et le récepteur sont réglés afin que le faisceau laser soit aligné à environ 12 cm au-dessus des alésages de référence.

Le support XY mobile est placé sur l'alésage le plus éloigné et orienté perpendiculairement au faisceau laser grâce à la lunette. Le support est verticalisé à l'aide du niveau à bulle.

Une fois l'amplificateur d'asservissement branché, l'affichage interférométrique est mis à zéro et le support mobile est alors transporté manuellement avec précautions jusqu'à l'autre alésage où il est mis en place comme précédemment.

La distance entre les alésages de référence est lue directement sur le système d'affichage.

Le premier prototype fonctionne parfaitement et a déjà permis d'effectuer des mesures qu'il aurait été impossible de faire avec le Distinvar. Un deuxième prototype est en cours de réalisation et devrait permettre un accroissement de fiabilité et un emploi plus rapide.



## II.4. LES SYSTÈMES D'ALIGNEMENT

### II.4.1. Le système d'alignement au fil nylon

Cet appareil est destiné à remplacer certaines mesures angulaires par la mesure précise de la plus petite distance (flèche) d'un point à une ligne droite servant de référence. Cette droite est matérialisée par un fil de nylon. Les vecteurs ainsi obtenus sont introduits dans les calculs de compensation planimétriques en combinaison avec les autres mesures.

Une fois le fil tendu entre les deux points extrêmes, le système d'alignement est installé sur le point intermédiaire à déterminer. Il mesure alors le vecteur perpendiculaire au fil de nylon. Le détecteur mobile passe par un point de référence où le compteur est mis à zéro et continue jusqu'à ce qu'il trouve le fil. Le détecteur se centre sous le fil et la valeur de la flèche ainsi mesurée est alors affichée.

Le système comprend trois parties : le fil, la règle et le détecteur, la boîte de commande (figures 15 et 16). Le fil de nylon, d'un diamètre de 0,25 mm, est tendu entre un point fixe et un appareil qui applique une tension constante sur le fil. Les deux extrémités du fil sont centrées sur l'axe vertical des alésages de référence au moyen d'un système de goupilles. La règle est centrée mécaniquement dans l'alésage grâce à un cylindre de positionnement. La verticalité de l'alésage assure l'horizontalité de la règle. La perpendicularité de la règle au fil de nylon est effectuée manuellement. Le détecteur est un chariot monté sur galets, entraîné par une vis micrométrique de précision mue par un moteur. Un codeur incrémental solidaire de la vis et relié à un système de comptage est utilisé pour mesurer la position du détecteur. Le codeur a deux sorties, l'une donne 400 impulsions par tour, l'autre donne une impulsion zéro par tour. Quand l'impulsion zéro du codeur coïncide avec le signal de l'index de référence sur le chariot, le compteur est remis à zéro. Le détecteur est composé de deux diodes infrarouges situées symétriquement de part et d'autre du fil. La réflexion de la lumière sur le fil de nylon est recueillie sur une photodiode différentielle. Le signal amplifié de ces cellules asservit le moteur de la vis jusqu'au centrage parfait du détecteur sous le fil.

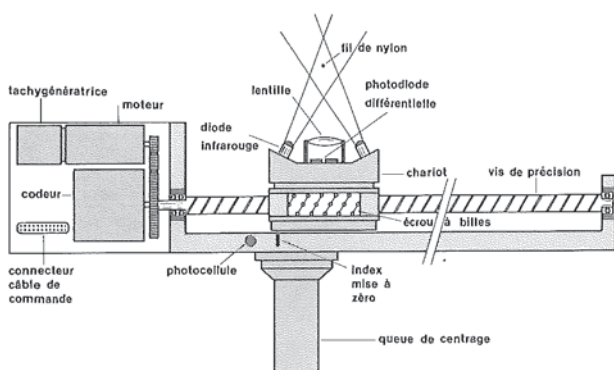


Fig. 15

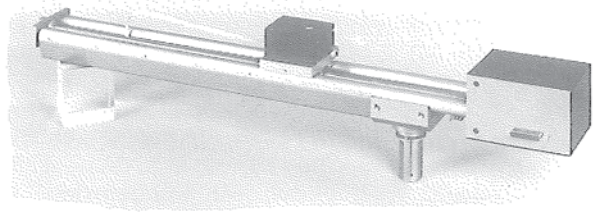


Fig. 16

Tous les circuits électroniques sont logés dans la boîte de commande, à l'exception de l'amplificateur différentiel qui est monté sur le chariot du détecteur. A cause de la faible quantité de lumière réfléchie par le fil, il est nécessaire de moduler la source de lumière et d'avoir le préamplificateur le plus près possible des photodiodes. La lumière est pulsée 980 fois/seconde par l'oscillateur 980Hz et le modulateur de diode infrarouge. Afin d'éliminer des signaux parasites comme le 50Hz, le bruit de fond, etc., le signal passe par un filtre synchrone avant d'être converti en un signal de courant continu dans le détecteur synchrone. Ce signal est ensuite amplifié et commande l'amplificateur de puissance. Celui-ci, le moteur et la tachygénérateur, constituent un système d'asservissement en vitesse qui entraîne le chariot par l'intermédiaire de la vis de précision. Au début d'une mesure, le signal à l'amplificateur vient de la logique de contrôle jusqu'à ce qu'il y ait un signal du photodétecteur, c'est-à-dire que le fil ait été trouvé. A ce moment, la logique de contrôle branche l'entrée de l'amplificateur au détecteur synchrone. Le moteur déplace le chariot jusqu'à ce que le signal devienne zéro ; le détecteur est alors centré sous le fil. Le système pour la mesure de la flèche est composé d'un codeur incrémental monté directement à une extrémité de la vis et branché à un compteur réversible associé à un affichage. De plus, un système effectue la mise à zéro du compteur, quand le chariot passe par la position dite de référence de la règle. Le codeur a une sortie qui donne une impulsion chaque fois que l'angle du codeur est nul. Le pas de la vis étant 4 mm, l'impulsion a lieu tous les 4 mm de déplacement du chariot. De plus, il y a une photocellule matérialisant le point dit de référence. Quand le chariot passe en face de ce point, le compteur est mis à zéro par l'impulsion zéro du codeur. Les sorties S1 et S2 du codeur donnent 400 impulsions par tour, ce qui correspond à une résolution de 0,01 mm sur la mesure de la flèche. Ces impulsions sont comptées et affichées. Tout le système est alimenté par une batterie de 12 volts.

Le mode opératoire consiste à mesurer les différents vecteurs au moins deux fois avec des origines différentes, afin d'obtenir des observations surabondantes et indépendantes. L'étalonnage de l'instrument s'effectue par rotation de 180° de l'ensemble règle/détecteur. Il est évident que, pour obtenir la précision maximum du système, un soin particulier doit être apporté à tous les stades de la mesure.



La course totale actuelle est de 500 mm, la précision sur la position du détecteur est 0,01 mm. Le système automatique n'a pas encore été utilisé de façon intensive, mais une version manuelle fournit un écart-type de 0,08 mm sur des cordes de 96 m et des flèches de 52 cm et une précision de 0,03 mm pour des cordes de 30 m. Les conditions d'observation doivent être surveillées afin que des courants d'air, même légers, n'introduisent pas d'erreur systématique dans les mesures. Dans ce cas, le système d'alignement laser doit remplacer celui à fil de nylon.

#### II.4.2. Le système d'alignement laser à récepteur asservi

L'écartomètre à mire active est destiné à la mesure de l'écart d'un point à un faisceau laser servant de référence. Avec une portée maximum d'environ 100 m, il permet de mesurer des écarts entre - 40 et + 540 mm avec une résolution de 0,01 mm.

L'appareil se compose de deux parties : l'émetteur et son alimentation, le récepteur photo-électrique différentiel et son unité électronique (figure 17).

L'émetteur comprend un laser Helium-Néon de 1 mW et, afin de permettre des mesures jusqu'à 100 m, un système optique approprié qui réduit la divergence d'un facteur 10 et augmente le diamètre du faisceau dans le même rapport. Ce diamètre, qui est de 11 mm à la sortie de l'optique, atteint seulement 14 mm à 100 m. L'optique comprend en outre un filtre spatial (diaphragme de 25  $\mu$ m situé au point de

convergence du système). Ce diaphragme élimine tous les rayons parasites non parallèles à l'axe, donnant ainsi une répartition gaussienne de l'intensité lumineuse. Le laser et son optique complémentaire sont montés sur un plateau réglable qui permet de diriger le faisceau vers le récepteur. Une fois réglé, l'ensemble émetteur est bloqué.

Le chariot du récepteur photo-électrique, mû par une vis hélicoïdale de précision, est asservi à rester centré sur le faisceau laser (figure 18). Sa position le long de la vis est mesurée par un codeur qui fournit 100 impulsions par millimètre à un compteur aller et retour. Ce compteur mémorise la position instantanée du récepteur par rapport à un "zéro" matérialisé par l'axe moyen de deux photocellules éclairées par une diode lumineuse (LED). Le passage du repère du chariot devant ces cellules effectue la mise à zéro du comptage. Les positions instantanées sont prélevées dix fois par seconde au moyen de la "porte d'échantillonnage" et cumulées dans le "compteur d'addition". Le nombre d'échantillons est fixé par le sélecteur manuel. Le système fournit, par l'intermédiaire d'un "diviseur" la moyenne de 10,100 ou 1 000 prélèvements qui est alors transmise à l'affichage digital.

L'asservissement du récepteur et la mesure digitale du déplacement permet une détermination précise de la position moyenne. L'erreur due à la forme dissymétrique du faisceau laser est ainsi éliminée et, dans la limite de la résolution, l'intégration digitale est mathématiquement exacte.

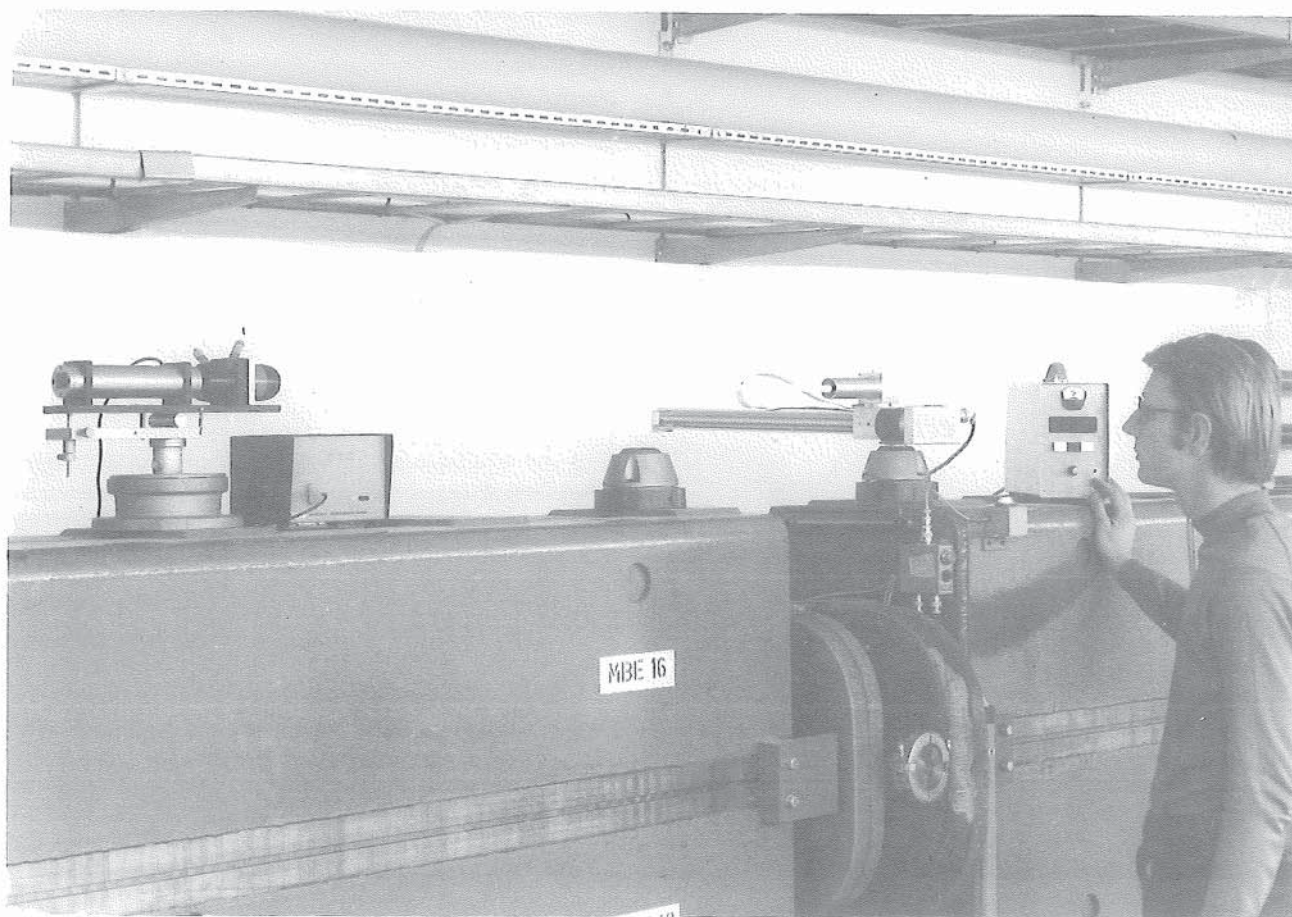


Fig. 17



La perpendicularité du vecteur mesuré est assurée par deux petites photocellules situées à l'arrière du récepteur. Elles sont éclairées par la partie centrale du faisceau laser qui passe par une fente d'environ 0,5 mm séparant les deux grandes photocellules frontales. Un galvanomètre indique leur différence d'éclairement ; il suffit de tourner l'ensemble du récepteur jusqu'à ce que cette différence soit nulle. Le centrage vertical du récepteur sur le faisceau est visualisé par une lampe-témoin qui s'allume lorsque la somme des courants des deux petites photocellules dépasse un certain seuil.

Cet appareil a été largement employé pour la métrologie du SPS. Il fournit une précision variant avec la distance, mais dépendant également du mode opératoire adopté et de la connaissance des constantes instrumentales.

Une procédure par mesure aller-retour élimine par symétrie l'excentrement de l'émetteur, ainsi que celui des photocellules réceptrices. Le décalage du zéro du codeur se détermine par simple retournement.

Toutes ces précautions prises, l'écart-type obtenu sur de nombreux alignements de 96 m est de 0,09 mm. Sur des distances plus courtes, cette valeur décroît rapidement.

## II.5. LES APPAREILS DE NIVELLEMENT ET DE CLINOMÉTRIE

### II.5.1. Niveau hydrostatique automatique

Cet instrument est destiné à la mesure précise et automatique de la différence de niveau qui existe entre deux ou plusieurs stations. Le niveau hydrostatique installé en chaque station peut être commandé et lu localement ou à distance, soit manuellement, soit périodiquement par ordinateur. La précision recherchée est de l'ordre de 0,05 mm sur des distances de quelques dizaines de mètres (figure 19).

Le système hydrostatique comporte un certain nombre de stations reliées entre elles par des tubes afin de travailler soit en circuit fermé, soit sous une pression barométrique unique. La détection du niveau du liquide s'effectue par contact électrique d'une aiguille sur la partie plane du ménisque constituant la surface hydraulique de contact. La lecture de la position de ce niveau est obtenue par le comptage du chemin vertical parcouru par l'aiguille avant le contact. Un transistor immergé fournit l'indication de la température du liquide en chaque station.

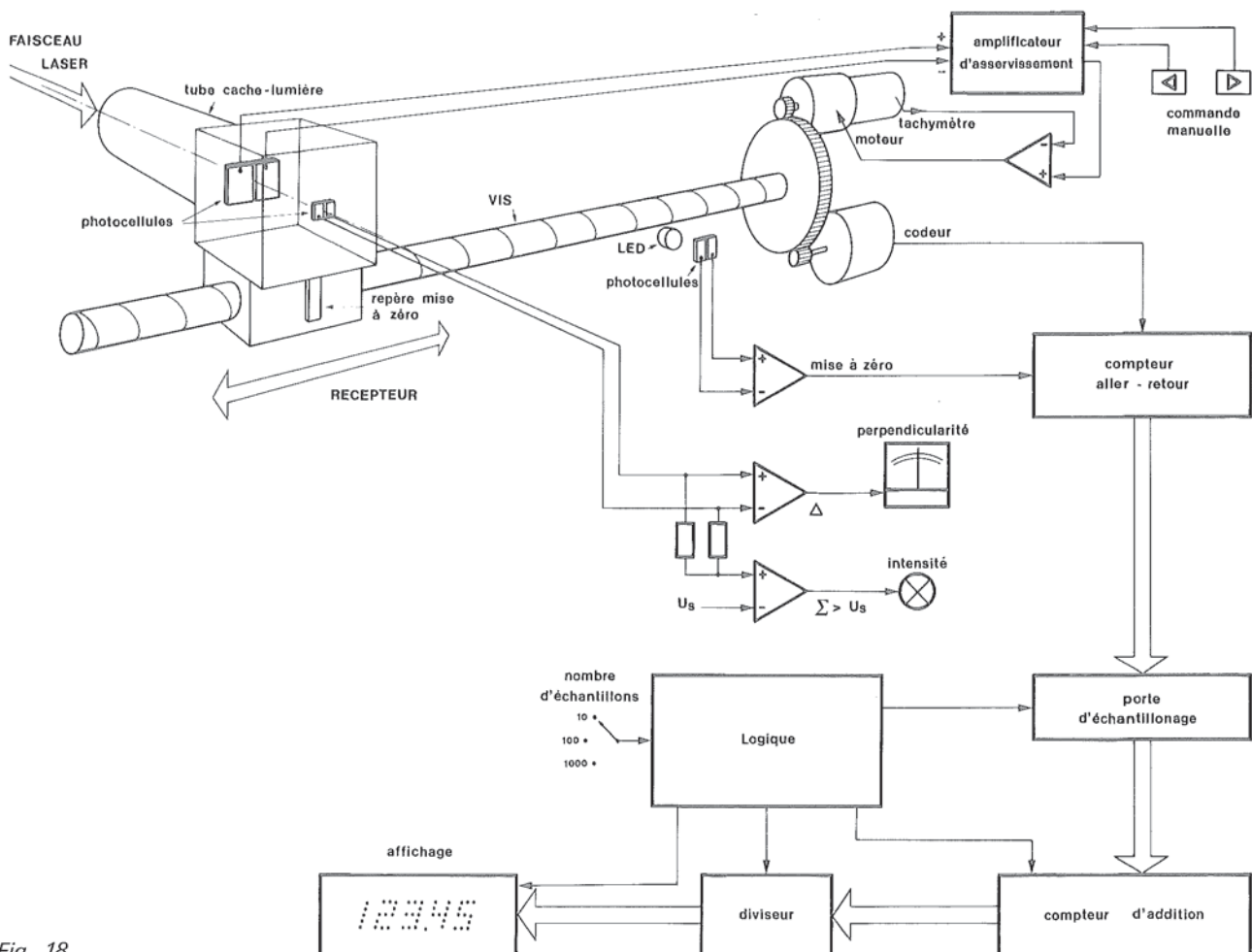


Fig. 18



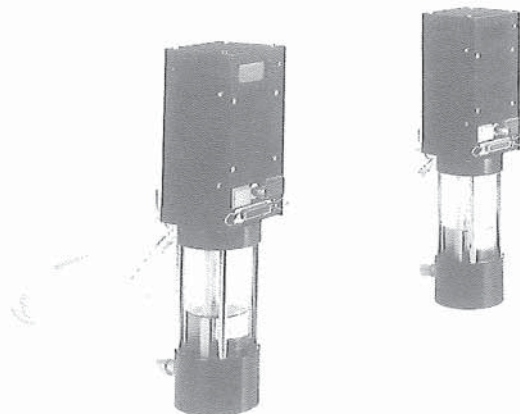


Fig. 19

Le niveau hydrostatique (figure 20), d'un diamètre de 70 mm et haut de 300 mm est un vase relié par deux tuyaux plastiques ou métalliques aux autres stations, un des tuyaux faisant connexion hydraulique, le second assurant la connexion pneumatique. Un robinet à trois positions permet de fermer le circuit ou de le mettre à la pression atmosphérique. Le mouvement vertical de l'aiguille (course totale : 100 mm) est commandé par un système comprenant un moteur et un codeur incrémental relié à un compteur. Le codeur a deux sorties, l'une donne 100 impulsions par tour, et l'autre une impulsion de " mise à zéro " par tour. La mise à zéro du système de comptage est faite par la première impulsion de " mise à zéro " qui suit la position de repos. L'aiguille descend jusqu'au contact électrique avec le liquide, la valeur de la course s'affiche et l'aiguille est alors remontée jusqu'à la position de repos. Quand on mesure la température du liquide, celle-ci apparaît sur le même affichage à cristaux liquides avec une résolution de 0.1°C. Les deux modes opératoires peuvent être effectués soit manuellement à l'aide d'interrupteurs placés sur l'instrument, soit à distance, par l'intermédiaire du connecteur entrée/sortie. Le niveau hydrostatique demande une alimentation de 12-14 VDC. La consommation courante est de 120 mA au cours de la mesure et de 40 mA au repos. Le liquide utilisé est un mélange de 90 % d'eau distillée et de 10 % d'antigel.

L'ensemble de l'électronique est monté sur deux cartes de circuits imprimés. Les circuits analogiques et la commande de moteurs sont sur l'un, l'autre recevant le compteur et l'affichage. Au début d'une mesure de niveau, deux " flip-flops " sont établis, l'un contrôle le sens du moteur, l'autre l'enclenche et l'aiguille descend. Celle-ci est connectée aux 12 Volts par une résistance 1 Mohm. Quand il y a contact avec le liquide, le voltage tombe. Cette chute est amplifiée et change la direction " flip-flop ", donc le sens du moteur. Au même moment, le comptage est arrêté. Lorsque l'aiguille atteint la position la plus haute, un micro-contact de fin de course change le " flip-flop " et le moteur s'arrête. Un transistor silicium conventionnel est utilisé comme sonde de température. Il est branché en série à un courant stabilisé de 1.22 V par une résistance de 1 kohm. Le courant

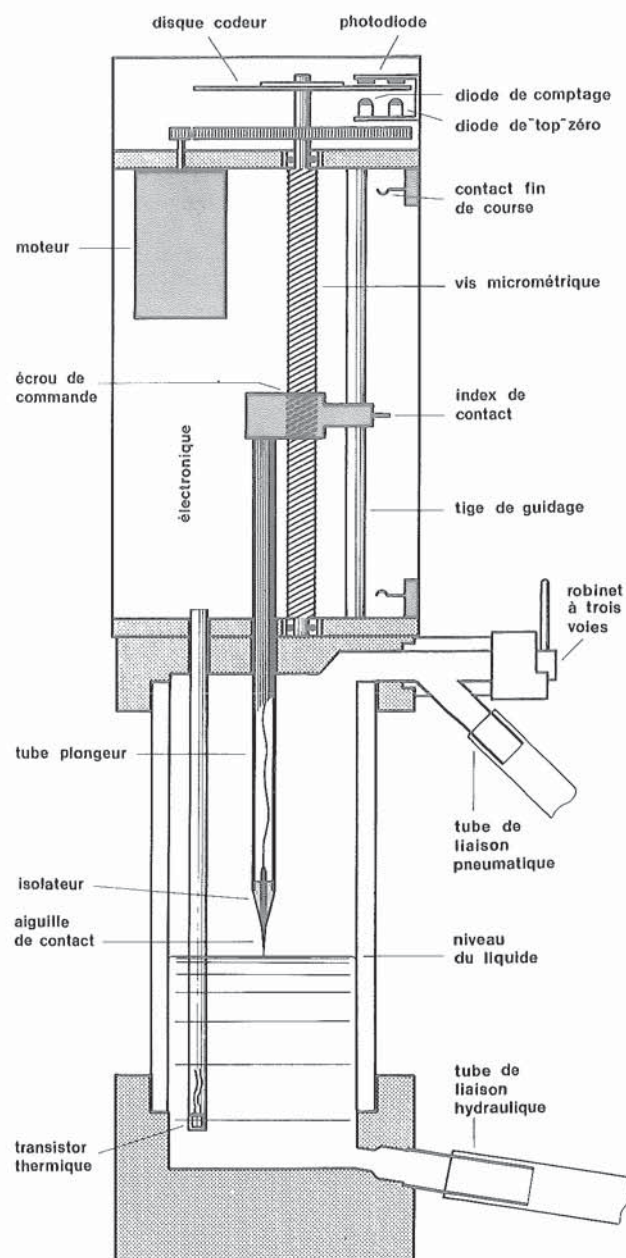


Fig. 20

passant par la résistance est proportionnel à la température absolue et est mesuré à l'aide d'un circuit voltmètre digital à double rampe utilisant le même compteur et le même affichage que la mesure de niveau. Afin d'afficher la température en °C, le compteur est, au début de chaque cycle de mesure, mis à la valeur  $1000.0 - 273.2 = 726.8$ . Les circuits digitaux utilisent les circuits intégrés CMOS qui consomment très peu de courant.

L'étalonnage des niveaux hydrostatiques s'effectue sur deux stations par permutation des niveaux. La base et le support des niveaux sont réalisés à la demande. Le circuit hydraulique doit être aussi horizontal que possible et ne comporter aucune bulle. Les calculs de la différence de niveau réelle entre les stations doivent tenir compte de l'influence de la température en chacune d'elles, température qui modifie la hauteur des colonnes de liquide.



La précision sur la température est de  $0.5^{\circ}\text{C}$ . La résolution de la mesure est de  $0.01\text{ mm}$ . Sur des circuits hydrauliques de  $25\text{ m}$  de long, la précision est de  $0.05\text{ mm}$ . Combiné au clinomètre électronique, ce système fournit les informations complètes pour les mesures altimétriques.

### II.5.2. Le clinomètre électronique

L'instrument réalisé est destiné à la mesure précise des inclinaisons selon une direction unique. La lecture des inclinaisons peut s'effectuer à distance. Le clinomètre ne devient pas magnétique dans un champ élevé. Il permet des mesures absolues ou différentielles.

Le principe consiste à détecter la position transversale d'une masse pendulaire de  $180\text{ g}$  suspendue à un

support rigide au moyen de cinq fils de Cu-Be d'un diamètre de  $0,05\text{ mm}$  (figure 21). La lecture de la position s'effectue à l'aide d'un système électro-optique utilisant des photo-diodes différentielles et des amplificateurs (figure 22). Le courant de sortie des photo-diodes est proportionnel à l'inclinaison de l'instrument.

Les dimensions du clinomètre sont  $1 = 70 \times L = 90 \times h = 100\text{ mm}$ . Il pèse  $800\text{ g}$  au total. Sa base est équipée de trois vis de réglage pour calage du zéro et de trois vis de fixation pour le rendre solidaire des éléments à mesurer (composants de machine ou d'expérience, chariots mobiles, jauges, etc.). Il est équipé d'un système d'amortissement en une seconde (figures 23 et 24). La lecture de la position de la masse pendulaire peut s'effectuer à distance sur

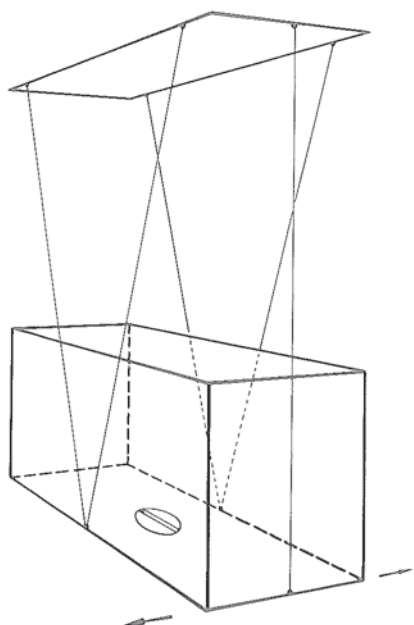


Fig. 21

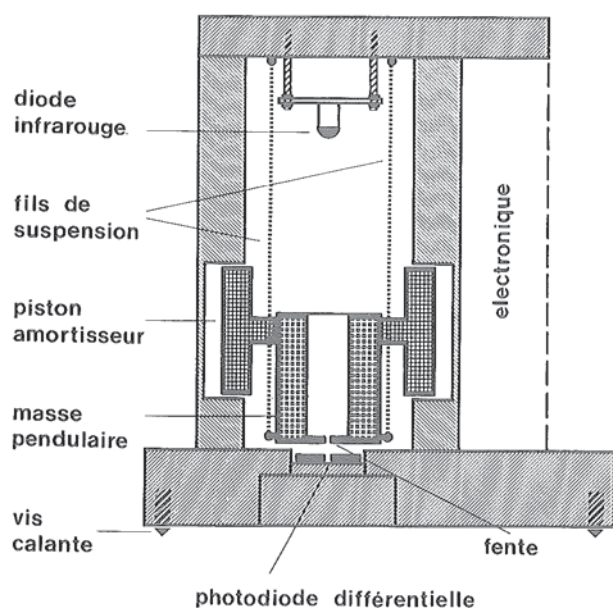


Fig. 22

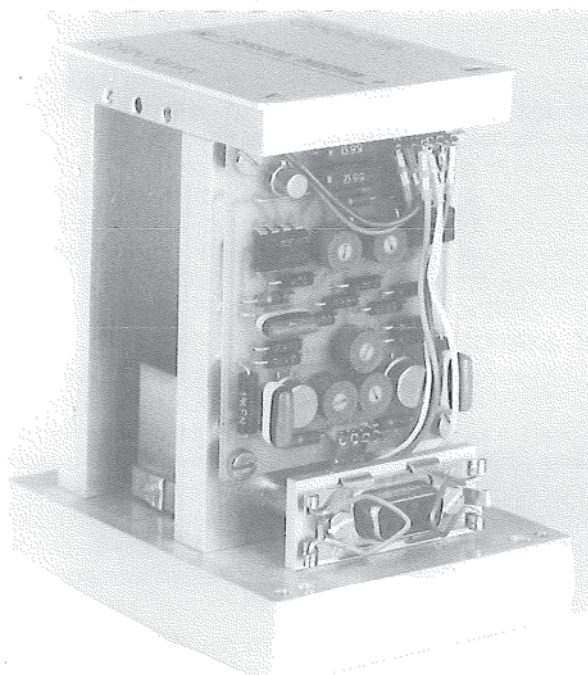


Fig 23

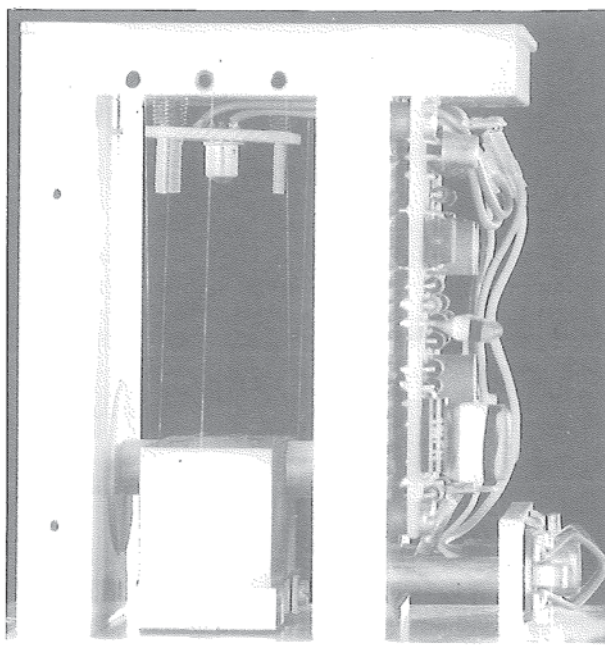


Fig. 24



un voltmètre analogique ou digital. Un ensemble de clinomètres peut être lu par scanning sur ordinateur. La résolution de la lecture est de 0,001 mm/m mais elle est alors très influençable par les vibrations.

Le clinomètre est alimenté en  $\pm 15$  V stabilisé. Le clinomètre sort une tension proportionnelle à la pente correspondant à  $\pm 10$  V pour  $\pm 2$  mm/m. Une boucle de gain automatique asservit le courant d'alimentation de la diode à la tension de sortie des photodiodes.

Un système de blocage de la masse pendulaire évite les ruptures de fil au cours des manutentions et des transports. Comme pour tout niveau, l'établissement du zéro s'effectue par retournement et réglage des vis de calage.

La précision du clinomètre est de 0,01 mm/m, sa linéarité est de 1 % jusqu'à  $\pm 1$  mm/m et de 2 % jusqu'à  $\pm 2$  mm/m. Dans cette gamme, la température n'a pas d'influence sur la lecture. Cet instrument est utilisé intensément pour les mesures de la géométrie des pièces polaires des quadrupoles SPS, pour réaliser la machine SPS dans un plan unique, pour contrôler la stabilité de certains détecteurs dans les grandes expériences de physique. Associé aux niveaux hydrostatiques, il fournit une surveillance périodique ou permanente de l'altimétrie.

### III. CONCLUSION

Le gros avantage de la géodésie et de la métrologie au CERN est que la précision demandée résulte des calculs a priori des perturbations de l'orbite fermée. Un mouvement du sol, le déplacement d'une quadrupole dans les machines à fonctions séparées, une valeur erronée du champ magnétique constituent une source de difficultés qu'il est possible de simuler et dont on tient compte dans l'établissement de la liste des paramètres.

L'équation de Hill, utilisée en astronomie pour décrire les orbites lunaires, sert également à l'étude et à l'analyse des trajectoires des particules dans le système de confinement magnétique d'un accélérateur circulaire. Cette équation à coefficients périodiques est de la forme :

$$\frac{d^2y}{ds^2} + K_Y(s) \cdot y = 0$$

où  $K_Y(s + P) = K_Y(s)$ ,  $P$  étant la période de  $K_Y(s)$  et  $y$  représentant les coordonnées radiales ou verticales. Le mouvement transversal ainsi décrit n'est pas autre chose qu'un mouvement harmonique simple dont la force de rappel varie avec  $s$ , distance prise sur l'axe du faisceau, le coefficient périodique  $K_Y(s)$  correspondant à l'effet focalisant produit par le champ magnétique des aimants.

La résolution de ces équations fixe les valeurs des précisions qu'il faut atteindre pour un bon fonctionnement des accélérateurs. C'est au Service de Géodésie et des Sciences de la Terre de satisfaire ces exigences de précision, mais celles-ci sont connues dès le début du projet et constamment actualisées lors de la construction. Les moyens nécessaires sont mis en œuvre bien souvent avant même que les premiers coups de pioche soient donnés.

Il n'a pas été mentionné dans cet exposé d'autres matériels que ceux construits au CERN. Dans l'opti-

que d'une évolution de la métrologie de l'an 2 000, il ne faut pas oublier les théodolites électroniques, le traitement sur ordinateur des bandes magnétiques issues de ces instruments, les banques de données, le dessin automatique. Il n'est pas ici question d'être exhaustif.

Les retombées technologiques du matériel construit au CERN sont par contre importantes, surtout en ce qui concerne le Distinvar, qui est utilisé maintenant avec succès un peu partout en Europe, aux États-Unis et au Japon. L'appareil de mesure des écarts au fil nylon et le système d'alignement laser à récepteur asservi sont restés confinés dans les travaux CERN, étant donné leurs conditions spécifiques d'emploi. Les clinomètres sont également aujourd'hui très utilisés à l'intérieur et à l'extérieur du CERN. Les niveaux hydrostatiques doivent encore faire la preuve de leurs qualités après usage intensif.

Il est certain que nous sommes tout au début de l'utilisation de l'interféromètre à réflecteur asservi. Le champ de ses applications semble illimité. Il ne fera que croître au fur et à mesure des développements de l'appareillage. Des besoins se créeront d'eux-mêmes qui exigeront de meilleures performances. Un exemple entre autres, où il apporte une solution qui n'existait pas avant son invention, est celui de la mesure et du contrôle de la surface réfléchissante de radiotélescopes millimétriques. Ces miroirs, de 15 à 30 m de diamètre, doivent être précis à  $50 \mu\text{m}$ .

Tous ces appareils apportent des solutions nouvelles à des vieux problèmes bien souvent mal résolus. Leur utilisation, dans un cadre bien défini où la *précision* recherchée correspond réellement aux besoins des utilisateurs, sera une source de succès mais aussi d'économie. Ils permettent des gains de temps, une augmentation de la précision et ouvrent un éventail très large par rapport à ce qui existait il y a seulement dix ans.

Des développements futurs vont apparaître. La construction du troisième prototype de l'interféromètre à réflecteur asservi est déjà en cours et nous savons que ce n'est pas fini, que d'autres équipes prendront le relais et pousseront cette idée plus loin que nous. Nous sommes seulement fiers d'avoir été les premiers à construire un prototype qui fonctionne et qui a déjà assuré un certain nombre de succès dans des domaines où, sans lui, les mesures auraient été plus longues et plus coûteuses.

### BIBLIOGRAPHIE

- CHARPAK G. : "Multiwire and Drift Proportional Chambers", Physics Today, October 1978, Publications Group CERN/PU-ED 79-01 (February 1979).
- GERVAISE J. : "Mesures de Distances de haute Précision au Fil d'Invar en Micro-Géodésie", AR/Int.SG/65-8, 10 avril 1965.
- GERVAISE J. : "Positioning of the CERN Intersecting Storage Rings : The Geodetic Approach", CERN 70-18, ISR Division, 30 June 1970.
- GERVAISE J. : "Géodésie de Positionnement des Accélérateurs circulaires de Parti-



## BIBLIOGRAPHIE

(suite)

*cules* ", École Supérieure des Géomètres et Topographes, Paris, avril 1972.

GERVAISE J. : *" High Precision Survey and Alignment Techniques in Accelerator Construction "*, Proceedings (Vol. 1), Meeting on Technology arising from High Energy Physics, CERN, April 1971.

GERVAISE J. : *" Geodesy and Metrology at CERN : A Source of Economy for the SPS Programme "*, CERN 76-19, SPS Division, 17 November 1976.

GERVAISE J. : *" Precision Survey and Closed Orbits in Circular Accelerators "*, Workshop on the Special Large

Matrices for Geodesy, CERN-CAST, 1-4 March 1977.

GERVAISE J. : *" Invar Wire Measurement - A Necessary Evil "*, IAG Symposium " High Precision Geodetic Length Measurements ", Helsinki, June 1978.

LEVALLOIS J.J. : *" Géodésie générale "*, Eyrolles, Paris, 1969.

MAYOUD M. : *" Photogrammetric Metrology at the European Organisation for Nuclear Research (CERN) "*, Intercongress Symposium on " Photogrammetry for Industry ", Stockholm, August 1978.

Information technologique, Exposition technologique, 25<sup>e</sup> Anniversaire du CERN, Fiches S1, S2, S3, S4, S5, S6 ; Groupe de Géodésie et des Sciences de la Terre, Genève, mai 1979.

# Abonnement 1980 à la revue xyz de l'Association Française de Topographie

Pour s'abonner à cette revue, vous adressez votre demande, accompagnée du chèque de règlement, à l'adresse suivante :

## ASSOCIATION FRANÇAISE DE TOPOGRAPHIE

### " Abonnements "

39<sup>ter</sup> rue Gay-Lussac  
75005 PARIS

#### Abonnement 1 AN (4 numéros)

- FRANCE = 160 F
- AUTRES PAYS = 200 F

Tous les membres de l'A.F.T sont automatiquement abonnés à la revue xyz.

Les abonnements ne sont pas rétroactifs et commencent à la date du règlement.

**Achat d'un seul numéro** - même adresse que ci-dessus.

(sous réserve de disponibilité)

- FRANCE = 50 F
- AUTRES PAYS = 60 F

En cas de changement d'adresse, nous invitons nos abonnés à bien vouloir communiquer à l'adresse ci-dessus la dernière bande accompagnée de la somme de 3,60 F en timbres poste.