

# Topométrie industrielle et contrôle qualité

---

J. GERVAISE

Les domaines très voisins de la Topométrie industrielle et de la Métrologie industrielle occupent un créneau très étroit dans l'ensemble de la topographie.

La limite inférieure dans ce domaine commence là où la *métrologie proprement dite*, métrologie de laboratoire ou d'ateliers spéciaux, se termine. La limite supérieure, elle, est impossible à définir.

Dans un référentiel extérieur aux objets à mesurer, la *topométrie* industrielle fournit les paramètres nécessaires à la localisation spatiale de toute structure ou équipement faisant partie d'un ensemble. Tous les problèmes de détermination (X,Y,Z), d'alignement, d'installation, de contrôle, de lissage sont englobés dans cette définition. Cela peut aller du nivellement direct d'une structure linéaire — un rail par exemple — à l'installation géométrique (X,Y,Z) des milliers d'éléments du système de confinement magnétique d'un accélérateur de particules ou d'anneaux de collision.

Dans un référentiel propre à l'objet à mesurer, on désignera par *métrologie industrielle* la détermination ou le contrôle des dimensions et des formes de cet objet — pièce industrielle de grande dimension, détecteur de particules, antenne de radioastronomie, fusée, etc. — Chaque cas est un cas d'espèce et relève d'une méthodologie et d'une instrumentation particulières qui devront tenir compte du volume de l'objet, de sa forme, de sa localisation et de son environnement. Les précisions demandées sur les paramètres, ainsi que le temps imparti aux mesures doivent être discutés pour chaque ensemble d'opérations, en amont avec les responsables du projet, en aval avec les utilisateurs. De même que dans la topométrie industrielle, la liaison avec les mécaniciens et les électroniciens est essentielle. La connaissance des étalons est indispensable. Quand cela est possible, il faut chercher à effectuer des étalonnages fréquents, voire journaliers, exécuter des mesures "on line" sur ordinateur et automatiser les moyens de mesure.

En préparant cet exposé, qui doit servir d'introduction à ce colloque, je me suis rendu compte que les moyens mis en œuvre au CERN pour mener à bien les tâches confiées au Service de Géodésie et de Métrologie, comportaient déjà la notion de "qualité", telle qu'elle sera traitée cette après-midi.

Il est difficile de fixer le point de départ de ces techniques. Il serait bien étonnant que les constructeurs de pyramides n'aient pas fait de métrologie, sans aller jusqu'à faire dire aux mesures, actuellement accomplies, plus qu'elles ne le peuvent en mathématique et en astronomie. De même, dans ce que j'ai appelé la topométrie, prise ici au sens large, la première mesure connue d'un arc de méridien date de quelque 250 ans avant Jésus-Christ. Eratosthène avait noté que le jour du solstice d'été, à midi, le soleil est à la verticale de Syène (Assouan) en Égypte où il illumine le fond des puits ; il mesura sur le sol, à l'aide d'un gnomon (cadran solaire) l'extrémité de l'ombre portée du soleil à Alexandrie d'Égypte ce même jour, et trouva qu'elle faisait avec la verticale un angle de  $1/50^{\circ}$  de circonférence, soit  $7^{\circ}12'$ . Dans l'hypothèse d'une terre sphérique, et en supposant que les deux villes soient sur le même méridien, il suffisait de mesurer la distance les séparant pour connaître la valeur de la circonférence terrestre. Les marcheurs égyptiens, tous champions incontestés du double pas étalonné, évaluèrent cette distance à 5 000 stades égyptiens. La circonférence terrestre était donc de 250 000 stades. Le malheur veut que l'on ignore totalement la valeur en mètre du stade égyptien.

Dès 1795, la loi française mettait en place le système métrique décimal et illustrait son esprit d'universalité en introduisant une unité de longueur acceptable pour tous les pays : le mètre, un dix-millionième du quart du méridien terrestre. On en confectionna une image : une barre plate en platine.

En 1875, fut signée la Première Convention du Mètre et, en 1889, la Première Conférence des Poids et Mesures fit confectionner une nouvelle barre en platine irridié ayant un profil en X. Deux traits microscopiques délimitèrent entre eux une longueur qui, par définition, était adoptée comme le "mètre".

En 1960, lors de la Onzième Conférence générale des Poids et Mesures, trente deux gouvernements ont mis à la retraite, après soixante et onze ans de service, le vieux mètre-étalon. Considérant qu'il était désirable d'adopter un étalon naturel et indestructible, la Conférence décida que le mètre est la longueur égale à 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la radiation correspondant à la transition entre les niveaux  $2p_{10}$  et  $5d_5$  de l'atome de krypton 86.



En 1980, la nécessité de changer la définition du mètre dans un proche avenir ne provient pas principalement des besoins de la métrologie des longueurs. En effet, pour ces besoins, la réalisation pratique du mètre au moyen du  $^{86}\text{Kr}$  reste suffisamment précise et le laser asservi à 633 nm fournit un étalon secondaire bien adapté. Cette nécessité provient surtout du besoin de conserver l'intégrité de l'unité SI. En plus de la réalisation du mètre au moyen du  $^{86}\text{Kr}$ , il existe à l'heure actuelle trois autres valeurs de référence recommandées qui sont spécifiées avec la même exactitude. Ce sont la vitesse de la lumière  $c$ , la longueur d'onde du laser asservi sur le méthane à 3.39 nm et la longueur d'onde à 633 nm du laser asservi sur l'iode. Les progrès des techniques pour la mesure des fréquences des radiations visibles et la reproductibilité des étalons lasers dans le visible sont tels qu'il est reconnu que la reproductibilité des longueurs d'onde de ces étalons est plus que cent fois supérieure à la reproductibilité de l'étalon du  $^{86}\text{Kr}$  et que l'on peut obtenir des valeurs de leur longueur d'onde de différentes façons, ce qui peut conduire à des résultats cohérents dans les limites des incertitudes actuelles de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  mais dont les écarts sont supérieurs aux incertitudes expérimentales.

Cette situation risque de conduire à des incohérences et à une certaine confusion dans la spécification des longueurs d'onde des transitions spectroscopiques et des étalons de longueur d'onde. Des incohérences peuvent aussi apparaître entre des mesures de longueur extraterrestres qui sont fondées sur des observations de temps de vol et sur la vitesse de la lumière, et des mesures terrestres qui sont généralement fondées sur des étalons de longueur d'onde. Il ne peut être apporté de solution satisfaisante à ces problèmes qu'en changeant la définition du mètre de telle sorte que :

- ou bien l'on choisit un étalon unique de longueur d'onde offrant une reproductibilité appropriée, comme nouvel étalon primaire de longueur et de longueur d'onde,
- ou bien l'on opte pour une formulation qui, en fait, fonde le mètre sur une valeur de  $c$  adoptée conventionnellement.

Les plus récentes déterminations de  $c$  dans le vide sont les suivantes :

- BAY, LUTHER & WHITE (NBS Washington)  
 $c = 299\,792.462 \text{ km/s} \pm 0.18$
- BAIRD & Collab. (NRC Ottawa)  
 $c = 299\,792.457 \text{ km/s}$
- EVENSON & Collab. (NBS Boulder)  
 $c = 299\,792.460 \text{ km/s} \pm 0.25$
- EVENSON & Collab. (NBS Boulder)  
 $c = 299\,792.4562 \text{ km/s} \pm 0.011$

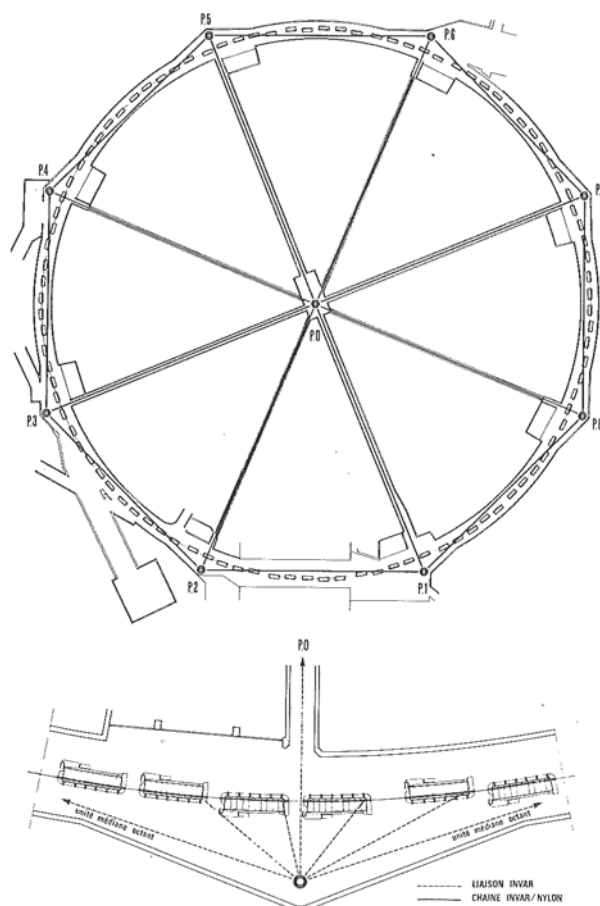
Ces résultats ont encouragé le CCDM à demander au CIPM de prendre en considération la nouvelle définition du mètre suivante :

"Le mètre est la longueur du trajet parcouru dans le vide par les ondes électriques planes pendant une durée de  $1/299\,792\,458$  de seconde"

en vue de la proposer à la CGPM en 1983.

Entre le passé et l'avenir, j'ai choisi parmi les résultats obtenus au CERN, de présenter dans cet exposé les exemples suivants :

1. La mesure traditionnelle des longueurs telle qu'elle a évolué au CERN depuis 1955, ainsi que l'adaptation



Métrologie du Synchrotron à protons de 28 GeV

Fig. 1

des appareils de nivellement aux problèmes de la métrologie ;

2. La nécessité de mesures surabondantes pour pallier l'impossibilité de superposer deux figures de référence, sans la contrainte de devoir choisir arbitrairement des points fixes. Il n'est pas possible de fournir à l'intérieur d'une certaine fourchette les coordonnées X,Y,Z d'un ensemble mesuré plusieurs fois mais seulement d'effectuer le "lissage de la courbe".

# **I — MESURE TRADITIONNELLE DES LONGUEURS, TELLE QU'ELLE A ÉVOLUÉ AU CERN DEPUIS 1955 ET ADAPTABILITÉ DES APPAREILS DE NIVELLEMENT AUX PROBLÈMES DE LA MÉTROLOGIE**

La figure de référence du synchrotron à protons de 28 GeV (fig. 1) est un octogone régulier à point central. Tous les angles et toutes les distances ont été mesurés. Il fallait une figure de référence simple puisque les ordinateurs, en 1954, n'avaient pas fait leur apparition au CERN. Ceci entraîna le développement d'un ensemble d'instruments dont les performances ont été et restent remarquables.

Le théodolite (fig. 2) est centré sur le microscope de lecture des réglettes du fil d'invar. Le support du microscope est installé dans l'alésage à centrage forcé de la plaque de glissement à coulisses croisées solidaire du pilier de référence. Dans le même axe vertical, sur la lunette du théodolite, sont placés la mire et son éclairage. L'axe vertical est défini grâce à



des nivelles de T3 avec une précision inférieure à  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Cet ensemble d'instruments forme un combiné qui évite tout excentrement et qui permet de mesurer à la fois les angles et les distances.

La poulie à couteau (fig. 3) est fixée sur un support indépendant du pilier. La tension appliquée au fil d'invar est de  $196.18\text{ N}$ . Sur les aimants (fig. 4), l'installation du combiné est la même que sur les piliers. Le point fixe permettant les déplacements du fil est supporté par un bras rigide monté sur le pont roulant.

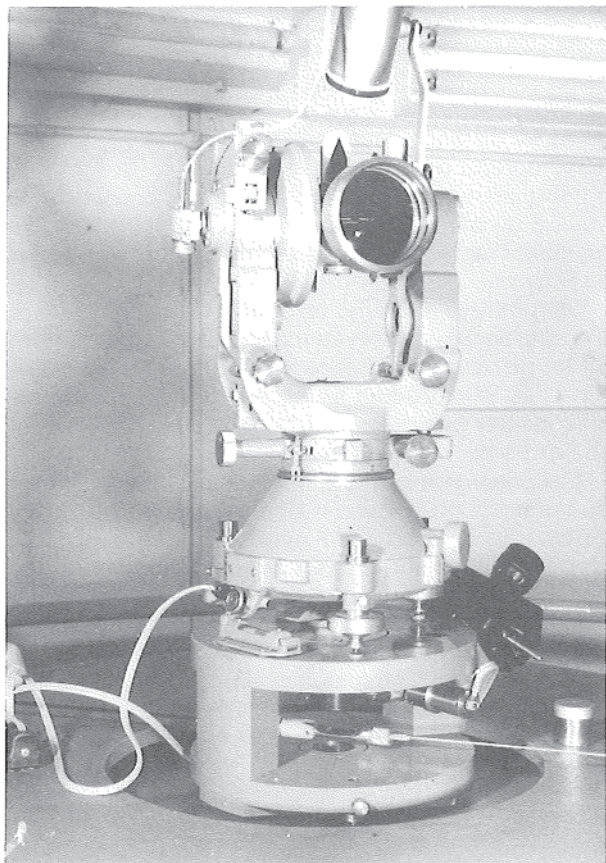


Fig. 2

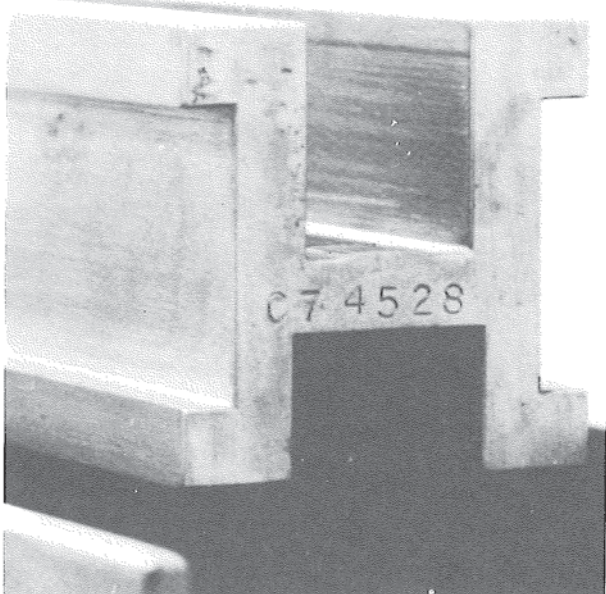


Fig. 5

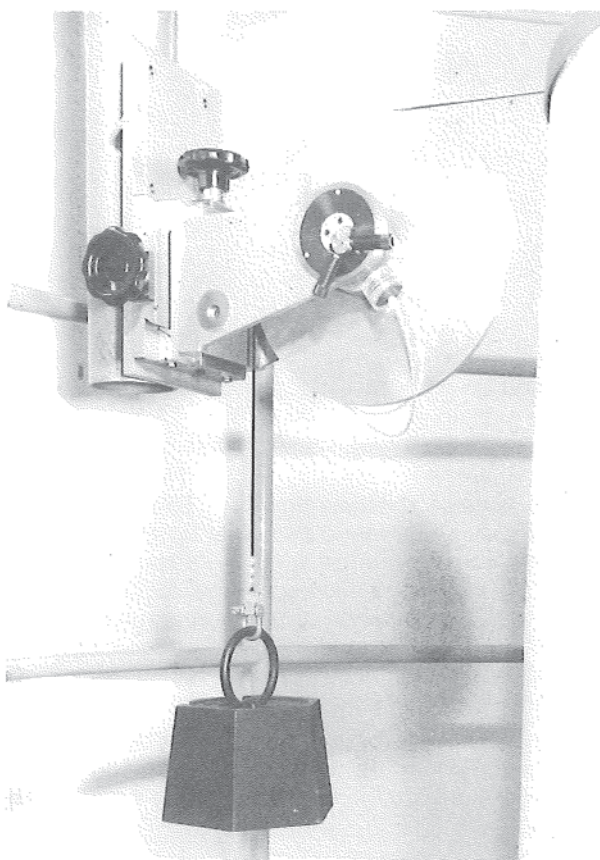


Fig. 3

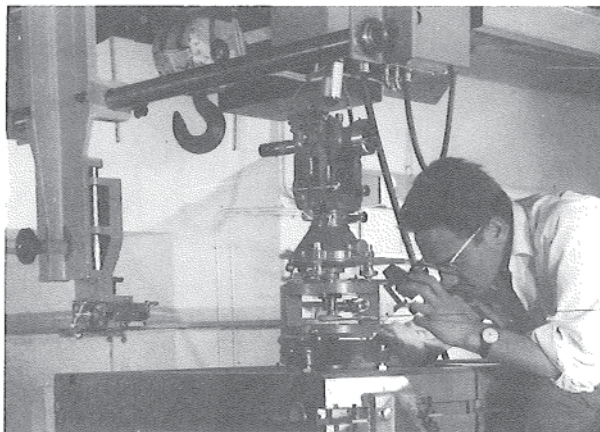


Fig. 4

Les mesures de longueur étant l'élément principal de toute la métrologie des accélérateurs circulaires de particules, il était essentiel de disposer dans le laboratoire de métrologie d'un étalon de longueur qui soit aussi voisin que possible du mètre étalon : une règle étalon de  $4\text{ m}$  en métal invar (fig. 5). Pour pouvoir en suivre l'évolution dans le temps, une règle de  $1\text{ m}$ , provenant de la même coulée est utilisée comme étalon primaire. Elle est comparée à intervalles plus ou moins réguliers à la radiation du krypton 86. La règle de  $1\text{ m}$  (No 10230) fournie par la Société Genevoise d'Instruments de Physique, a été étalonnée lors de sa fourniture, le 2 avril 1962. A cette date, la distance séparant les deux traits définissant la longueur de cette règle était à  $20^\circ\text{ C}$  de  $1\text{ m} + 0\text{ }\mu\text{m}$ . La figure 6 montre les valeurs d'étalonnage de la règle de  $1\text{ m}$  pendant la dernière décade.



Date	Valeur d'étalonnage	Ecart type de cette valeur
02.4.1962	1 m + 0 $\mu$ m	
31.7.1968	1 m + 1,17 $\mu$ m	0,026 $\mu$ m
11.4.1972	1 m + 1,11 $\mu$ m	0,018 $\mu$ m
29.1.1975	1 m + 1,15 $\mu$ m	0,028 $\mu$ m
5.10.1979	1 m + 1,08 $\mu$ m	0,020 $\mu$ m

Fig. 6

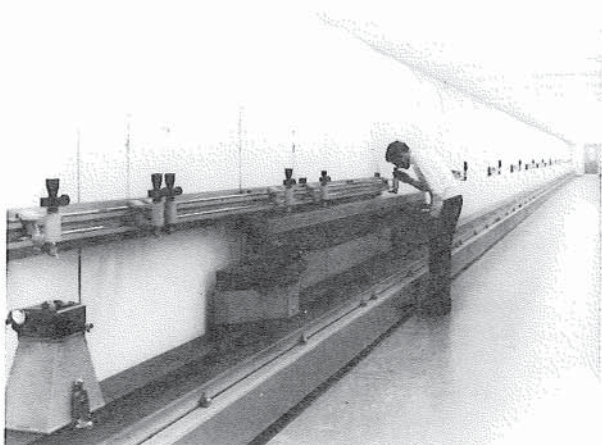


Fig. 7

Dans la base d'étalonnage du CERN (fig. 7), le banc de mesure permet d'étalonner les fils d'invar de longueur comprise entre 0,40 m (distance la plus courte séparant deux microscopes de lecture et deux supports de mire visibles sur la photographie au premier plan à gauche) et 56 m. Pour pouvoir mesurer les longueurs fractionnaires et non multiples de 4 m, le premier mètre de la règle est divisé en millimètres.

On a fait l'hypothèse que, pendant la durée de l'étalonnage d'un fil d'invar, environ un quart d'heure, la paroi du tunnel, recouvert de 4 m de terre

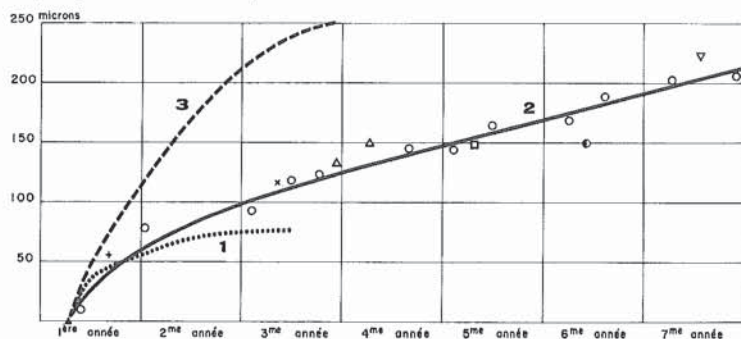
au minimum, restait stable dans ses dimensions. Cette hypothèse qui s'est révélée juste, a permis de fixer sur cette paroi les supports des microscopes. Il y a 13 supports fixes pour les reports de 4 m. Sur une longueur de 4 m, un support en fonte, portant deux rails de guidage en acier trempé, superposés et décalés, permet le positionnement isostatique des microscopes mobiles. Cette partie est utilisée pour l'étalonnage des longueurs fractionnaires. Tous les microscopes sont interchangeables, mais une fois posés sur leur support, ils restent isostatiquement fixes durant la durée de l'étalonnage.

Chaque microscope est équipé d'un objectif KERN de grossissement 3 et d'un micromètre oculaire H 4B de grossissement 10. Le grossissement total est de 30 et la distance focale de 46 mm. L'éclairage en lumière verte de la surface spéculaire de la règle est obtenu par un petit phare et un cylindre d'éclairage muni d'un miroir qui couvre la moitié du champ. La répétition de lecture avec ce type de microscope est de 0,5  $\mu$ m.

Un monorail en forme de double T, de 200 mm par 200 mm, sert de chemin de roulement à la règle de 4 m. Sa forme permet de fixer tous les supports nécessaires à l'étalonnage tout en acceptant avec des déformations très faibles les efforts de traction importants, de l'ordre de 150 à 200 N.

L'allongement de fils ou rubans d'invar en fonction du temps de mise sous tension a été mis en évidence grâce à la sensibilité du matériel utilisé au CERN. Notre attention fut attirée sur ce phénomène dès la première mesure d'un rayon de 105,85 m du synchrotron. En effet, le système de mesure, tel qu'il était réalisé, permettait de mesurer des déplacements de l'ordre de 1  $\mu$ m. Comme nous avons mis en évidence par la suite que l'allongement du fil était fonction de sa longueur, il était donc naturel que, dès le premier emploi des fils les plus longs, nous puissions nous apercevoir de cet allongement. Immédiatement alerté, le Bureau International des Poids et Mesures entreprit une série de tests sur des fils d'invar de 24 m, tests qui vinrent confirmer nos résultats. Ne pouvant nous soustraire à cet allongement, il fallut trouver une méthode de mesure qui élimine ces effets.

Les courbes de la figure 8 montrent les allongements des fils ou rubans de 24 m mesurés au BIPM et au CERN :



- 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 24 m - traction 196,18 N

Lieux d'utilisation du ruban voyageur  
 O Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres.  
 ▲ National Bureau of Standards, Washington.  
 + National Physical Laboratory, Teddington.  
 x National Standards Laboratory, Chippendale.

Fig. 8

▲ Institut Central de Recherches Scientifiques de Géodésie, Moscou.  
 □ Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig  
 ● Institut Géodésique de Finlande, Helsinki  
 ▼ Geographical Survey Institute, Tokyo

ALLONGEMENT DE FILS ET RUBANS D'INVAR EN FONCTION DU NOMBRE D'ANNÉES D'UTILISATION



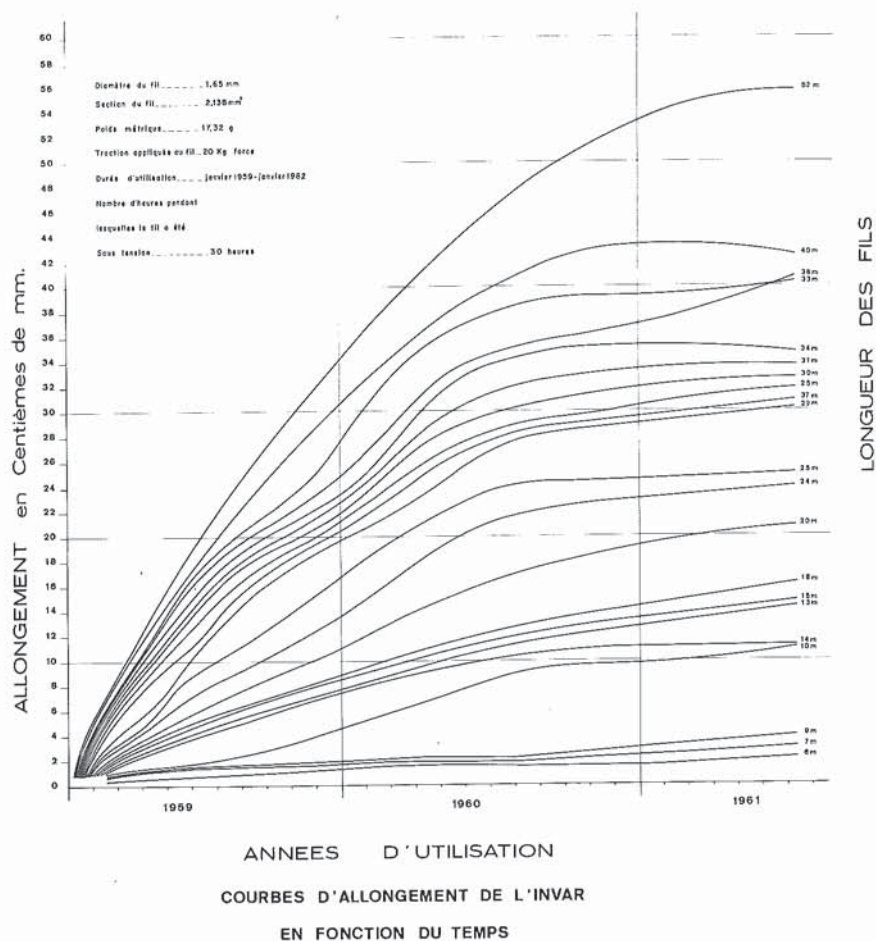


Fig. 9

— La courbe 1 correspond à la moyenne des allongements des fils d'invar de 24 m No 109 et 796 sous traction prolongée de 98.09 N pendant une année.

— La courbe 2 illustre les variations de longueur d'un ruban voyageur du BIPM de 24 m sous traction de 98.09 N en fonction du temps. Le ruban de 24 m en invar circule depuis 1955 dans six laboratoires équipés pour la mesure des étalons géodésiques. Les valeurs trouvées lors des étalonnages dans ces différents laboratoires ont permis de construire cette courbe.

— La courbe 3 est la moyenne de fils de 24 et 25 m étalonnés au CERN pendant plus de deux ans et

de 196.18 N.

La figure 9 montre, en fonction du temps, l'allongement du fil d'invar sous 196.18 N de traction. On voit que l'allongement est directement proportionnel au temps pendant lequel les fils ont été mis sous tension et à la longueur des fils.

La figure 10 illustre la deuxième partie du paragraphe précédent, à savoir qu'à traction constante, pour une même durée d'utilisation, l'allongement est une fonction linéaire de la longueur des fils. L'allongement moyen dans les conditions des étalonnages faits au CERN est, pour une période d'utilisation de

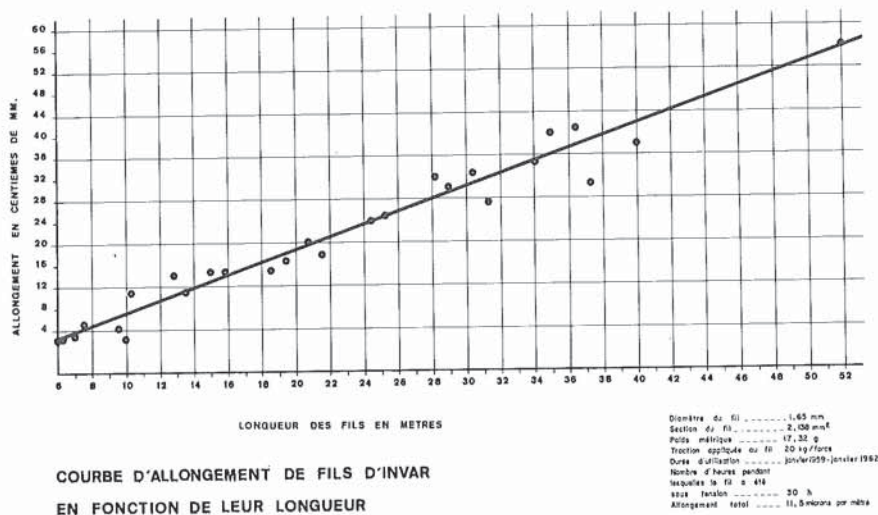


Fig. 10



30 heures échelonnées sur plus de deux ans, de  $11.5 \mu\text{m}$  par mètre. Pour des fils de 105.85 m, on calcule aisément que dans ces conditions, l'allongement du fil sous une traction de 198.16 N est de l'ordre de  $0.6 \mu\text{m}$  à la minute. Cette quantité a été confirmée par l'expérience, car elle est très facilement mesurable avec le système de mesure employé. En fait, ce sont ces résultats qui ont entraîné toute cette étude.

La concordance des résultats trouvés au CERN avec ceux du BIPM montre la qualité de l'appareillage mis au point par l'atelier de mécanique du CERN, ainsi que la qualité des mesures réalisées ; il est aussi significatif de noter que, dans tous les procès-verbaux des séances du Comité international des Poids et Mesures depuis 10 ans, le laboratoire de Métrologie du CERN soit mentionné à propos des études sur l'utilisation de l'invar.

Dans la valeur d'étalonnage des fils, on introduit la variation de longueur due à la dilatation du fil d'invar. En effet, lors de la livraison des torches d'invar, le BIPM prélève à notre demande aux deux extrémités de chaque torche, un échantillon de 24 m de longueur, après étuvage à une température maximum de  $76^\circ \text{C}$ .

Chaque échantillon est étudié séparément en le portant successivement à des températures voisines de  $40, 22.5, 5, 5, 25.5$  et  $40^\circ \text{C}$  dans le dilatomètre de 24 m situé dans la base géodésique du Bureau international des Poids et Mesures. Le fil est soumis pendant les mesures à une traction de 10 kg/force. La température est mesurée par huit thermomètres à mercure placés au voisinage immédiat du fil et les allongements sont déterminés à l'aide de deux microscopes micrométriques scellés dans le mur de la base, chacun à une des extrémités du dilatomètre.

Les valeurs du coefficient moyen de dilatation entre  $0$  et  $t^\circ \text{C}$  ont été mesurées pour les différentes torches d'invar utilisées au CERN.

La formule employée pour déterminer ce coefficient de dilatation est la suivante :

$$l = l_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

d'où

$$dl = l_0 dt (\alpha + 2\beta t)$$

Ce sont les deux coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  qui figurent dans le tableau (fig. 11).

Les valeurs du coefficient moyen de dilatation entre  $0$  et  $t^\circ \text{C}$  ont été mesurées pour les différentes torches d'invar utilisées au CERN.

La formule employée pour déterminer ce coefficient de dilatation est la suivante :

$$l = l_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

d'où

$$dl = l_0 dt (\alpha + 2\beta t)$$

Ce sont les deux coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  qui figurent dans le tableau. Exemple : torche 1 (1957) extrémité A :

$$17^\circ \text{C} = (-0.012 + 2 \times 0.00315 \times 17) 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

$$17^\circ \text{C} = +0.095 10^{-6} \text{K}^{-1}$$

Dès que le synchrotron de 28 GeV fut entré en fonctionnement, nous avons entrepris le développement et la mise au point d'un appareil nouveau : le Distinvar (fig. 12) qui puisse conserver la précision d'étalonnage dans les reports tout en permettant une plus grande rapidité d'emploi.

Pour tenir compte de l'allongement de l'invar et afin de le maintenir dans des limites raisonnables, il a été

COEFFICIENT MOYEN DE DILATATION POUR LES TORCHES D'INVAR UTILISEES AU CERN				
Année	Torche	Extrémité	$\alpha$	$\beta$
1957 Coulée 80.906	1	A	$(-0.012 + 0.003 15 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.005 + 0.003 12 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	2	A	$(+0.018 + 0.003 10 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.014 + 0.003 06 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	3	A	$(-0.019 + 0.003 06 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.020 + 0.002 99 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
1962 Coulée 80.906	3	B	$(+0.020 + 0.003 15 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
1968 Coulée 78.621	2	A	$(+0.048 + 0.000 80 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.038 + 0.000 71 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	3	A	$(+0.064 + 0.000 98 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.064 + 0.000 72 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
1971 Coulée 63.404	1		$(-0.054 + 0.002 00 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
			$(-0.073 + 0.001 96 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	2	A	$(-0.048 - 0.000 02 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.007 - 0.000 07 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
1972	2	A	$(-0.062 - 0.000 09 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(-0.068 - 0.000 18 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	3	A	$(-0.036 - 0.000 05 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(-0.071 - 0.000 02 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	4	A	$(-0.050 - 0.000 22 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(-0.071 - 0.000 28 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
	5	A	$(-0.055 - 0.000 13 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(-0.026 - 0.000 13 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
1976	1	A	$(+0.064 - 0.000 18 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$
		B	$(+0.077 - 0.000 21 t) 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10^{-6} \text{K}^{-1}$

Fig. 11

décidé de ramener la traction appliquée au fil d'invar à 147.13 N.

Le Distinvar (fig. 12) a déjà été décrit en détail dans la Revue de l'A.F.T. N° 2, février 1980.

Les figures 13 et 14 montrent les histogrammes de 1 000 mesures effectuées au Distinvar manuel à l'air libre et dans une enceinte à température constante. L'écart-type est de 38.2 m dans le premier cas et de 14.7 m dans le second. Depuis 1962 l'emploi intensif du Distinvar a été un des éléments du succès de la méthode du CERN.

Pour pouvoir conserver la précision des mesures dans les opérations de mise en place des éléments fonctionnels des accélérateurs, le groupe de Métrologie a mis au point des vérins d'un type particulier adapté à ce genre de besoin. (fig. 18, 19)

Les "éléments de positionnement" utilisent, non plus des pièces mises en mouvement par des vis soulagées ou non par un système hydro-pneumatique — en général de l'huile — mais des pastilles de polyuréthane (plastique jouissant de propriétés particulières

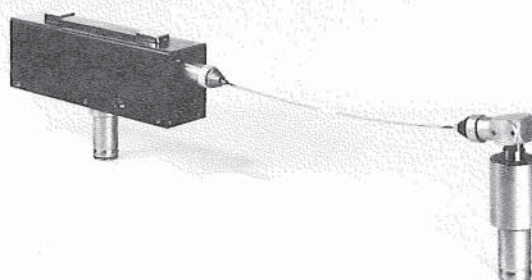


Fig. 12



HISTOGRAMME DE 999 MESURES DE 50 M AU DISTINVAR MANUEL  
A L'AIR LIBRE

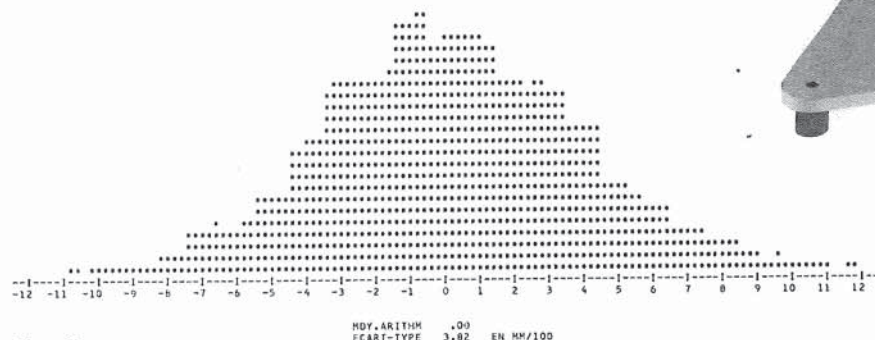


Fig. 13

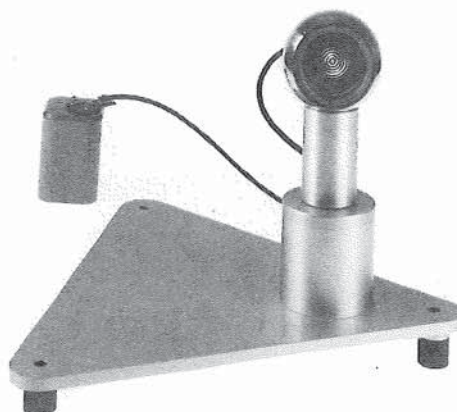


Fig. 16 : Mire Taylor Hobson assurant un pointé sur une référence unique, le centre de la sphère usinée à 1 m.

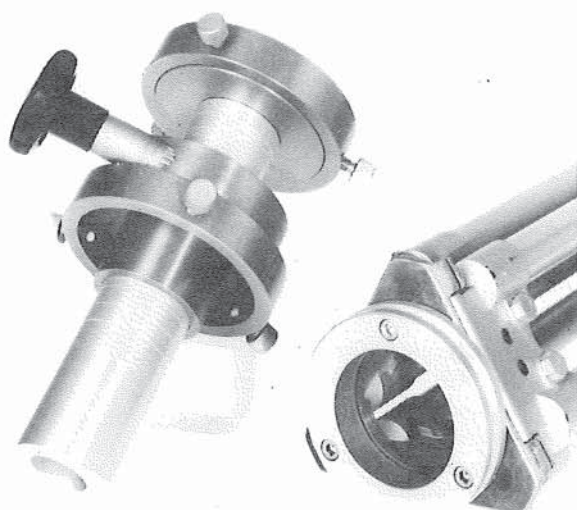


Fig. 15 : Pied ascenseur pour mettre facilement le niveau à la cote cherchée.

HISTOGRAMME DE 991 MESURES DE 50 M AU DISTINVAR AUTOMATIQUE  
DANS UNE ENCEINTE A TEMPERATURE CONSTANTE

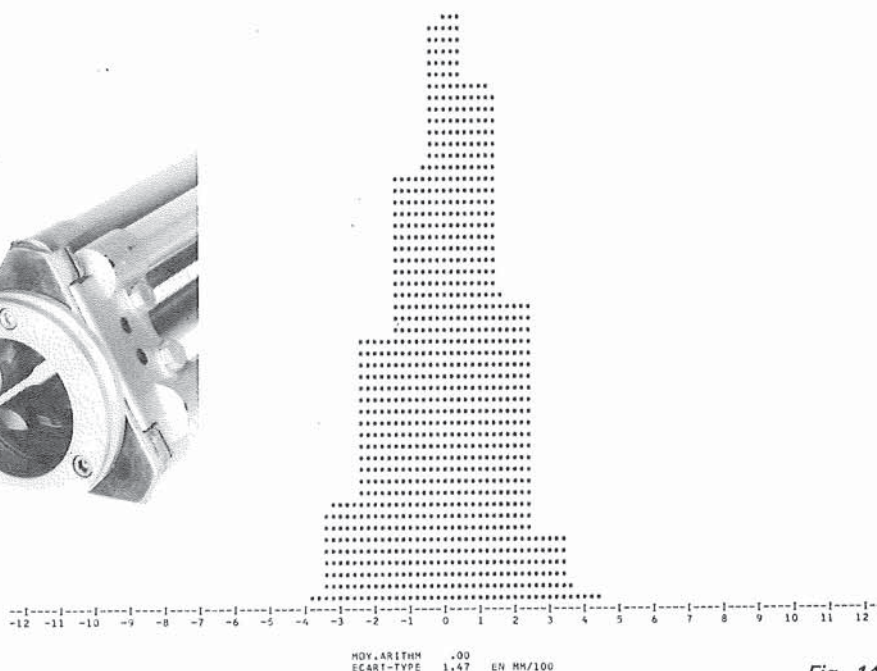


Fig. 14

# ISR . CORRELATION ENTRE L'ORBITE ET LE NIVELLEMENT DES AIMANTS

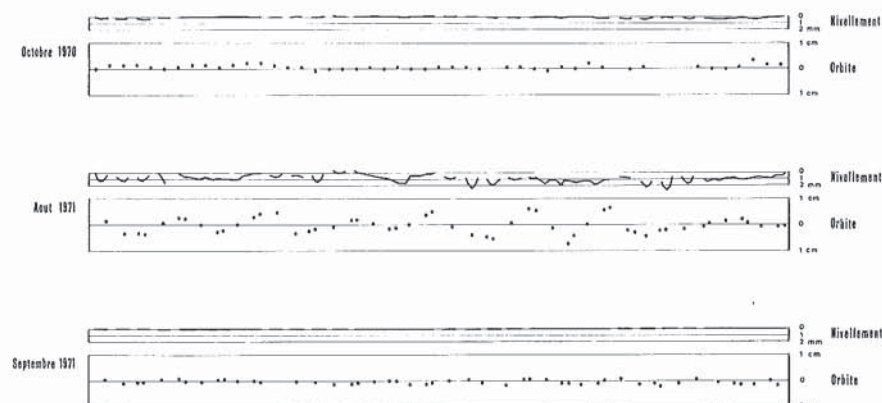


Fig. 17 : Corrélation entre l'orbite fermée des anneaux de stockage à intersections et les résultats du nivellement.

et résistant aux radiations) logées à l'intérieur d'un cylindre (comme un cylindre de moteur à explosion). Sous l'effet de la charge, le polyuréthane remplit totalement le volume du cylindre, toute modification produite par un piston permet un déplacement dans un sens ou dans l'autre, déplacement que l'on peut contrôler à 10 m sans difficulté. Il existe plusieurs milliers de ces éléments de positionnement dans les accélérateurs du CERN. Ils fonctionnent depuis plus de 7 ans sans avoir jamais créé de difficulté.

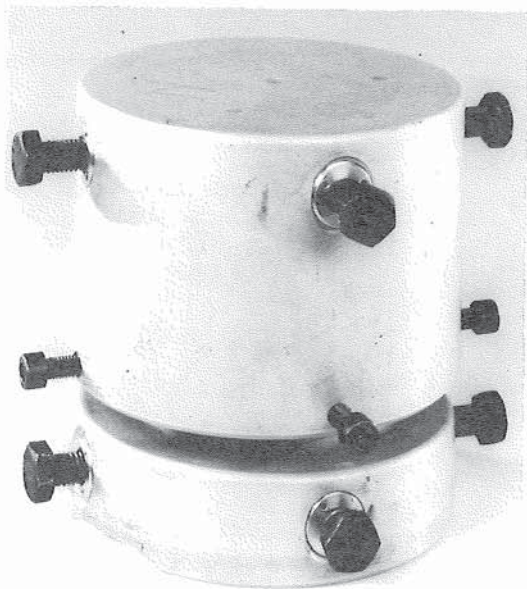


Fig. 18

## II — LA NÉCESSITÉ DES MESURES SURABONDANTES POUR PALLIER L'IMPOSSIBILITÉ DE SUPERPOSER DEUX FIGURES DE RÉFÉRENCE SANS CHOIX ARBITRAIRE DE POINTS FIXES - LE "LISSAGE DE LA COURBE"

La figure de référence servant à la mise en place des aimants des anneaux de collisions est constituée par une chaîne de quadrilatères complets (fig. 20). Ces quadrilatères de longueur 30,64 m et de largeur 12,80 m, soit un facteur 2 entre ces dimensions, ont rendu possible d'effectuer uniquement des mesures de distance pour déterminer les positions X, Y des alésages fixés sur les piliers de référence.

Dans toute triangulation classique, on ferme les triangles pour être sûr que la figure mesurée est géométrique. Il a fallu de même établir la relation qui lie

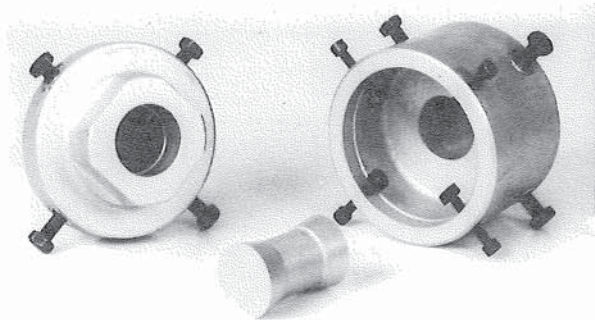


Fig. 19

entre elles les six longueurs d'un quadrilatère complet (fig. 21).

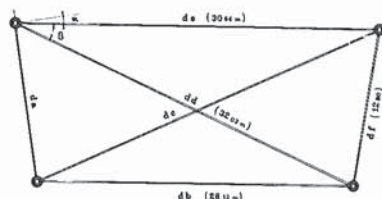
L'histogramme de la figure 22 montre la répartition des écarts de fermeture de 192 mesures, soit 6 fois la chaîne complète de la figure de référence formée de 32 quadrilatères. L'écart-type est de 33,4 μm.

Les dimensions des quadrilatères complets de la figure de base de la métrologie du SPS (fig. 23) ne permettaient pas d'atteindre la même précision du fait de la largeur du tunnel. Le rapport 10 entre la longueur — 32,077 m — et la largeur 3,516 m — était très défavorable. Un grand nombre de mesures des écarts d'alignement dut être effectué soit avec l'appareil d'alignement au fil nylon dans les régions courantes du tunnel, soit avec le système d'alignement laser à récepteur asservi (voir revue de l'A.F.T. N° 2, février 1980). Ces mesures surabondantes assuraient une bien meilleure valeur de la courbure de la figure de référence.

L'estimation a posteriori de la précision est donnée par le coefficient de redondance :  $\tau$

$$\tau = \frac{N \text{ observations}}{n \text{ inconnues}}$$

Dans les anneaux de collision, la valeur  $\tau$  est de 1.28 et de 1.93 pour le SPS.

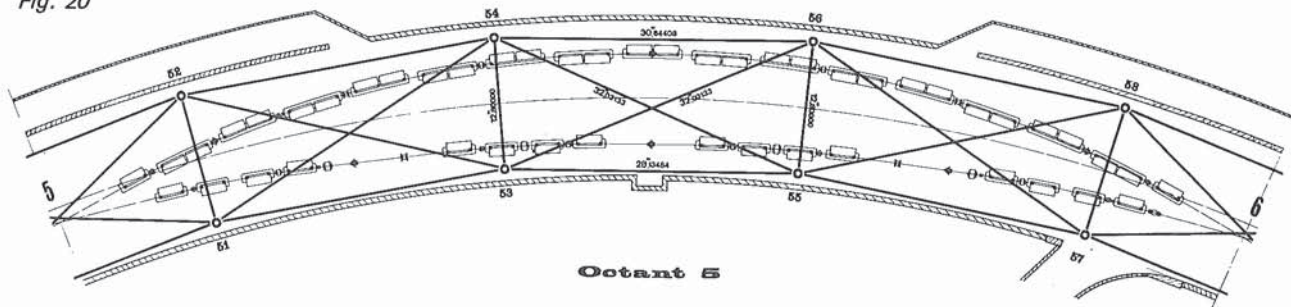


$$c = (da + df) \sin \beta - (dc + dd) \cos \alpha + db \cos \gamma + de \cos \delta \text{ avec } \gamma = (\beta + \alpha) \text{ et } \delta = (\beta - \alpha)$$

Equation de fermeture d'un quadrilatère ISR

Fig. 21

Fig. 20





HISTOGRAMME DE 192 EQUATIONS DE CONDITION  
DES 32 QUADRILATERES ISR

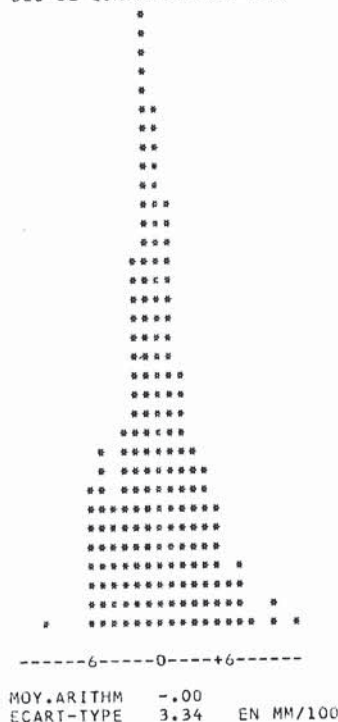


Fig. 24

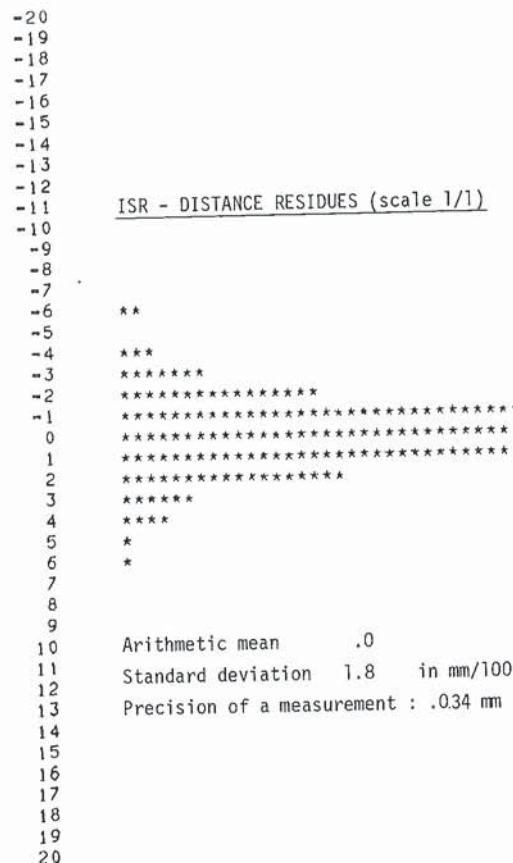


Fig. 22

A partir de la valeur de on obtient :

$$\sigma_{\text{est}} = \sigma \sqrt{\frac{n}{N-n}} = \sqrt{\frac{1}{\tau-1}}$$

Dans les anneaux de collision (fig. 24) l'étude statistique des résidus après compensation donne un écart-type  $\sigma = 18\mu\text{m}$ , ce qui avec  $\tau = 1.28$ , fournit la valeur estimée de la précision  $\sigma_{\text{est}} = 34\mu\text{m}$ .

Au SPS, la même étude donne pour les mesures et distances, un écart-type  $\sigma = 33\mu\text{m}$ , ce qui, avec un  $\tau = 1.93$ , fournit aussi une valeur estimée de la précision  $\sigma_{\text{est}} = 34\mu\text{m}$ .

Ces résultats montrent qu'après des dizaines de milliers de mesures effectuées au Distinvir, pendant près de 20 ans, la limite de la précision des mesures se situe entre 30 et 40  $\mu\text{m}$  pour des distances allant jusqu'à 50 m. Cette valeur inclut l'étalonnage et le transport de la mesure entre les pièces à positionner.

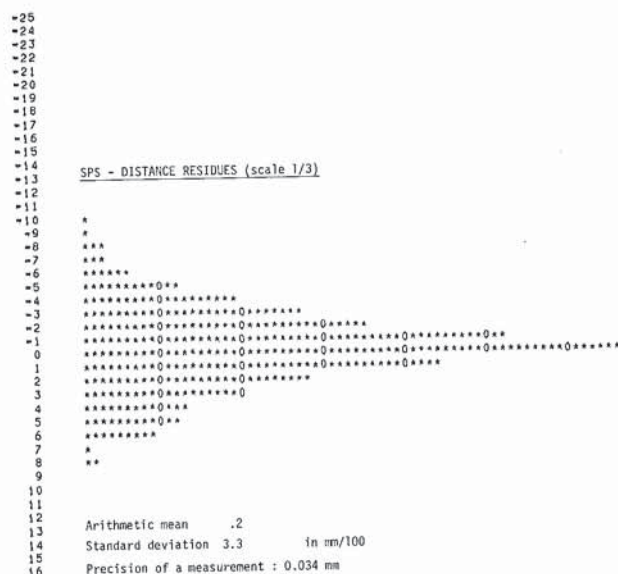
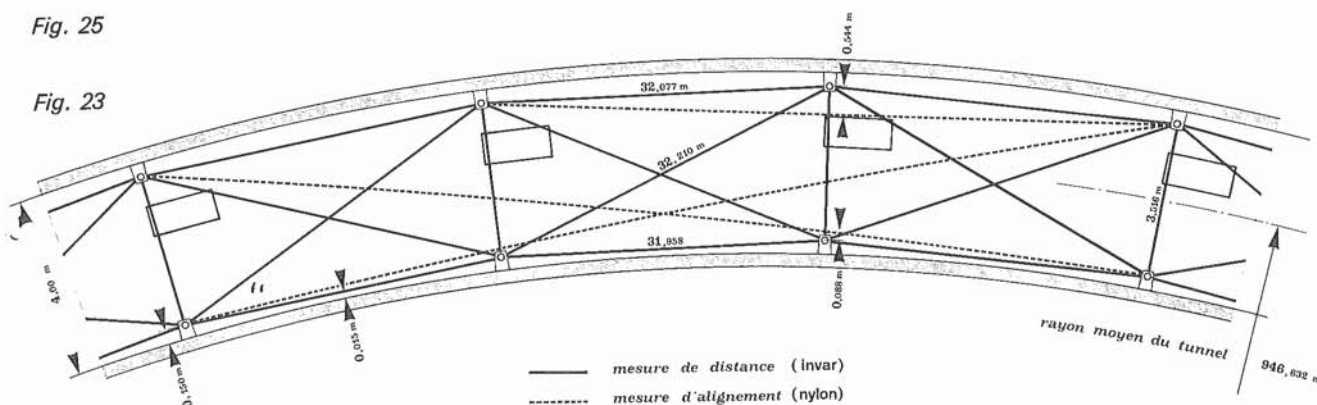


Fig. 25

Fig. 23





La figure 26 est d'une grande importance pour la compréhension globale du problème de topométrie industrielle.

Pour chacun des six points issus de la géodésie de surface, au niveau du tunnel, l'écart-type radial par rapport au centre virtuel de l'accélérateur était de 1.3 mm. Pour la chaîne métrologique des potences, calées sur ces 6 points, l'examen des ellipses d'incertitude montre qu'après compensation globale de la circonférence, les incertitudes radiales sont sensiblement analogues pour chaque sextant. Elles croissent progressivement à partir du point de calage, atteignent leur maximum au milieu du sextant pour décroître ensuite et s'annuler au point de calage suivant, décrivant ainsi une enveloppe ayant l'allure d'un fuseau. Pour la dernière mesure complète effectuée, l'écart maximum atteint 1.2 mm.

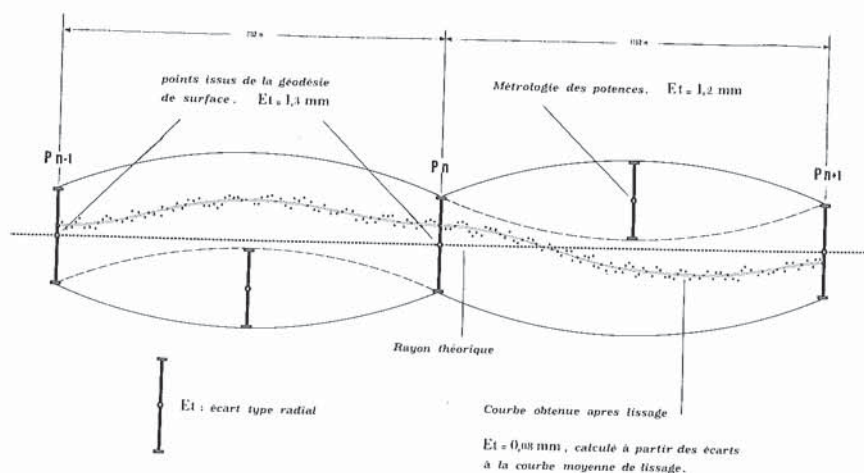


Fig. 26

Les erreurs propres à la mise en place des quadrupoles par rapport aux potences ont été négligées. Du fait de la grande sensibilité des vérins polyuréthanes, on estime que, sur l'ensemble des 216 quadrupoles, l'incertitude par rapport aux potences est inférieure à 0.03 mm. L'ensemble des incertitudes radiales de la géodésie de surface combiné à celles de la métrologie souterraine fournit, pour chaque sextant, une enveloppe en forme d'un cigare de 1.152 m de long et dont la valeur maximum au milieu de chaque sextant atteint 2.5 mm alors qu'elle n'est que de 1.3 mm aux points de calage. Ces dernières valeurs sont sans incidence directe sur la bonne marche de l'accélérateur, pour autant que l'erreur radiale relative  $dr$  de trois quadrupoles successives reste dans la limite étroite fixée par les paramètres de la machine (0.15 mm) contraignant ainsi la courbe des positions successives des quadrupoles à demeurer continue avec une croissance ou une décroissance discrète. Par analogie avec les cheminements en topométrie ou l'aérotirangulation en photogrammétrie, on peut penser que cette courbe suit la loi de déformation des réseaux linéaires, par double sommation des erreurs accidentelles. Son allure générale sera celle d'une courbe du second, ou, plus rarement, du troisième degré. Elle s'inscrit d'une façon aléatoire dans l'enveloppe définie dans la figure 27 et constitue parmi une infinité, une estimation de la ligne théorique implantée.

Les opérations de lissage ont consisté en des mesures successives de la courbure locale exécutées

sur les références des quadrupoles elles-mêmes (fig. 27) grâce aux appareils d'alignement. La comparaison de cette courbure à la courbure théorique permet de connaître localement les positions par rapport à une courbe moyenne dont il n'est pas possible de connaître la localisation (XY) absolue. Ceci s'obtient, dans le calcul par les moindres carrés, en résolvant les relations d'observations sous la double condition " $\sum v^2$  minimum et  $\sum dR^2$  minimum ( $v$  étant les résidus sur les mesures et  $dR$  l'écart à la courbe).

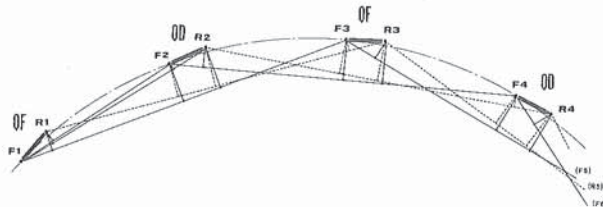


Fig. 27

Le processus est essentiellement un contrôle. Il a permis, lors de la première installation définitive, une estimation directe des erreurs relatives résiduelles. A partir des résultats du lissage, la valeur calculée du paramètre  $dr$ , écart radial d'une quadrupole par rapport aux deux qui l'encadrent, est de 80  $\mu$ m pour l'ensemble des 216 quadrupoles, réparties tous les 32 m le long de la circonférence du synchrotron. Depuis la mise en marche de l'accélérateur le 17 juin 1976, il n'a pas été nécessaire de reprendre la mesure de l'ensemble des quadrupoles.

Cette année, la nécessité d'adapter la machine à accélérer des anti-protons en même temps que les protons mais en sens contraire, et d'installer dans deux zones d'interactions pp l'appareillage gigantesque que nécessitent les expériences de physique, il va falloir mesurer à nouveau la position des quadrupoles.

Dans l'état actuel des possibilités de la géodésie, on ne fera pas de mesure des sommets des quadrilatères complets matérialisés par les alésages situés dans les potences fixées au mur. En effet, il serait assez difficile de superposer la figure de la géodésie de surface sur celle mesurée en 1976 sans la contraindre. De même, il sera impossible de superposer la chaîne de la métrologie souterraine et de la caler sur les 6 points dont les coordonnées auront changé.

Si l'on devait effectuer ces opérations successives, on obtiendrait, entre les 6 points de calage, de longs cigares qui seraient différents de ceux obtenus en



1976. Déplacer ensuite les quadrupoles en fonction de nouvelles coordonnées des pôtes conduirait à un travail gigantesque et qui ne servirait à rien, car on ne serait pas sûr d'obtenir une meilleure courbe lisse pour les quadrupoles que celle existant actuellement. La seule opération qu'il est réaliste d'envisager est de faire un nouveau lissage de la courbe passant par les alésages fixés sur les quadrupoles. Le lissage se fera pour la position planimétrique et altimétrique.

Les progrès à venir sont, pour les géodésiens, de trouver une solution à ce problème de superposition de figures, non seulement pour les problèmes du CERN, mais pour ceux, beaucoup plus généraux, de la géodésie. Ceci d'ailleurs devient de plus en plus urgent du fait que la précision des instruments diminue les dimensions des ellipses d'incertitudes et réduit par la même occasion les fourchettes dans lesquelles on peut considérer un point comme fixe.

## CONCLUSION

La figure 28 montre de la 54 à la 76 l'évolution des résultats de mesure des paramètres principaux de la géométrie qui ont une influence sur l'orbite des particules accélérées.

dr : écart radial de la position d'une quadrupole par rapport aux deux qui l'encadrent.

	CPS (rayon 100 m)		ISR (rayon 150 m)		SPS (rayon 1100 m)	
	1954 Et projet	1959 Et résultats	1967 Et projet	1971 Et résultats	1971 Et projet	1976 Et résultats
dr (mm)	0.6	0.15	0.15	0.08	0.15	0.08
dh (mm)	0.3	0.12	0.15	0.10	0.15	0.10
dt (mrad)	—	—	0.02	0.02	0.10	0.02

Fig. 28

dh : écart-type vertical d'une quadrupole par rapport aux deux qui l'encadrent. Très voisin du plan horizontal.

dt (tilt) : écart-type de l'inclinaison des aimants.

Dans les trois cas, les écarts-types obtenus ont été inférieurs à ceux qui avaient été fixés dès le début du projet, après de longues discussions entre les responsables du projet et ceux de la géométrie.

Il est possible, il est probable que *localement*, dans des *conditions favorables* en laboratoire et pendant *la durée des mesures*, on obtienne des valeurs de ces incertitudes plus petites. Il reste à savoir comment il sera possible de les exploiter et comment elles évolueront dans le temps. Parler de  $\mu\text{m}$  c'est bien, le conserver, c'est une autre histoire.



# G.T.A.S.

Géodésie Télémétrie Assistance

Tél 806.66.25

Réparation

Vente

Achat

Location

*Toutes Marques*

Niveaux

Théodolites

Tachéomètres

# G.T.A.S.

Géodésie Télémétrie Assistance

24 rue Rochebrune — 75011 — PARIS Métro : Voltaire — St-Maur