

Automation des instruments de mesure pour la métrologie du LEP

par W. COOSEMANS
CERN

I — Introduction

En 1981, le Conseil du CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) a approuvé la construction d'un collisionneur électrons-positons, le LEP. Cette machine est l'instrument indispensable pour pousser plus avant les connaissances fondamentales de la structure de la matière et des forces qui gouvernent l'univers. Le choix du CERN s'est fait en tenant compte des recommandations de l'ECFA (Comité Européen pour les Futurs Accélérateurs) qui regroupe les physiciens de la Communauté Européenne.

Une étude géologique poussée, associée à une étude d'impact sur l'environnement, ont permis de positionner cette machine de 27 km de circonférence dans le sous-sol proche des installations CERN existantes, de part et d'autre de la frontière franco-suisse, 7/8 dans le pays de Gex et 1/8 dans le Canton de Genève. L'accélérateur est logé dans un tunnel d'une section de 3,8 m de diamètre et foré à une profondeur allant de 50 à 170 m. Quatre halls d'expériences seront creusés en sous-sol à proximité immédiate de zones où les particules entrent en collision.

L'accès au tunnel depuis la surface se fera par l'intermédiaire de puits creusés dans huit zones réparties autour de l'accélérateur.

Une des tâches confiées au Groupe de Géodésie Appliquée par le Directeur du projet est l'implantation et l'alignement en position théorique des éléments fonctionnels de la machine, soit 3400 électro-aimants de courbure et 1200 électro-aimants de focalisation plus quelques centaines d'éléments de contrôles.

II — Métrologie souterraine - Géodésie de surface

La chaîne métrologique de base (figure 1) s'appuiera sur 1424 points qui sont les alésages de références qui équipent les aimants de focalisation quadrupolai-

res (deux alésages par aimant). Elle sera déterminée par des mesures de distance, des mesures d'écart à l'alignement et des mesures de dénivelée géométrique.

La chaîne sera fixée sur des points de référence provenant du réseau géodésique de surface (figure 2) et matérialisés au fond des puits d'accès. La position d'un quadrupôle doit être assurée avec une précision de 0,1 mm par rapport aux deux qui l'encadrent. La position absolue doit être la plus précise possible. Deux quadrupôles sont distants de 39,5 m. La précision absolue de l'alignement des éléments de la machine est directement tributaire de la qualité du réseau de géodésie de surface. Celui-ci a été déterminé par trilatération et les mesures ont été faites au moyen d'un distancemètre à deux couleurs, le Terramètre LDM2 (Terratechnology Corp., USA). Le réseau a été traité en variation de coordonnées par un programme de compensation tridimensionnelle. L'écart-type sur les distances est de 1,3 mm. Les axes des ellipses de dispersion autour des coordonnées compensées sont inférieurs à 1,5 mm. Une campagne de nivellement de précision, effectuée au NI2 de ZEISS, a permis de déterminer l'altitude de tous les piliers avec un écart-type de 3 mm. L'erreur moyenne quadratique sur le rattachement des points de fond de puits au réseau est estimée à 1,3 mm. Cette valeur, combinée aux 1,5 mm du réseau donne un écart-type de 2 mm sur les repères en fond de puits. L'enveloppe des erreurs moyennes quadratiques sur la position absolue de la chaîne métrologique pour un octant (3332,4 m) a été calculée ; elle reste inférieure à 6 mm (figure 3).

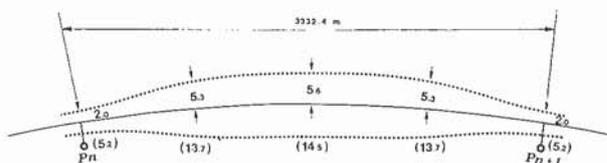


Figure 3 : Enveloppe des écarts-types

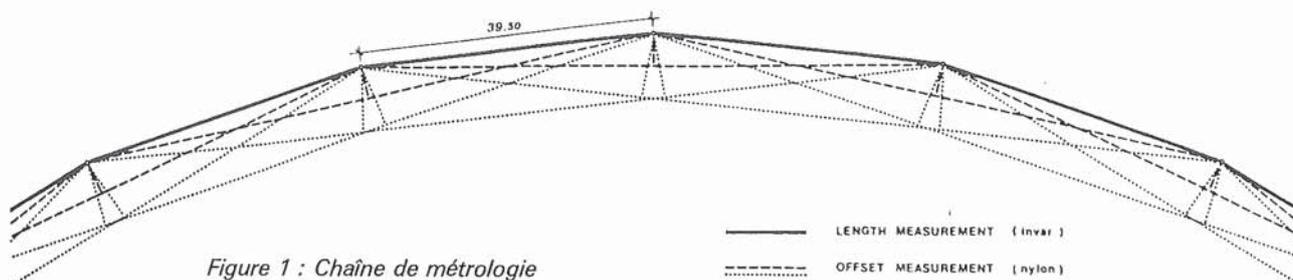


Figure 1 : Chaîne de métrologie

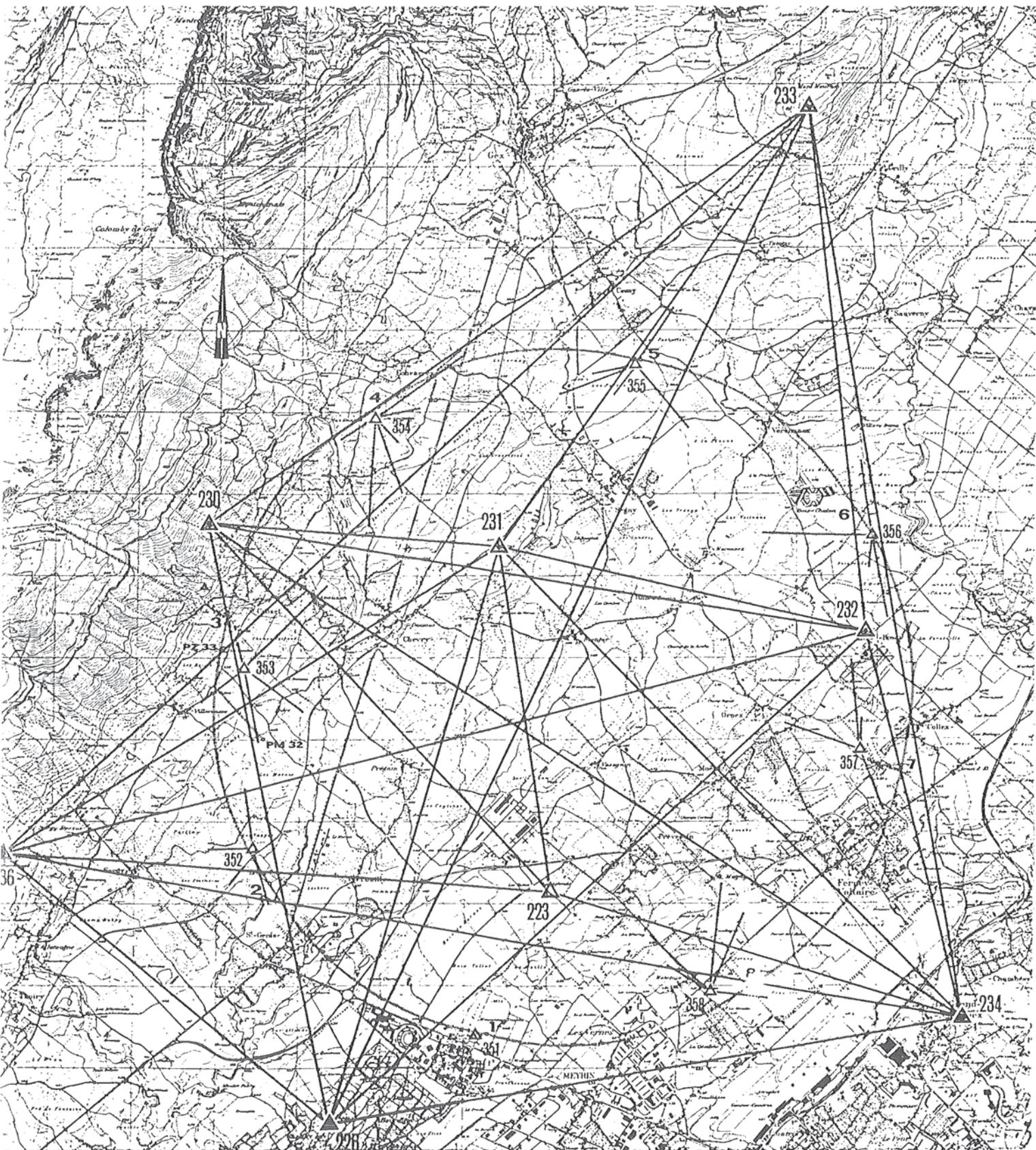


Figure 2 : Réseau géodésique

III— Séquences des travaux de géodésie et de métrologie pour l'alignement du LEP

- Mesure du réseau géodésique de surface ;
- Descente des verticales et mesure des points de fond de puits ;
- Mesure planimétrique avec rattachement aux points de fond de puits des piliers ayant servi aux travaux de génie civil (distance entre deux piliers : 39,5 m) ;
- A partir de ces piliers, traçage au sol de deux repères par quadripôles pour l'implantation de ceux-ci ;
- Cheminement altimétrique sur ces repères et rattachement aux points de fond de puits ;
- Installation des quadripôles : réglage précis des inclinaisons longitudinales et transversales, réglage provisoire par rapport aux repères au sol de l'altitude et de la planimétrie ;
- Mesure altimétrique et planimétrique des alésages de référence des quadripôles et des repères de fond de puits ;
- Réglage précis de l'altimétrie et de la planimétrie des quadripôles ;
- Mesure altimétrique et planimétrique des quadripôles pour un lissage ;
- Déplacement d'un certain nombre de quadripôles pour réaliser ce lissage ;
- Alignement de tous les autres éléments à partir des alésages des quadripôles.

IV— Orientation du développement instrumental

La méthode qui sera utilisée pour l'alignement du LEP est un compromis entre les différentes techniques utilisées dans le passé pour la métrologie des machines déjà en service. Les points essentiels sont :

- la chaîne métrologique s'appuie sur les éléments à mettre en place,
- un élément est mis en place par rapport aux deux qui l'encadrent,
- la courbe est lissée après la mise en place de tous les éléments.

Les principes des mesures et des instruments seront identiques à ceux mis en œuvre dans le passé. Les choses fondamentalement nouvelles sont la dimension du LEP et le nombre impressionnant d'éléments fonctionnels à installer. Seules l'automatisation et l'informatisation des instruments de mesure et des méthodes permettront d'envisager avec optimisme la réalisation d'un tel ouvrage.

V— Principe de l'automatisation

Tous ces instruments doivent être d'une utilisation souple, adaptables aux besoins spécifiques de l'utilisateur et facilement interfaçables. Ces contraintes seront satisfaites en incorporant dans chaque instru-

ment un même micro-ordinateur, chargé à la fois d'en assurer le contrôle et de dialoguer avec l'utilisateur.

Cette approche présente de multiples avantages, et en particulier :

- minimisation du travail de développement, puisque la partie requérant l'effort le plus important est la carte microprocesseur qui, étant standardisée, est d'autant plus facilement amortie que le nombre d'instruments différents est grand.
- simplification de la maintenance, la partie spécifique à chaque instrument étant réduite.
- simplification de l'utilisation, car tous les instruments comportent le même système logiciel.

L'instrument est relié au monde extérieur par un connecteur unique. Dans celui-ci se trouvent deux lignes nécessaires à son alimentation électrique ainsi qu'une liaison au standard de communication RS 232 (norme de communication série asynchrone).

Chaque instrument est facilement programmable en BASIC par l'utilisateur qui peut le configurer selon ses besoins.

VI— Le micro-ordinateur

VI.1 Matériel

Ce micro-ordinateur (figures 4,5), construit autour du microprocesseur NSC 800, est constitué d'un unique circuit imprimé à quatre couches, réalisé selon la technique "souple-rigide", mesurant 177 mm de longueur, 55 mm de largeur et 10 mm d'épaisseur, composants compris.

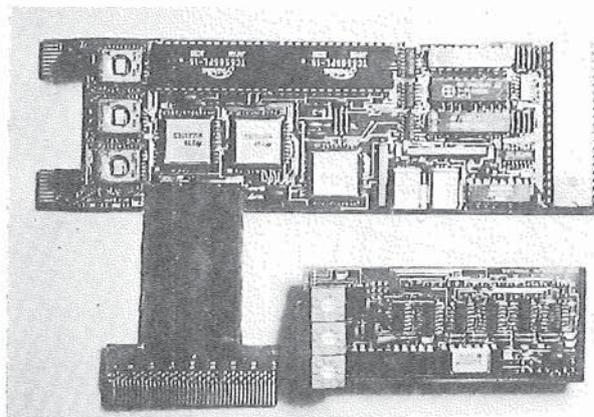


Figure 4 : Micro-ordinateur et interface du distinvlar

Les composants sont essentiellement des circuits intégrés utilisant la technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), qui ne consomment qu'une très faible puissance électrique. De ce circuit imprimé rigide sort une bande de circuit imprimé souple (longueur 50 mm, largeur 30 mm), au bout de laquelle se trouve la partie mâle du connecteur du micro-ordinateur. C'est grâce à ce connecteur que se font toutes les liaisons entre le micro-ordinateur et le reste de l'appareil. En bout du circuit imprimé rigide un autre connecteur sert à la program-

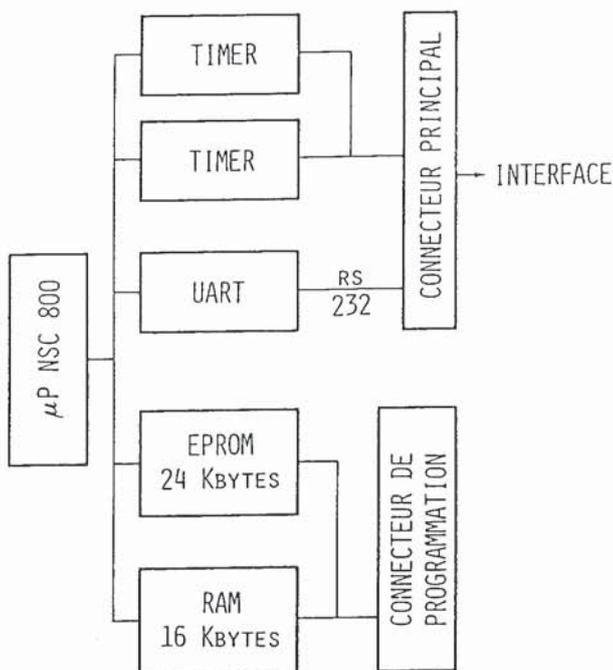


Figure 5 : Structure du micro-ordinateur

mation des mémoires mortes EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory).

VI.2— Logiciel

Une zone de mémoire morte EPROM de huit mille octets contient le moniteur et des programmes écrits en langage ASSEMBLEUR, que l'on peut appeler simplement depuis tout programme écrit en BASIC. Ces programmes permettent d'actionner les organes électromécaniques ou électro-optiques de l'instrument.

L'utilisateur dispose d'une zone de huit mille octets pour loger en mémoire morte (EPROM) un ou plusieurs programmes, écrits en langage BASIC. Ces programmes peuvent ensuite être appelés simplement pour être chargés en mémoire vive RAM (Random Acces Memory), puis exécutés. Le premier de ces programmes est automatiquement chargé, puis exécuté, à la mise sous tension du micro-ordinateur. La zone RAM contient seize mille octets.

Enfin l'interpréteur BASIC est logé dans une zone de mémoire morte (EPROM) de huit mille octets.

VII— Les interfaces

Le micro-ordinateur est associé à un circuit d'interfaçage (figures 4,6) disposé sur un ou plusieurs circuits imprimés miniatures qui remplissent les fonctions suivantes :

- alimenter électriquement les différents composants (micro-ordinateur, capteurs, moteurs, etc.),
- gérer les lignes de communications RS 232,
- actionner, sur l'ordre du micro-ordinateur, les systèmes électromécaniques,
- envoyer au micro-ordinateur les informations des encodeurs ou des capteurs électro-optiques.

— gérer une mémoire EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory). Cette mémoire peut contenir seize données numériques propres à chaque instrument (N° de l'instrument, constantes, etc.). Ces données peuvent être lues et modifiées (depuis le BASIC).

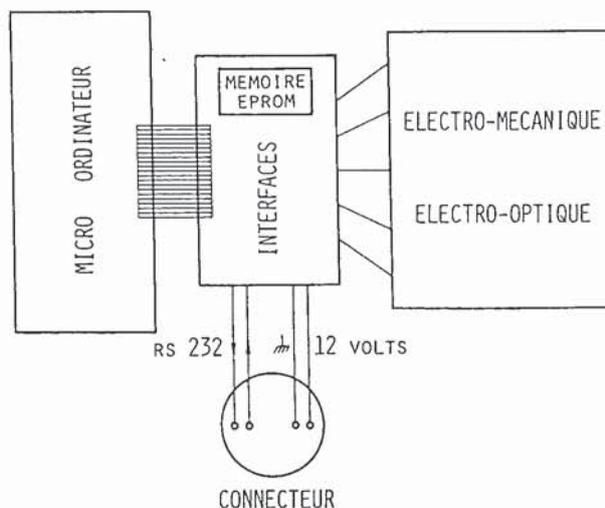


Figure 6 : Structure d'un instrument

VIII— Les instruments de mesure

VIII.1— Le Distinvar

La transformation de cet instrument selon les principes évoqués plus haut est terminée et sa construction en série a commencé (figure 7).

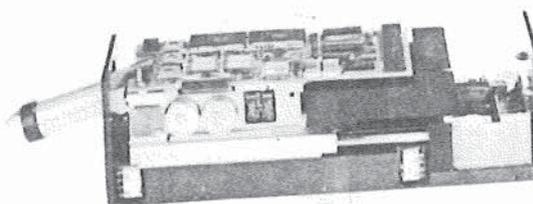


Figure 7 : Distinvar

VIII.1.1— Rappel du principe du Distinvar

Le Distinvar est composé de trois éléments, le fil d'invar géodésique avec ses embouts de fixation (figure 8), le "point fixe" et l'appareil de mesure d'appoints. Les deux derniers éléments comportent une pièce mâle permettant un centrage mécanique rigoureux dans des alésages de précision de 30 mm de diamètre. Ces alésages doivent être verticaux et constituent les extrémités de la longueur à mesurer.

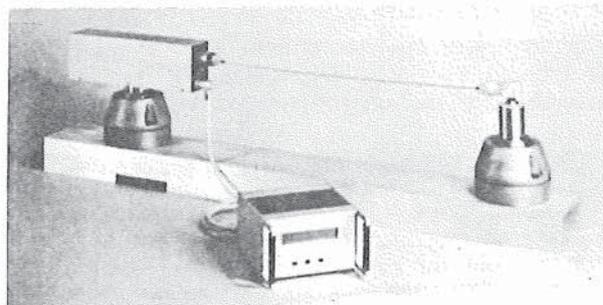


Figure 8 : Distinvar, point fixe, contrôleur

En fait, l'appareil de mesure d'appoints est une balance de précision montée sur un chariot mobile (figure 9). Cet appareil, et le "point fixe", sont placés dans les alésages de référence. Le fil d'invar est accroché, d'un côté au "point fixe" et de l'autre à l'embout de la balance ; un mouvement du chariot mobile a donc pour effet de tendre ou de détendre le fil d'invar. On déplace le chariot pour rechercher le point d'équilibre de la balance. Ce point d'équilibre est défini par un système qui détecte la position du fléau, et par là-même, la tension du fil d'invar. En fonction de l'information fournie par le système de détection, le chariot peut se déplacer automatiquement en avant ou en arrière au moyen d'un moteur réversible et d'une vis micrométrique. Un compteur solidaire de cette vis indique la position longitudinale du chariot.

La course totale du chariot est d'environ 50 mm. Selon les fils d'invar utilisés, le distinvar peut mesurer des longueurs pouvant aller jusqu'à 50 m.

Le fil utilisé couramment (en Europe) est le "fil d'invar géodésique", d'un diamètre de 1,65 mm et d'une masse de 17,32 g/m.

L'ensemble appareil de mesure d'appoints, point fixe et fil est un étalon secondaire ; il doit, pour définir les longueurs absolues, être comparé à un étalon primaire.

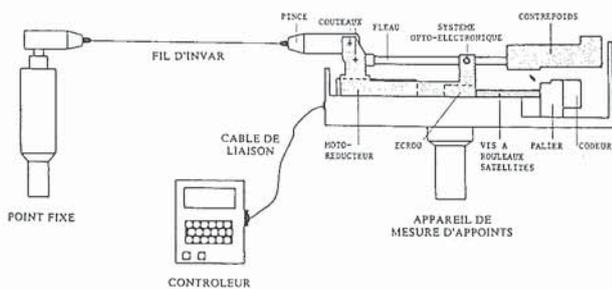


Figure 9 : Schéma de principe du Distinvar

VIII.1.2— Programmes contenus dans le micro-ordinateur du distinvar

En version standard, on trouvera en mémoire morte quatre programmes BASIC qui rempliront les fonctions suivantes :

- faire une mesure (programme donné en exemple),
- analyser statistiquement les mesures qui sont faites,
- contrôler et tester le bon fonctionnement de l'appareil,
- lire et modifier les données dans la mémoire EEPROM de l'interface.

On trouvera également écrit en Assembleur et directement accessible depuis le BASIC les fonctions spécifiques à l'instrument (Annexe 1).

VIII.1.3— Exemple de programme de mesure

Nous donnons ici un exemple complet de programme de mesure, (annexe 2) écrit par un utilisateur. L'objet de ce programme, qui occupe 924 octets en mémoire, est de déclencher la mesure d'une longueur chaque fois que l'opérateur tape sur

la touche "Return" du clavier qui est connecté au distinvar. A l'issue de cette mesure la position de la platine mobile, qui correspond à une tension de 14,71 daN sur le fil, est inscrite sur l'écran. Finalement la platine mobile retourne en position "fil détendu".

La partie du programme qui réalise la mesure a pour tâche de trouver la position de la platine qui met le contrepois dans sa position d'équilibre. Une difficulté provient du fait que le contrepois oscille quand on s'approche de l'équilibre. La solution qui consiste à laisser le contrepois amortir son mouvement, avant de décider d'un nouveau mouvement de la platine, est inacceptable car elle conduit à des durées de mesure prohibitives. Il faut donc observer, le plus rapidement possible, les mouvements du contrepois pour estimer autour de quelle position il oscille et corriger la position de la platine en conséquence. Rappelons que plus le contrepois est haut (positions positives), plus il faut détendre le fil et donc déplacer la platine vers une position inférieure à sa position courante ; inversement plus le contrepois est bas (positions négatives), plus il faut tendre le fil et, pour cela, déplacer la platine vers une position supérieure à sa position courante.

VIII.1.4— Mesures et tests

Des séries de mesures répétitives effectuées en laboratoire et portant sur plusieurs milliers de valeurs indiquent un écart-type de 3 m avec un fil de 0,5 m et de 10 m pour un fil de 32 m. Profitant d'une ouverture de l'accélérateur SPS, 28 portées de 32 m ont été mesurées six fois par une équipe formée de stagiaires géomètres n'ayant jamais utilisé cet instrument. Cet essai a mis en évidence la facilité d'utilisation de l'instrument, l'écart-type de ces mesures est de 30 m. La différence entre les mesures de laboratoire et les mesures de terrain est due à la manipulation du fil d'invar qui est la partie délicate du système.

VIII.2— Clinomètre électronique

On trouve actuellement dans le commerce de très bons instruments de ce type. Le développement ne porte donc pas sur le capteur mais sur son environnement afin de le rendre compatible avec les autres instruments. On installera dans un même boîtier deux clinomètres mesurant sur des axes perpendiculaires, le micro-ordinateur et les interfaces.

VIII.3— Interféromètre à réflecteur asservi

Actuellement, il n'y a aucun développement en cours sur cet instrument. Il est décrit en annexe.

Du fait du laser interférométrique, de son alimentation et de l'électronique de contrôle, la mise en œuvre de cet appareillage encombrant en fait encore aujourd'hui un outil de spécialiste. Il rend des services appréciables, en permettant des étalonnages "in situ" qui améliorent très sensiblement la précision des mesures à l'invar. Ainsi, dans l'exemple utilisé précédemment concernant le test invar dans le SPS, le fait de mesurer à l'interféromètre deux portées, la première et la quatorzième, en recalibrant l'invar à

chaque passage sur ces portées, a réduit l'écart-type des mesures de 30 m à 17 m.

Il sera utilisé de cette façon pour la métrologie du LEP.

VIII.4— Ecartomètre nylon

Cet instrument est en cours de modification. Le modèle ancien est décrit dans l'annexe 4.

Les principales modifications envisagées sont les suivantes :

— le système optoélectronique de détection du fil nylon pourra mesurer l'angle que fait le fil nylon avec la règle. Avec cet angle et la distance oblique, le micro-ordinateur calculera la flèche ;

— la règle se présentera sous la forme d'un profilé en U. Elle sera en matériaux composites (kevlar ou carbone) ;

— le micro-ordinateur, les interfaces et les systèmes électromécaniques seront contenus dans le profilé ;

— l'ensemble est conçu pour être fabriqué à des longueurs différentes (0,3 à 1.0 m) sans autre modification que la longueur du profilé.

VIII.5 — Ecartomètre laser

Le développement de cet instrument est étroitement lié au développement de l'écartomètre nylon. Seul le capteur électro-optique sera adapté au laser. Extérieurement, l'instrument sera identique. Le modèle ancien est décrit dans l'annexe 5.

VIII.6 — Nivellement automatique

Ce système est nouveau dans la gamme des instruments de métrologie du CERN. Son principe est de détecter sur une mire active un faisceau laser rendu horizontal par son passage dans une optique appropriée (Figure 10). Mis à part la position du détecteur de faisceau laser, la mire active sera une copie de l'écartomètre laser en position verticale. La lumière laser est produite par un laser GLO de Wild et amenée par fibre optique dans l'oculaire d'une lunette zénithale Wild ZL. L'axe optique de cette lunette est rendu vertical par un système automatique avec une précision de 1/200 000. Le faisceau laser est rendu horizontal par un pentaprisme. Ce prisme peut pivoter et par conséquent faire décrire un plan horizontal au faisceau. Il passe ensuite à travers une lame en coin qui permet un réglage angulaire du faisceau après

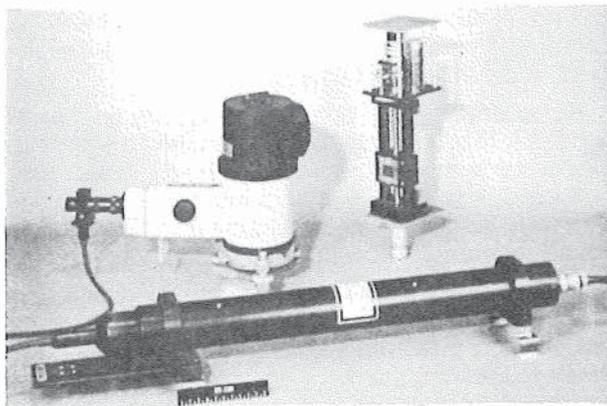


Figure 10 : Nivellement automatique

un contrôle de l'horizontalité. L'utilisation d'une lunette zénithale permet une double visée par rotation de 200 grades de la lunette en gardant le prisme supérieur dans la même direction. Un prototype sera utilisé en janvier pour un contrôle altimétrique dans l'accélérateur SPS.

VIII.7 — Gyroscope (GAK1 WILD)

Cet instrument (Figure 11) n'est pas à proprement parler un instrument de métrologie. Il sera utilisé en génie civil par les équipes de topographes pour le guidage du tunnel LEP. Son automatisation a été faite sur le même principe que les autres instruments et a porté sur les points suivants :

- mise en route et arrêt du moteur,
- lacher et blocage de la toupie,
- prise de données,
- calcul du Nord.

Un rapport détaillé de l'automatisation de cet instrument est en préparation.

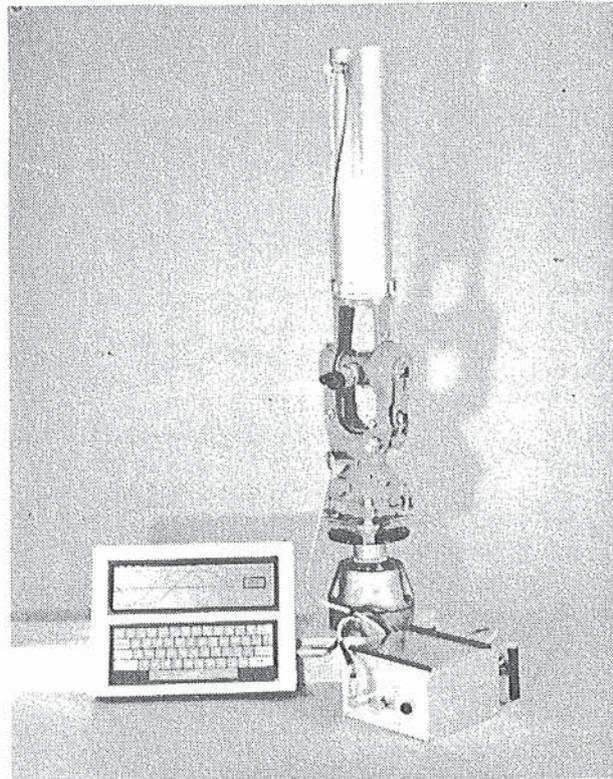


Figure 11 : Gyroscope, terminal portable, alimentation

IX — L'ordinateur de terrain

IX.1 — Le choix

Pour être utilisé efficacement, les instruments automatisés devront être connectés à un système informatique parfaitement adapté aux travaux de métrologie.

Après étude des besoins, les principales caractéristiques d'un tel système sont :

- être facilement transportable,
- pouvoir fonctionner sur batterie et sur secteur,

- avoir une capacité de mémoire suffisante pour contenir les programmes d'acquisition de données et de mesures, les fichiers de guidage pour les opérations de métrologie, les fichiers de coordonnées et les fichiers de mesures,

- posséder un support mémoire non volatile déconnectable du système pour le transport de l'information,

- offrir la possibilité de connecter en même temps plusieurs instruments de mesure,

- posséder une imprimante,

- être compatible avec le réseau d'ordinateurs CERN pour permettre le transfert des informations contenues dans les mémoires de l'ordinateur de terrain vers les mémoires de masse du système d'ordinateurs central et inversement,

- être programmable par l'utilisateur,

- être commandé par un terminal autonome et portable.

Aucun ordinateur actuellement proposé sur le marché ne peut répondre à ces besoins. Il a donc été décidé de construire notre propre système (Figure 12).

IX.2 — Description

Cet ordinateur a été construit autour d'un microprocesseur MOTOROLA 68000 travaillant à 8 MHz à partir de mots de 16 bits et pouvant gérer plus de 16 Mégabytes de mémoire à l'aide de son bus d'adresses de 24 bits (Figure 13).

Le système est entièrement contenu dans une valise de $0,52 \times 0,42 \times 0,17$ m. Son poids total est de 12 kg. L'alimentation se fait, soit par l'intermédiaire de deux batteries au plomb de 6 V/9 AH montées en série, et contenues dans la machine, soit par une batterie extérieure, soit par le secteur. Quand l'ordinateur de terrain est connecté au secteur, les batteries sont automatiquement remises en charge. La charge des batteries peut être contrôlée par programmation.



Figure 12 : Ordinateur de terrain, terminal portable

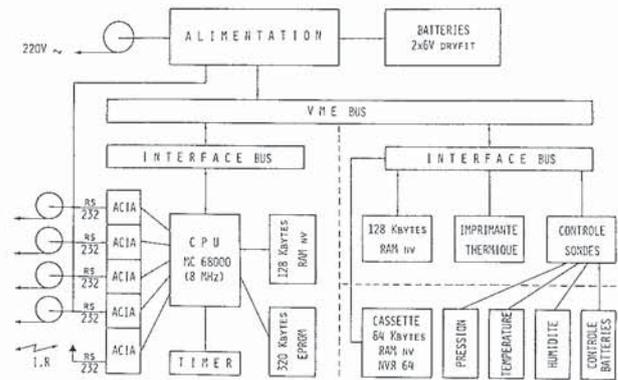


Figure 13 : Structure de l'ordinateur de terrain

320 kbytes (320 000 octets) de mémoire morte sont réservés pour le système d'exploitation, le moniteur, le langage et des programmes d'utilisation générale. Cette partie ne peut pas être modifiée par l'utilisateur. La mémoire accessible peut contenir 256 kbytes. Elle est sous la forme de mémoire vive non volatile. Une pile au lithium en assure la sauvegarde. Ses capacités pourront être étendues en fonction des besoins et de la venue sur le marché de composants plus performants.

Le support mémoire mobile est réalisé par l'intégration d'une cartouche mémoire vive non volatile de 64 kbytes.

Cinq liaisons RS 232 permettent la communication avec les instruments. Ces liaisons sont paramétrables par programmation (vitesse de transfert, parité, nombre de bits, etc...). Une de ces liaisons est utilisée pour la communication par infrarouge avec le terminal. Les câbles de liaison avec les instruments, d'une longueur de 5 m, sont insérés dans l'ordinateur de terrain et maintenus sur des enrouleurs automatiques. L'alimentation électrique des instruments se fait également par ces câbles.

L'imprimante thermique utilise du papier de 0,129 m pour 40 caractères par ligne. La vitesse d'écriture est de 80 caractères à la seconde.

La compatibilité avec le réseau d'ordinateur est assurée par l'utilisation d'une liaison RS 232.

Deux types de langage seront utilisés, un langage compilé et un langage interprété. Les programmes écrits en langage compilé s'exécutent rapidement et occupent peu de place en mémoire. Ils ne sont pas accessibles directement par l'utilisateur qui voudrait les modifier sur le terrain. Un langage interprété est plus lent et occupe beaucoup plus de place en mémoire. Les programmes écrits de cette façon sont directement accessibles par l'utilisateur.

Actuellement, des programmes écrits en Pascal compilés fonctionnent dans l'ordinateur de terrain. Des essais sont faits avec deux langages interprétés, le BASIC et le PILS (Portable Interactive Language System). Ce dernier est développé au CERN dans le département qui s'occupe des ordinateurs centraux.

Trois sondes, pour la température, la pression et l'hygrométrie, sont incorporées dans l'ordinateur de terrain. Elles sont directement accessibles par programmation.

Le terminal du système mettant l'ordinateur de terrain sous contrôle de l'opérateur (Figures 11 et 12) est

construit autour du même micro-ordinateur que les instruments de mesure. Il peut être classé dans la catégorie des terminaux intelligents portables. Il est alimenté électriquement par des batteries internes. Il communique avec l'ordinateur de terrain par infrarouge ou par un des quatre câbles RS 232 ; ses batteries sont alors automatiquement mises en charge. Il possède 24 kbytes de mémoire morte pour le langage, le moniteur et des fonctions spécifiques facilitant son utilisation. L'utilisateur dispose de 16 kbytes de mémoire vive ; 16 autres kbytes de mémoire vive sont réservés à la gestion de l'écran graphique. Le clavier standard QWERTY est du type "plat à grenouilles". L'écran est alphanumérique, graphique et tactile. Il possède 8 × 52 caractères ou 63 × 312 points, ou 7 × 20 zones tactiles. Ces trois possibilités peuvent être utilisées simultanément. Il est équipé d'un lecteur de codes à barres capable de déchiffrer n'importe quel code.

X — Exemple d'utilisation

Le matériel décrit dans les chapitres précédents sera utilisé dans les différentes phases de l'installation du LEP. Il sera également mis en œuvre dans les autres machines et dans les halls d'expériences où ce type de matériel est régulièrement utilisé pour des mesures de micro-géodésie ou de métrologie.

C'est dans la phase de mise en place des éléments que l'utilisation des systèmes automatiques sera la plus spectaculaire. En effet, dans cette phase, le distivar, l'écartomètre nylon, le clinomètre et le nivellement automatique sont utilisés en même temps.

La figure 14 montre un scénario possible pour l'installation d'un élément par rapport aux deux qui l'encadrent. Il faut se rappeler qu'au moment de cette mise en place, toutes les références des éléments ont été mesurées et leurs coordonnées réelles calculées.

L'opérateur arrive devant l'unité à installer. Il branche l'ordinateur de terrain. Au moyen du lecteur de code à barres, il fait alors l'acquisition du nom de l'élément. Celui-ci est transmis par le terminal à l'ordinateur de terrain qui charge en mémoire les coordonnées des références qui seront utilisées. Il donne à l'opérateur les informations pour la mise en place du matériel de mesure :

- une mire de nivellement et son système de communication radio en R 12,
- le fil nylon tendu entre R 11 et R 32,
- un écartomètre en R 21 et en R 22,
- le distivar en R 22, le point fixe en R 31,
- les clinomètres (C 1, C 2) sur les références mécaniques de l'élément,
- une mire de nivellement en R 21,
- le laser et son optique entre R 12 et R 21.

Le matériel en place est connecté à l'ordinateur. Celui-ci fait démarrer une première série de mesures. Les résultats sont comparés avec les valeurs calculées par l'ordinateur de terrain. Cette opération a pour but de confirmer le fait que les références utilisées n'ont pas bougé depuis la dernière mesure. Les différents mouvements qu'il faut faire sur les vérins (V 1, V 2, V 3) pour amener l'élément à sa position théorique sont calculés. Ces déplacements étant effectués, une nouvelle série de mesures est faite, les coordonnées des références sont calculées et comparées aux coordonnées théoriques. Si nécessaire, le cycle calcul - déplacement - mesure - calcul recommence. Les mesures qui suivent le dernier déplacement sont enregistrées dans l'ordinateur de terrain. On peut passer à l'élément suivant. Pendant toute l'opération, il n'a pas été nécessaire de déplacer le matériel de mesure.

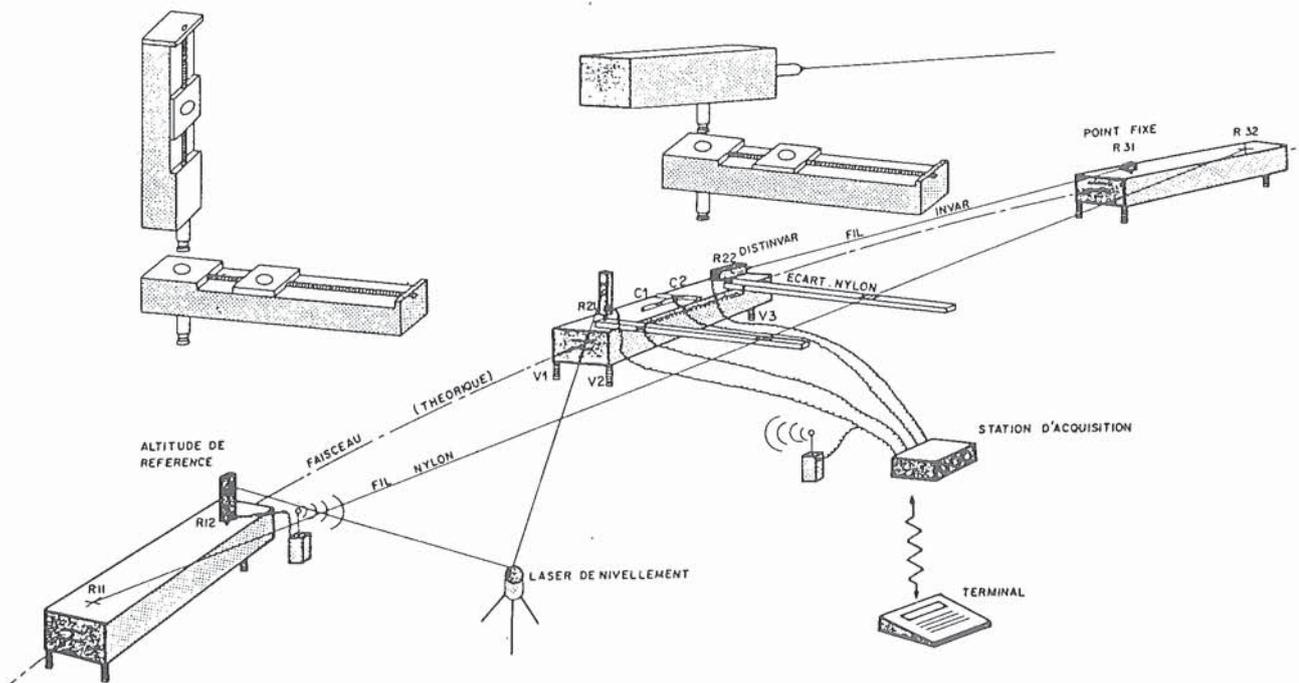


Figure 14 : Scénario de mise en place d'un aimant

XI — Conclusion

Le CERN n'a pas la vocation de construire du matériel en série. Pour cette raison, après avoir développé, fabriqué et testé au moins deux prototypes, un dossier de fabrication est constitué. Ce dossier est utilisé pour lancer un appel d'offres dans l'industrie européenne en vue de la fabrication en série. Après avoir honoré la commande CERN, la société choisie garde le dossier et le droit de fabriquer sous sa responsabilité, pour d'autres personnes, l'instrument en question. C'est le cas du distinvar qui est actuellement fabriqué par la société ENRAF-NONIUS à Delft (NL).

Ce nouveau matériel sera utilisé par de nombreuses équipes de techniciens. Ce personnel devra s'adapter à de nouvelles méthodes de travail. Le choix qui a été fait d'utiliser du matériel dont les principes sont connus va faciliter cette adaptation. Seul l'emploi intensif de l'informatique et des micro-ordinateurs sera une nouveauté. C'est dans ce but que, depuis 1982, le Groupe de Géodésie Appliquée a développé une politique de formation en informatique en inci-

tant tout son personnel à utiliser au maximum les possibilités offertes par le réseau d'ordinateurs du CERN et en dotant les équipes de micro-ordinateurs portables programmables en BASIC.

Bibliographie

BAIN G., BORE C., COOSEMANS W., DUPONT J., FABRE J.-P., GAVAGGIO R., PERON F., "Automatisation par Micro-ordinateur d'un Instrument géodésique de Mesure de Distance, le Distinvar", CERN 84-07, Division Installations Physique Expérimentale, CERN, Genève, 1984.

GERVAISE J., "Résultats de Mesures Géodésiques avec le Terramètre, Appareil électronique de Mesure de Distance à deux longueurs d'Ondes", Mensuration, Photogrammétrie, Génie Rural N° 6/84, Zurich, 1984.

GERVAISE J., "Applied Geodesy for CERN Accelerator - High Precision Geodetic Measurements" presented at the Facolta di Ingeneria di Bologna, October 1984.

Appel	Description	Réponse de la fonction
A = USR (0)	Initialisation générale du distinvar. Cette fonction qui doit impérativement être appliquée au début de tout programme, a pour effet visible d'amener la platine mobile en position "fil détendu".	A = 1 : commande exécutée normalement. $\emptyset \rightarrow$ A = 1 : Erreur. En particulier si A = - 1200 la lecture de la constante de calibration a été mal faite.
A = USR (3)	Lecture de l'état des interrupteurs de fin de course.	A = 0 : aucun interrupteur n'est actionné A = 1 : interrupteur inférieur actionné. A = 2 : interrupteur supérieur actionné. Sinon : erreur.
A = USR (4) CPD	Contrôle de la mémoire EEPROM (capacité de 16 données numériques). C'est un code qui décrit la fonction à exécuter. P est la position de la donnée concernée (à ne spécifier que si C = 4, 8 ou 12). D est la valeur de la donnée concernée (à ne spécifier que si C = 4).	C = 0 : interdiction de modifier les données. C = 2 : effacement des 16 données. C = 3 : autorisation de modifier les données. C = 4 : écriture de la donnée D en position P. C = 8 : lecture de la donnée qui est en position P. C = 12 : effacement de la donnée qui est en position P $0 \leq P \leq 15$. - 32768 \leq D \leq + 32767.
A = USR (5)	Arrêt de la platine avec retour immédiat au Basic.	A = 1 : commande exécutée correctement. Sinon : erreur.
A = USR (6)	Arrêt de la platine avec retour au BASIC seulement lorsque l'arrêt est effectif.	A = 1 : commande exécutée correctement. Sinon : erreur.
A = USR (7)	Lecture de la position de la balance.	A = - 128 : contrepoids en position basse extrême. - 127 $<$ A $<$ 0 : fil insuffisamment tendu. A = 0 : contrepoids à l'équilibre. 0 $<$ A $<$ 126 : fil trop tendu. A = 127 : contrepoids en butée supérieure. Sinon : erreur.

A = USR (8)	Lecture de la position de la platine. Unité 2 m. La position minimale est d'environ 3 000 et peut varier d'un distinvar à l'autre.	$3\ 000 < A < 32767$: position de la platine. Sinon : erreur.
A = USR (9).T	Déplacement de la platine en la position de coordonnée T. Unité 2 μ m.	A = 1 : commande exécutée correctement. Sinon : erreur. En particulier $A = -2\ 000 : T < 0$.

Exemple du programme

```

10 REM DISTINVAR
11 I = USR (0) : REM INITIALISATION
12 PRINT "PRESSER LA TOUCHE RETURN..."
13 PRINT "... POUR COMMENCER LA MESURE"
15 INPUT DUM
25 IF I <> I THEN 455
30 B = USR (7)
35 IF B < -128 THEN 470
40 W = B + 10
50 IF B > -10 THEN 440
60 G = USR (9), 32700 : REM DÉPLACEMENT PLATINE
70 P = USR (8)
80 IF P > 27000 THEN 440
90 B = USR (7)
100 IF B < W THEN 70
110 S = USR (6)
120 WAIT 1 : REM MESURE TENSION FIL
130 P = USR (8)
150 FOR I = P - 60 TO 1000 STEP - 5
160 G = USR (9).I
170 P = USR (8)
180 IF P > I THEN 170
190 B = USR (7)
200 IF B < 0 THEN 220
210 NEXT I
220 FOR K = 1 TO 2 : REM DEUX MESURES SUCCESSIVES
230 WAIT 1
240 S = 120:L = h 120 : REM AMPLITUDE OSCILLATION CONTREPOIDS
250 FOR I = 1 TO 290
260 B = USR (7)
270 IF B > L THEN L = B
280 IF B < S THEN S = B
290 NEXT I
300 E = L - S : REM NOUVEL OBJECTIF PLATINE
302 M = (L + S)/2
304 IF M < -80 THEN 60
310 IF E > 240 THEN 230
340 P = USR (8)
350 X = P-M/3
360 G = USR (9).X : REM DÉPLACEMENT PLATINE
370 GOTO 230
380 Q (K) = USR (8) *2
390 NEXT K
400 IF ABS (Q(1)-Q(2)) > 5 THEN 220
410 M = (Q(1) + Q(2))/2
415 M = 65534-M-8270 : REM NORMALISATION DU RÉSULTAT
420 PRINT M
430 GOTO 11 : REM PROCHAINE MESURE
440 PRINT "ERREUR DE FIL" : REM GESTION DES ERREURS
447 I = USR (0)
448 IF I = I THEN 455
450 STOP
455 PRINT "INIT ERROR"
460 STOP
470 PRINT "USR (7) ERROR"
10 000 END

```

S1 Interféromètre à réflecteur asservi

But recherché

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

L'interféromètre à laser

L'interféromètre à laser est construit par Hewlett Packard et comprend un laser Helium-Néon stabilisé ($\lambda = 632,8$ nm, puissance de sortie : 120 mW), un prisme interférométrique avec un réflecteur fixe, un réflecteur mobile, un récepteur et un système d'affichage.

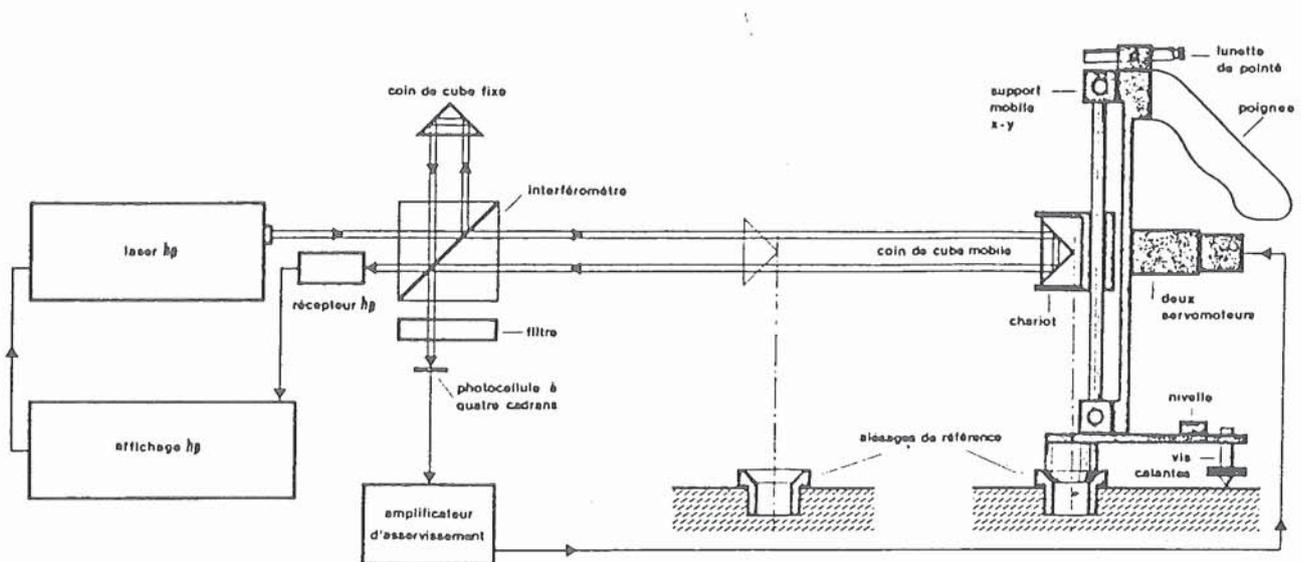
Le faisceau du laser est séparé en deux par le prisme de l'interféromètre ; la première partie est renvoyée sur le prisme par le réflecteur fixe, la seconde partie

Support et chariot mobile en XY

Le réflecteur est monté sur un chariot qui peut être déplacé verticalement et horizontalement par deux moteurs asservis. 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 phot cellule quatre quadrants. On obtient ainsi une boucle d'asservissement qui, en bougeant le réflecteur mobile, maintient le faisceau laser retour centré sur la phot cellule.

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

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



par le réflecteur mobile. Les deux parties du faisceau se recombinent 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. 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. Par conséquent, 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.

Mode opératoire

Le système laser avec son prisme interférométrique et le récepteur sont réglés afin que le faisceau laser soit aligné à environ 2 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 au télescope. Le support est verticalisé à l'aide du niveau à bulle.

Une fois l'amplificateur asservi 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 peut alors être lue sur le système d'affichage.

S6 Système d'alignement au fil de nylon

But recherché

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.

Principe de base

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.

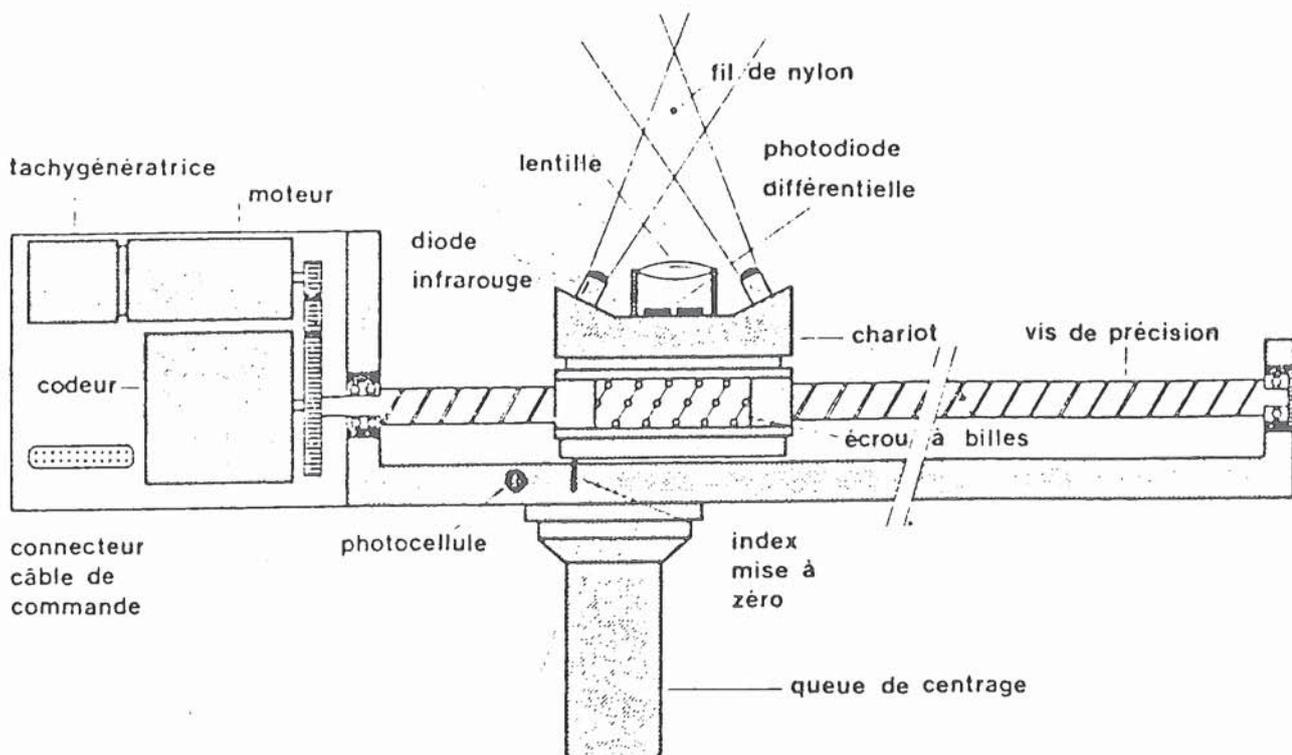
Description et caractéristiques

Le système comprend trois parties : le fil, la règle et le détecteur, la boîte de commande. 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 un 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 iodes 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.

Électronique

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 980 Hz et le modulateur de diode infrarouge. Afin d'éliminer des signaux parasites comme le 50 Hz, 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 de 4 mm, l'impulsion a lieu tous les 4 mm de déplacement du chariot. De plus, il y a une photodiode 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.

Mode opératoire

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'instru-

ment 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.

Performance

La course totale 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 (S5) doit remplacer celui à fil de nylon.

Référence

— J. Gervaise, "Geodesy and Metrology at CERN, a Source of Economy for the SPS Programme", CERN 76-19, 17 November 1976.

S5 Appareil d'alignement laser à récepteur asservi

Mesure des écarts

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.

L'émetteur

L'émetteur comprend un laser He-Ne 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 µm 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 récepteur

Le chariot du récepteur photo-électrique, mû par une vis hélicoïdale de précision, est asservi à rester centré sur le faisceau laser. Sa position le long de la vis est mesurée par un codeur qui fournit 100 impulsions par mm 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 photodiodes 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 1000 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.

La perpendicularité du vecteur mesuré est assurée par deux petites photodiodes 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 photodiodes 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 photodiodes dépasse un certain seuil.

Performances

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

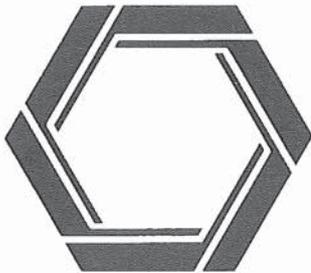
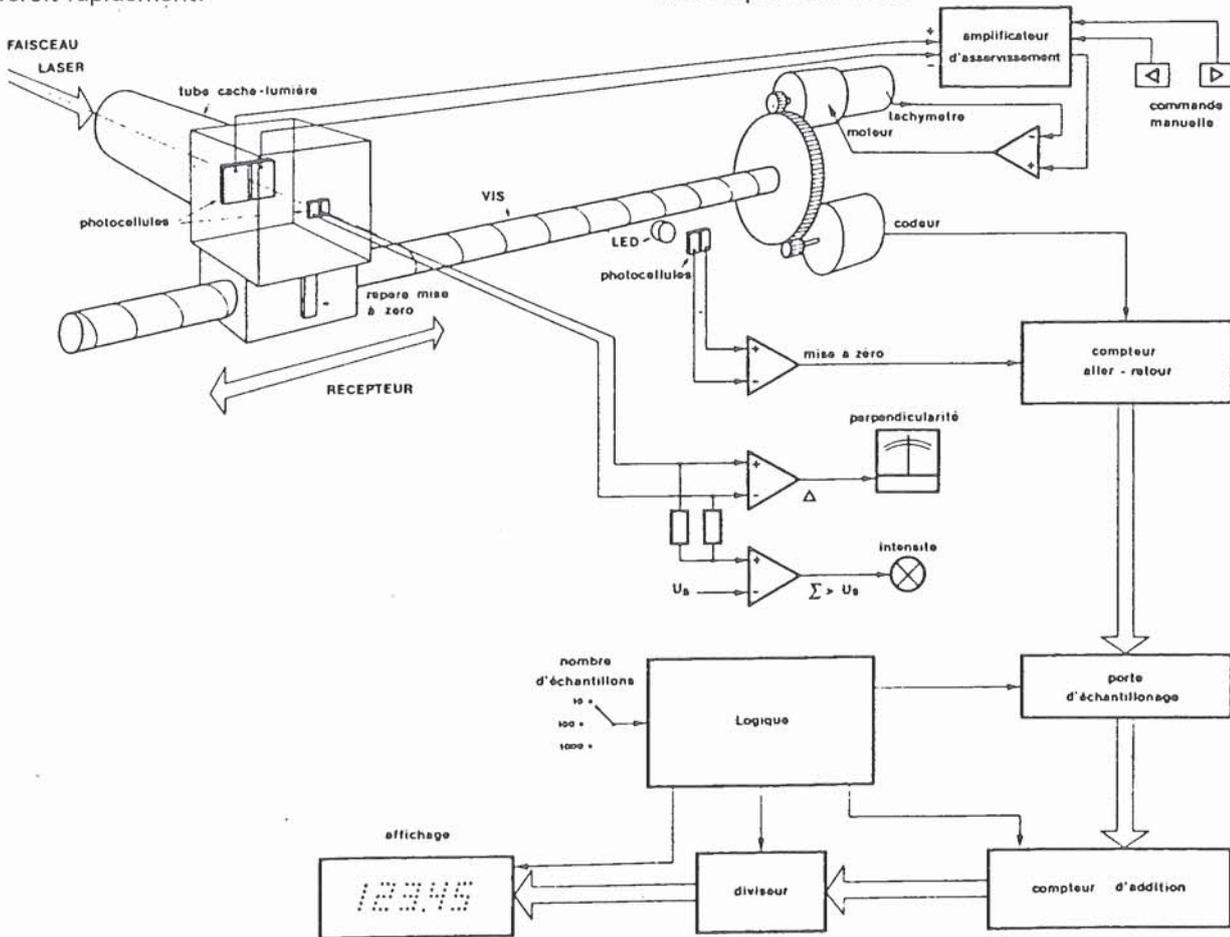
des photocellules réceptrices. Le décalage du zéro du codeur se détermine par simple retournement.

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.

Références

— J. Gervaise, "Geodesy and metrology at CERN : a source of economy for the SPS programme", CERN 76-19, 17 novembre 1976.

— J. Gervaise, "Evolution de la métrologie laser au CERN de 1971 à 1976", revue géomètre n° 8-9, août-septembre 1977.



AERIAL

*PRISES DE VUES AERIENNES
pour la photogrammétrie,
la photo-interprétation,
les études,
l'information...*

PHOTOTHEQUE

Z.I. D'AIX-EN-PROVENCE
13763 LES MILLES CEDEX
Tél. (42) 60.05.45
Télex Aéromap 401 140 F

*REPROGRAPHIE DE PRECISION
pour la cartographie,
le dessin,
les arts graphiques...*