

Métrologie tridimensionnelle d'un détecteur de particules

par J.-P. QUESNEL

Ingénieur dans le Groupe de Géodésie et Métrologie du CERN

I. INTRODUCTION

En 1983, deux équipes de chercheurs physiciens ont réussi au CERN, en étudiant des collisions de protons et d'antiprotons, à mettre en évidence les bosons intermédiaires W et Z_0 . Cette découverte, qui vient ainsi vérifier les prédictions de la théorie, permet de réunifier les forces faibles et électromagnétiques.

Ces résultats fondamentaux sont le fruit de plusieurs années de travaux préparatoires ; il a pour ce faire, fallu savoir créer des antiprotons, les rassembler pour les faire circuler dans une chambre à vide circulaire, et rendre possible des collisions à certains endroits précis de l'orbite. C'est ce qui a été réalisé dans le projet P.P au CERN, qui utilise l'anneau du Super Proton Synchrotron comme anneau collisionneur, et sur lequel deux zones ont été aménagées pour étudier les phénomènes engendrés dans de telles collisions. La collision de particules crée des particules secondaires, qui peuvent être détectées par mesure d'énergie, par analyse des traces dans des chambres à dérive. Pour cela, les physiciens ont conçu un détecteur, capable d'entourer en tous sens le point de collision théorique, et d'observer les événements physiques par tous les moyens autorisés par la technologie actuelle.

L'un des points de collision sur l'anneau est situé près du puits n° 4 du SPS. Il est construit par le CERN et par deux collaborations regroupant des universités italiennes et françaises.

Nous étudierons comment est constitué ce détecteur, pourquoi les physiciens se sont assurés le concours du service de métrologie et par quels moyens et avec quelles méthodes ce service a mené à bien le montage et le positionnement du détecteur sur l'orbite des particules.

II. LE DÉTECTEUR UA2/UA4

Les détecteurs de particules sont basés sur le principe électromagnétique. Les plus employés actuellement sont :

- les détecteurs à fils multiples
- les compteurs Cerenkov
- les calorimètres
- les chambres à dérives.

Les chambres à dérives sont très employées dans cette expérience. Leur principe en est le suivant : le

passage d'une particule chargée dans un gaz libre des électrons. Ceux-ci migrent dans un champ électrique et sont alors détectés par un fil compteur. En multipliant le nombre de plans de fils, et si on connaît la position de ces fils, on peut alors reconstituer la trace des particules dans l'espace, et déterminer alors leurs caractéristiques physiques : quantité de mouvement, charge électrique, masse, énergie cinétique. Le géomètre doit donc fournir les positions spatiales de ces chambres à dérives.

Le détecteur est constitué de quatre parties principales. Chaque partie est elle-même l'assemblage de plusieurs systèmes de détection (fig. 1).

La partie centrale du détecteur est un calorimètre, au centre duquel est inséré un ensemble de chambres à fils de forme cylindrique. Elle est fermée par deux aimants à champ toroïdal. Elle est fixe sur le support général de l'expérience.

De part et d'autre de la partie centrale, sont montés sur un cadre mobile sur rails trois séries de détecteurs. Une première série est constituée par un ensemble de douze paquets de chambres préassemblées trois par trois, et distribuées telles un parapluie autour de l'axe longitudinal de l'expérience. Quatre boîtes contenant chacune six chambres à fils, arrangées pour former un cube, constituent la seconde partie, qui est située dans un tube de 1 m de diamètre, axé sur l'expérience. La partie arrière du cadre est recouverte par douze autres chambres à fils qui sont montées sur deux supports mobiles.

Enfin, latéralement à l'expérience, un ensemble de chambres à fils et de détecteurs de verre au plomb est monté sur un support spécial.

Les trois premières parties du détecteur sont montées sur une même plate-forme. Tous les détecteurs ont été descendus à 60 m sous terre, profondeur à laquelle circule le faisceau SPS en cet endroit, pour être assemblés sur cette plate-forme dans une caverne de montage. Ce travail de montage a duré une année. Il est périodiquement repris pour changer des éléments défectueux. Une fois le tout construit, la plate-forme est transportée sur coussins d'air sur une distance de 20 m environ dans une deuxième caverne pour être installée sur l'orbite des faisceaux de protons et d'antiprotons, là où ont lieu les collisions. L'ensemble qui pèse 300 T doit alors être aligné. Le géomètre doit ensuite fournir la position spatiale réelle de toutes les chambres à fils du détecteur (144) par rapport au faisceau, avec une précision relative globale de ± 0.5 mm. Ce travail est programmé sur une période de 8 jours.

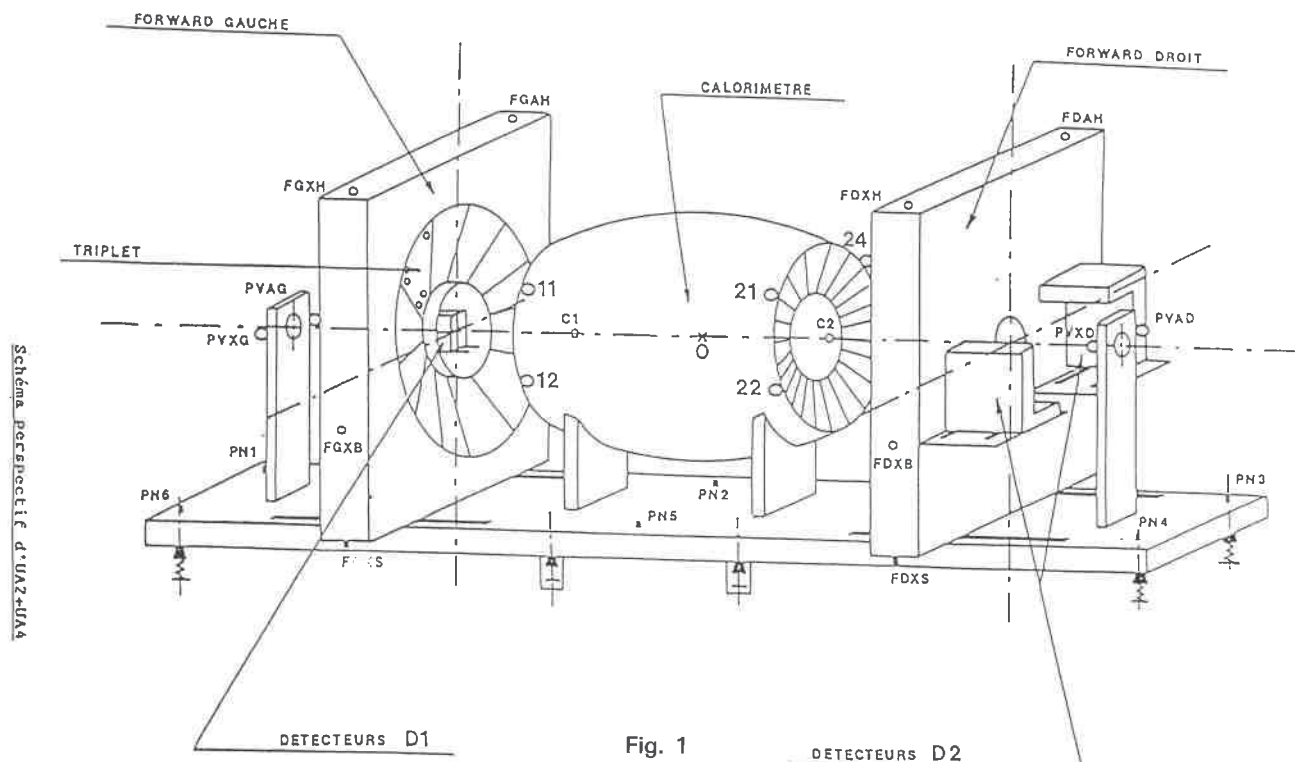


Fig. 1

L'assemblage des différentes pièces est donc un travail de réglage et de mesures dans l'espace : toutes les pièces doivent s'emboîter les unes dans les autres, telles des tables gigognes, et ceci dans un ordre précis puisque l'accessibilité aux détecteurs les plus centraux n'est que temporaire.

Le géomètre se trouve donc confronté à plusieurs problèmes. Il doit d'abord assurer le montage des différents éléments, mesurer leurs positions relatives dans l'espace, et établir des relations géométriques entre ces éléments et des repères fixés aux sous-ensembles définis précédemment. C'est le problème du montage. Il doit ensuite, quand l'ensemble est amené en position de fonctionnement, régler la plate-forme à sa place théorique, puis mesurer les points caractéristiques de chaque sous-ensemble afin de déduire la position spatiale de chaque détecteur et cela dans un délai de temps très court. Enfin, la précision finale souhaitée par les physiciens sur les résultats est de $\pm 0,5$ mm en homogénéité globale.

III. INSTRUMENTS

Pour atteindre ces objectifs, le groupe de métrologie a utilisé des instruments devenus traditionnels au CERN, parce que largement employés pour la mise en place des accélérateurs. En règle générale, tous les instruments utilisés permettent d'obtenir des précisions sur les mesures inférieures à 0,1 mm :

- les distances ont été mesurées avec le Distinvar,
- les alignements ont été mesurés avec l'écartomètre à fil nylon,
- le théodolite, associé à un calculateur programmable, a permis de mesurer les angles.
- l'altimétrie a été déterminée soit directement avec le niveau Wild NA2, soit indirectement avec le théodolite.

Saisie automatique des données

Pratiquement toutes les mesures topométriques effectuées sur cette expérience, ont été directement enregistrées sur ordinateur, soit manuellement, soit automatiquement dans le cas des mesures d'angles. L'acquisition est faite sur les calculateurs HP41 et EPSON H X 20. Des programmes de traitement des observations pour vérification immédiate et de stockage, ont été développés. Cette vérification est fondamentale, et n'est possible qu'avec un carnet de terrain "intelligent".

Ainsi, un programme permet de réduire immédiatement avant stockage, les tours d'horizon, et de vérifier les collimations. De même, pour le nivellement direct, un autre programme calcule les doubles dénivelées entre les points mesurés, et les contrôles.

Ces calculateurs sont ensuite directement connectables sur les gros ordinateurs du CERN, pour y transférer les données afin d'y assurer leur traitement.

Moyens de calcul

Nous pouvons considérer que les programmes de calcul sont aussi des moyens à la disposition des géomètres. Le groupe de métrologie a développé des programmes de compensation planimétrique de réseaux de points, de compensation altimétrique, et aussi de compensation spatiale. Ces programmes permettent de traiter un très grand nombre de mesures, les compensent par la méthode des moindres carrés, et analysent les résultats, ce qui permet de chiffrer les précisions obtenues. Le géomètre n'est donc pas limité, dans le choix des méthodes à utiliser, par les moyens de calcul. Un programme d'adaptation par moindres carrés dans les trois dimensions a aussi été développé.

Tout ce bagage a été très largement utilisé pour la métrologie de cette expérience.

IV. MÉTHODES UTILISÉES

Nous ne nous attacherons pas à étudier les méthodes mécaniques qui ont pu être utilisées pour assembler des petites pièces entre elles. Ces méthodes d'atelier ont été très vite limitées à la mesure de références externes au boîtier des chambres à fils vu les dimensions du détecteur à construire. Nous tenterons de dégager ici une technique de l'utilisation des méthodes topométriques dans le cas de la métrologie de ce détecteur.

IV.1 CANEVAS

IV.1.a Choix du réseau

Toute opération de géométrie commence par l'établissement d'un réseau géodésique stable, constitué d'un ensemble de repères répartis judicieusement autour de l'expérience.

a) Ce réseau de haute précision encadre l'objet à mesurer de telle manière que les points critiques de cet objet soient directement accessibles.

b) Ces repères doivent être contrôlables en permanence et être connus avec une précision suffisante puisque c'est d'eux que dépendra la précision finale de la géométrie de l'expérience.

c) Ce réseau doit avoir une précision homogène en tout point, et les zones moins stables doivent être évitées.

d) Il doit être très dense, pour tenir compte de l'évolution possible de la construction, et pour ainsi éviter la création de nouveaux points qui seraient à redéterminer par la suite.

IV.1.b Réseau de montage

Ces quatre critères ont permis dans le cas présent, d'établir un réseau de 31 points, répartis sur trois niveaux, à partir duquel a été construite l'expérience.

Trois rangées de repères sont fixées sur la paroi de chaque côté de la caverne qui se présente comme un cylindre horizontal, à trois niveaux différents. Deux repères sont situés sur l'axe longitudinal de l'expérience. Les points sont espacés de 2,50 m. De plus, huit repères sont fixés sur la partie centrale du détecteur lui-même. Ces repères permettent d'atteindre optiquement les chambres disposées en parapluie sur les chariots mobiles.

Les mesures sont faites au distivar et au système d'alignement nylon. La liaison entre les trois étages est assurée par les mesures de distances en pente, des quadrilatères inclinés. Aucune mesure au théodolite n'est faite à ce stade. Sur de telles distances (entre 15 et 22 m) la précision des mesures d'angles n'est plus homogène avec les autres types de mesures. Les repères sont connus dans un système de coordonnées quelconque.

IV.1.c Réseau de positionnement

Pour le réglage et la mesure du détecteur en position de fonctionnement sur le faisceau, nous avons créé un autre réseau, indépendant du précédent puisqu'il n'est pas situé dans la même partie de la

X	Y	Z
-40	-40	-40
2 ^{ème} MESURE		
192 résidus		
30	-30	-30
-20	-20	-20
-10	-10	-10
0	0	0
10	10	10
20	20	20
30	30	30
40	40	40
± 0.19	± 0.05	± 0.06

caverne. Trois étages de repères ont été installés, qui permettent d'accéder aux différents points fondamentaux du détecteur. Un des étages est en liaison directe avec le réseau métrologique qui sert à surveiller la position de l'anneau collisionneur SPS. Les points sont connus en coordonnées dans un système lié à la position théorique du faisceau de particules.

Les mesures planimétriques ont été effectuées au distivar et au dispositif nylon avec des mesures angulaires d'appui pour lier les étages entre eux. On a aussi pour ce même besoin ajouté des descentes de verticales réalisées avec les oculaires coudés.

Les mesures de nivellement sont toujours faites en nivellement direct.

IV.1.d Calculs. Précision obtenue

Le traitement des mesures altimétriques et planimétriques est réalisé séparément, malgré l'existence d'un programme de compensation spatiale et ceci afin de faciliter l'analyse des résultats. Une étude stochastique des résidus permet d'évaluer la validité des mesures, et de chiffrer la précision des résultats obtenus. Ainsi, une mesure du réseau de positionnement a donné, pour 63 inconnues et 114 observations, une $EMQ_{DH} = \pm 0.05$ mm, avec des ellipses d'erreur

... colloque du Creusot

l'orbite du faisceau. Quatre repères servent pour le réglage altimétrique ; ils sont situés quasiment à la verticale des quatre vérins supports, afin que les mouvements mesurés ne soient pas influencés par d'éventuels bras de levier. La planimétrie est assurée par la mesure de deux repères situés sur le calorimètre central, à la chaîne étalonnée à partir de canevas de positionnement. Quand la plate-forme est réglée, et que les différents chariots mobiles sont amenés en position de fonctionnement, le géomètre mesure alors les quatre références extérieures de chaque sous-ensemble. Cette opération est très rapide si les positions relatives des repères à mesurer et du réseau de positionnement sont bien choisies. Elle est effectuée par des mesures de distances à l'invar, et d'angles horizontaux et verticaux.

Les coordonnées des points sont calculées, puis, par adaptation spatiale, les coordonnées des fils de toutes les chambres sont déduites en utilisant les relations établies pendant la construction.

Ainsi, la mesure de 32 points en XYZ suffit à déterminer la position dans l'espace de quelques 200 chambres à fils ou détecteurs, soit les coordonnées de 800 points.

IV.3.b Précision finale

Il est permis de se demander quelle est la précision finale obtenue après une telle succession de mesures, sur les coordonnées fournies aux physiciens. Une analyse des résidus des adaptations successives réalisée pour un sous-ensemble ayant nécessité quatre étapes pour établir la relation R, a montré une précision finale $\sigma = \pm 0.35$ mm. Si on ajoute l'incertitude sur la détermination de positionnement, on voit que la valeur de ± 0.5 mm demandée au départ par les physiciens a été atteinte.

TABEAU RECAPITULATIF

	mes 2	mes 3	mes 4	resultat
X	0.19	0.16	0.16	0.29
Y	0.05	0.17	0.10	0.20
Z	0.06	0.10	0.10	0.15
				0.39

valeurs en mm

V. CONCLUSION

La construction d'un tel détecteur de particules met en évidence une fois de plus l'utilité des méthodes topométriques appliquées à l'industrie.

Le géomètre est intervenu très tôt dans le projet de construction du détecteur. Cela lui a permis de concevoir avec précision le système de métrologie à adopter, et d'adapter les outils dont il disposait pour ce travail particulier.

Seul, l'usage intensif de programmes de compensations, pour traiter des mesures systématiquement surabondantes a permis de chiffrer les précisions obtenues.

Il faut, dans le domaine de la physique, être très souple. Les programmes de montage changent très souvent, il faut donc pouvoir facilement s'adapter. De plus, les travaux de géomètres nécessitent bien souvent des conditions d'environnement qui ne sont pas satisfaites, et l'on est bien loin des mesures de laboratoire — bruit, poussières, ambiance —. Ces facteurs doivent être pris en compte, car ils sont loin d'être négligeables pour la précision finale.

Enfin, notons que l'usage de capteurs de position électroniques tend à se généraliser. De tels instruments devraient simplifier la tâche du géomètre, pour contrôler les éventuels mouvements des équipements mobiles. Malheureusement, à l'heure actuelle, un certain doute accompagne toujours les résultats de ce matériel. Pourtant, face à la complexité des nouvelles expériences qui sont à l'étude pour le projet LEP, une fiabilité totale de tels capteurs de position sera vivement souhaitable.

BIBLIOGRAPHIE

1. J.-P. Lagnaux, "Classification et interaction des particules". Enseignement technique 1979.
2. J. Gervaise, "Géodésie de Positionnement des accélérateurs circulaires de particules", cours à l'École Supérieure des Géomètres et Topographes, Paris 1972.
3. P. Bonament, "Métrologie d'une expérience à collision Protons-Antiprotons au CERN", mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'ENSAIS. Janvier 1984.
4. "Appareil automatique de mesure précise de distance. Distinvar". Note technique S2 CERN 1979.
5. "Système d'alignement au fil de nylon". Note technique S6 CERN 1979.
6. C. Lasseur, J.-P. Quesnel, Métrologie des expériences P-P", rapport Interne.