



EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH
ORGANISATION EUROPÉENNE POUR LA RECHERCHE NUCLÉAIRE

CERN - TS Department

EDMS Nr: 473712
Group reference: TS-SU

TS-Note-2004-004
4 May 2004

METROLOGIE DES EXPERIENCES : DEFIS ET RESULTATS

C. Lasseur

Résumé

La physique des particules a toujours exigé une connaissance précise de la géométrie des équipements expérimentaux et la métrologie des détecteurs a été de concert avec celle des accélérateurs. Les premiers systèmes de détection, de dimensions modestes, demandaient déjà un positionnement le plus près du 'théorique', les premières mesures tridimensionnelles ont été pratiquées pour la construction de BEBC, constituant les premiers défis géométriques. Les expériences LHC ne peuvent être comparées à aucune autre précédente au CERN et leurs exigences ont amené les concepteurs et constructeurs à considérer le 'survey' bien plus tôt que jamais auparavant : ce sont des dizaines de milliers de kilomètres qui ont été parcourus, théodolites et caméras digitales en guise de bagages, afin d'assurer les contrôles systématiques en usine ou en laboratoire. La métrologie des expériences occupe une place importante dans les procédures d'installation et exige toujours un degré élevé d'expertise avec un besoin continu d'adaptation et de développement.

**Presented at the TS Workshop
Archamps, France, May 4 – May 6, 2004**

1 INTRODUCTION

Le CERN fête ses cinquante ans : la métrologie des accélérateurs et des expériences aussi. Le besoin de contrôle de la qualité des projets en cours puis les dimensions de plus en plus imposantes, ont vite conduit les constructeurs à abandonner les techniques bien connues d'atelier et à rechercher des méthodes plus globales devant fournir le même degré de confiance et de précision.

Il n'était pas évident au départ d'introduire des techniques de 'géomètre' et il a fallu beaucoup de persuasion à nos 'pères' pour quasiment imposer ces méthodes, réservées à l'époque aux travaux d'aménagement ou de règlement de problèmes de limites de propriétés. Encore aujourd'hui, certains de nos collègues nous appellent, amicalement, les 'arpenteurs' !

Les 'arpenteurs' bénéficient de 50 ans de constants efforts d'adaptation et surtout de recherche et développement de la meilleure instrumentation possible pour le meilleur service attendu. Les défis, quotidiens, n'ont pas été que techniques : nous avons dû nous faire écouter, créer les liens indispensables pour assumer la meilleure efficacité possible mais également former et motiver les équipes afin de servir au mieux les intérêts de l'Organisation.

2 HISTORIQUE



Fig. 1 : triangulation du futur site – 1954

Ce sont des géodésiens qui ont réalisé les premières opérations de géométrie et qui ont fait entrer la culture 'géodésie-métrologie de positionnement' au CERN. Ils ont utilisé les meilleurs théodolites opto-mécaniques existant, ceux qui ont servi à établir les triangulations nationales : la technique nécessite de viser chaque point au moins 2 fois depuis au moins 2 stations différentes, impliquant une préparation rigoureuse, une grande stabilité durant le temps de mesures souvent long et une attention soutenue de l'opérateur. La procédure consistant à fournir des coordonnées à partir de grands réseaux compensés, constitue toujours notre approche générale.

Naturellement appliquée aux expériences PS puis dans les ISR, cette technique a pu longtemps s'adapter à l'environnement encore assez accessible mais les temps de mesures restaient longs et la prise de données sur papier multipliait les risques d'erreur.

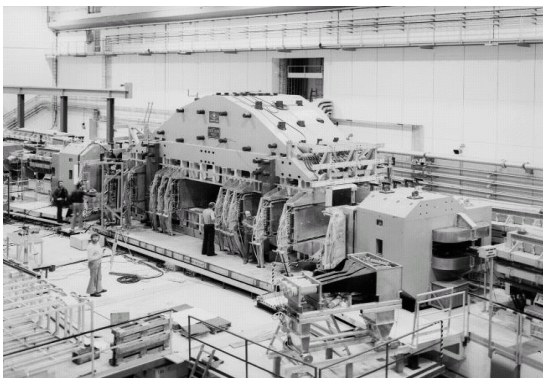


Fig. 3 : aimant SFM - ISR - 1974

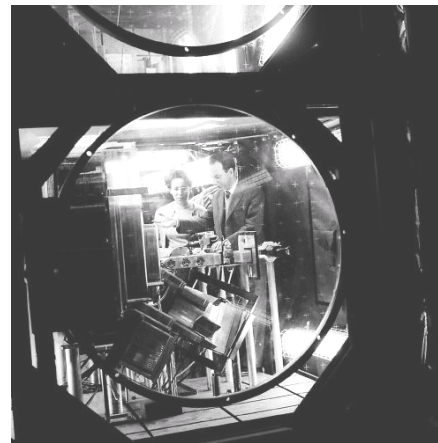


Fig. 2 : PS - 1964

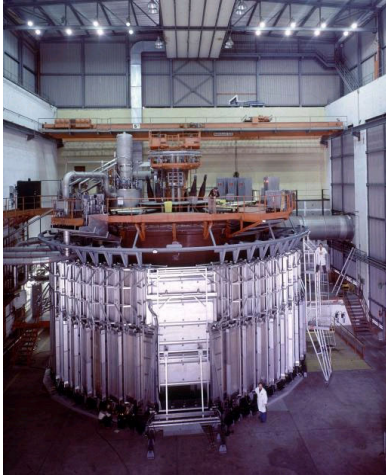


Fig. 4 : BEBC et EMI - 1978

Le projet BEBC-EMI a fourni la première occasion de vraies mesures tridimensionnelles sans contact appliquées à de grands volumes.

Le défi de calculer et compenser en bloc de différents types de mesures reliées à un grand réseau de base tridimensionnel était lancé et a constitué un excellent test qui nous a conforté dans le traitement géométrique des futures expériences collisionneurs, p-pbar, LEP puis LHC.

A noter que ce projet avait été aussi l'occasion d'une première expérience de photogrammétrie sur plaque, les photos étant mesurées par un mono comparateur. Suite à la réforme de ce dernier, ce type d'opérations n'a pas été poursuivi.

3 LES VRAIS DEFIS DES EXPERIENCES COLLISIONNEUR

3.1 Conditions générales

Les configurations des expériences 'cible fixe' permettent d'envisager des réseaux de référence simples avec un nombre limité de stations à partir desquelles les paramètres de positionnement les plus importants des détecteurs peuvent être déterminés quasi directement.

Les expériences type collisionneur avec un angle solide 4π nécessite un réseau entourant les détecteurs voire même pénétrant le spectromètre. De plus, l'imbrication des différents éléments, similaires à un arrangement en 'poupées russes' ou en orange conduit à multiplier les stations et donc à assurer une meilleure robustesse du réseau.

Le grand nombre de points et leur remesure périodique ont conduit à envisager des procédés de contrôle et calcul sur place.

L'arrivée dans les années 85 des théodolites avec lecture digitale ont permis d'écrire des carnets 'électroniques' de stockage et contrôle et les coordonnées ont pu être données pratiquement on-line. Les distancemètres équipant ces théodolites ont permis de contrôler avec précision les résultats en apportant des redondances et des contrôles significatifs. Toutes les expériences LEP, ainsi que les contrôles des pré-montages ont été ainsi traités.



Fig. 5 : contrôle du montage de Opal - 1987

3.2 Les expériences LHC



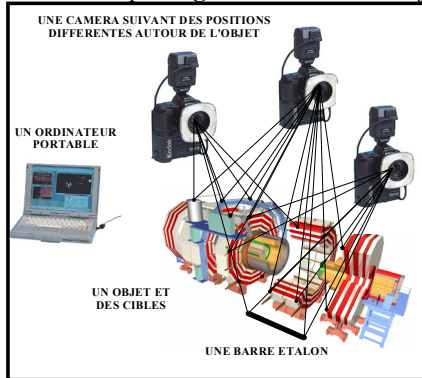
Fig. 6 : pré-montage du Tile Atlas - 2003

La subdivision en modules rend la topologie générale critique. Les pré-montages sont nécessaires et le suivi géométrique indispensable afin d'assurer un 'tel que construit' le plus fidèle au théorique. La géométrie de chaque module doit être connue par un très grand nombre de points, les uns caractéristiques des axes, les autres des formes et enveloppes. Les dimensions imposantes, la multiplicité des éléments et la précision de 50 à 500 microns exigée à la construction et à l'assemblage, imposent une méthodologie en pointe du savoir-faire avec un grand souci de qualité, efficacité et rapidité.

Les demandes de contrôles plus topologiques, les dimensions ne permettant pas toujours des réseaux autour des objets, la multitude des contrôles et les perspectives d'interventions à l'extérieur, nous ont amenés à considérer des méthodes de mesures plus portables, adaptables à tous les cas, précises, contrôlables et rapides.

L'avènement de caméras digitales de 6 M de pixels associé à celui de programmes fiables de calcul de coordonnées tridimensionnelles à partir de photos nous a poussés à s'équiper dès 1998 de systèmes complets, caméras et programmes correspondants. En complément à cette réorganisation, des développements 'maison' nous ont permis une plus grande maîtrise des calibrations des distancemètres et une amélioration notable des analyses et contrôles rendant de plus en plus fiables les mesures des théodolites, celles-ci restant prépondérantes dans un bon nombre de cas.

3.2.1 La photogrammétrie et ses défis



La photogrammétrie est aussi une méthode de triangulation sans contact. L'utilisation de caméras numériques, donc sans développement de film, et de l'automatisation complète du traitement des images, de l'ajustement géométrique des faisceaux perspectifs et calcul des coordonnées tridimensionnelles, permettent d'obtenir les résultats sur place. Le défi a été d'appliquer la méthode à des objets de grandes dimensions telles que la culasse de l'aimant de CMS tout en maintenant les précisions généralement obtenues pour des dimensions plus petites.

Fig. 6 : principe de la photogrammétrie

La facilité d'analyser et de modéliser tous les paramètres internes des caméras nous a permis de calibrer chacune d'elles, d'en vérifier la stabilité et d'intervenir dans le programme afin d'apporter les corrections correspondantes. Le gain en précision est estimé de 30 à 40%.

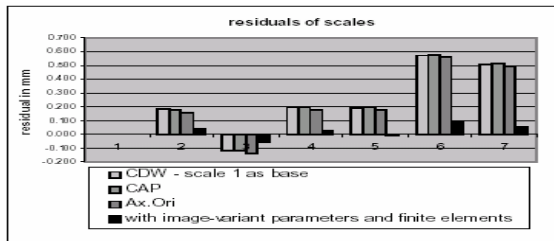


Fig. 8 : résidus après corrections 'éléments finis'

Ces résultats uniques sont les fruits d'un projet de collaboration industrielle reconnu entre EST, le producteur du programme et un Institut de Photogrammétrie en Allemagne : un autre défi.

3.2.2 Les mesures et les résultats : des défis de tous les jours.



L'utilisation de la photogrammétrie n'a pas occulté celle des théodolites et distancemètres qui restent dans certains cas les seuls moyens de mesures adaptés suivant l'environnement (échafaudages, obstacles masquant des surfaces importantes de l'objet).

Fig. 9 : montage du Tile barrel Atlas - contrôle module par module par théodolite et distancemètre.

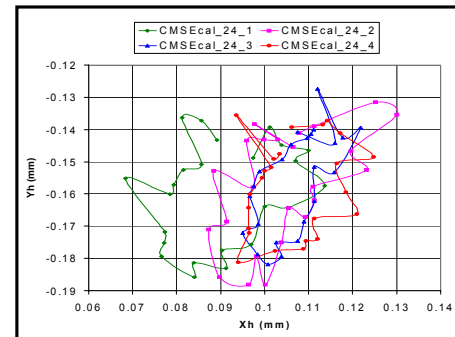


Fig. 7 : calibration du point principal



La photogrammétrie a largement contribué aux contrôles en usine des grosses pièces de CMS avec un défi intéressant pour les mesures au Japon des 12 end plates : après un temps de formation sur place à la prise de photos, les opérateurs japonais envoyaient les photos qui étaient alors traitées et analysées au CERN.

Fig. 10 : end-plate CMS - Kawasaki - Japon

Le plus grand défi, et en première mondiale, reste la mesure en usine des 5 roues du 'yoke' de CMS comportant chacune 600 points photographiés en 4 heures et nécessitant des prises de vues à 18 m du sol et à 12 m de l'objet. Pour ces projets CMS, des types nouveaux de cibles ont été fabriqués spécialement et les précisions obtenues sont entre 60 et 80 microns.

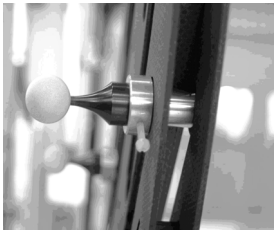


Fig. 12 : cibles spécifiques



Fig. 11 : yoke CMS - DWG - Allemagne

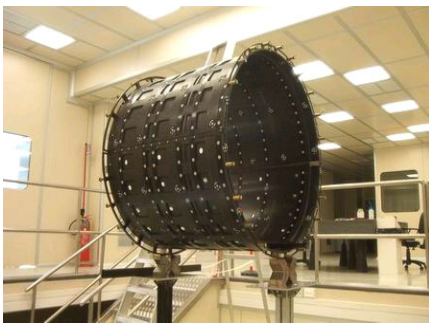


Fig. 13 : tracker CMS - INFN Pise

Précision XYZ : 30 microns

La photogrammétrie a aussi permis de mesurer des objets de tailles plus moyennes mais fragiles, de formes complexes et impossibles à placer sur une machine CMM.



Fig. 14 : pied BT Atlas - I.Z - Russie



Grâce à la rapidité des prises de vues et d'obtention des résultats, la photogrammétrie est bien adaptée pour des mesures de déformations et une possibilité de synchroniser jusqu'à 5 caméras permet d'inspecter à intervalles réguliers des déformations locales ou globales de l'objet.

Fig. 15 : mesure de déformations du MSGC - CMS

4 CONCLUSION : LES DEFIS ET LEURS CONSEQUENCES

La métrologie des grandes dimensions, et plus particulièrement celle basée sur la photogrammétrie, est une activité rare : très peu de firmes en ont les moyens et l'expérience, si c'est le cas, c'est pour de moindres exigences ou sur de plus petits objets.

Les activités peu routinières, les conditions de travail plus les plannings, tous changeant rapidement et amenant à prendre des décisions au jour le jour, rendent difficiles l'intervention de firmes extérieures suivant des spécifications précises établies à l'avance et de plus, les quelques-unes potentielles identifiées sont de petites entités, avec des unités spécialisées réduites. Face au risque d'avoir à faire face à des rotations fréquentes de personnel au gré des changements de plannings et d'activités, le défi a été de rechercher les moyens techniques et financiers pour accueillir et former du personnel plus stable.

Grâce au soutien des structures CERN et des groupes expérimentaux, les programmes de 'project associate', boursier, 'in-kind contribution', 'collaboration agreement', 'trainee et doctorant' ont été largement ouverts à nos besoins. Des collaborations ont été établies avec ETHZ, Dubna et Uppsala et sur les 10 dernières années, pour des durées de 2 à 5 ans, voire même 7 ans, on compte près de 20 jeunes ingénieurs-géomètres participant avec le personnel staff à toutes les phases des mesures conventionnelles et photogrammétriques. L'importance de la tâche nous a donc tenus à un autre défi, celui de transfert et d'échange de formation, conforme à l'esprit de l'Organisation.

Les défis techniques imposés par les expériences LHC, comme ceux décrits plus haut, sont pour l'Organisation autant d'images de marques et d'acquis permanents qui lui confèrent un indéniable rang professionnel remarqué dans la communauté internationale des utilisateurs de ce savoir-faire. Ainsi donc, l'externalisation complète de la photogrammétrie, technique et équipement compris, aurait privé l'Organisation de tout projet 'R et D' en cette matière, qui, heureusement, a été définie dès le début comme une activité de base.

Enfin toutes nos interventions, CERN et hors CERN, impliquent toujours des discussions de préparation avec les groupes demandeurs avec lesquels nous coopérons et traitons directement pour l'organisation des mesures. Particulièrement pour les expériences LHC, nous ne travaillons pas pour mais avec les collaborations, ce qui n'est pas le moindre des défis imposés par le projet.

Chaque collaboration a son 'style' et la multiplicité des détecteurs va de pair avec celle des informations à recueillir et à traiter : à ce jour, entre Atlas, Alice et CMS, nous devons être attentifs à près de 30 réunions mensuelles régulières au cours desquelles le 'survey' peut être un sujet de l'agenda (planning, 'cohabitation', 'workpackage', moyens spécifiques etc.), sans compter les discussions 'ad-hoc' en particulier avec les membres des collaborations extérieures lors de leur passage au CERN : notre management ne peut être ni linéaire ni individualisé, l'adaptation au milieu est donc indispensable et c'est même, pour chacun, une source profonde de motivation.