

## Métrologie appliquée à l'expérience CMS au CERN

### 10 années de photogrammétrie numérique

■ Jean-Frédéric FUCHS – Raphaël GOUDARD – Christian LASSEUR – Jean-David MAILLEFAUD – Aurélie MAURISSET

Présentation de la méthodologie générale appliquée à la métrologie de l'expérience CMS du projet de l'accélérateur LHC au CERN, objet de grandes dimensions, ainsi que les moyens et résultats de la photogrammétrie numérique mise en œuvre au cours de la construction, l'assemblage et le contrôle final de l'expérience.

#### ■ MOTS-CLÉS

Métrologie,  
photogrammétrie  
numérique, mesures  
grandes dimensions

*Le CERN, établi près de Genève, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde.*

*Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des*

*constituants et des lois de l'Univers en utilisant des accélérateurs et des détecteurs très complexes pour sonder les particules fondamentales et ultimes de la matière. C'est en étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision que les physiciens appréhendent les lois de la Nature.*

*Le LHC "Large Hadron Collider" est le grand projet actuel du CERN qui, avec un accélérateur collisionneur proton-proton de 27 km de circonférence, comporte quatre grandes expériences. L'une d'elles, CMS, est un détecteur polyvalent pour explorer un large éventail de domaines de la physique.*

*Le Groupe "SU", Métrologie des Grandes Dimensions, est responsable du positionnement précis des éléments des accélérateurs, des détecteurs et de la maintenance des alignements selon les besoins fonctionnels, comprenant aussi la métrologie de contrôle qualité de tout composant avant son installation lorsque les méthodes classiques d'atelier sont inadéquates.*

*L'article présente les mises en œuvre techniques de géodésie et photogrammétrie industrielles appliquées à la métrologie de positionnement des éléments constituant l'expérience CMS et les résultats obtenus.*

**L**e mandat et la responsabilité des géomètres en charge de la métrologie de positionnement des expériences sont de vérifier pour chaque composant, détecteur et structure :

- leur conformité aux tolérances dimensionnelles fixées pour la fabrication

- leur positionnement dans l'enveloppe approuvée et admise pour l'intégration
- leur position conformément à une valeur théorique, en fait relative à la "meilleure" ligne géométrique matérialisée par l'accélérateur définissant le faisceau de particules
- la répétabilité et la reproductibilité de cette position, les éléments, structures porteuses et détecteurs étant modulaires, et ce au cours des divers mouvements de fermetures et ouvertures nécessaires aux installations et maintenances
- la vérification périodique et régulière de la position initiale, à la suite de déformations mécaniques (charges, effets des champs magnétiques...) ou même de mouvements tectoniques.

La métrologie appliquée est donc un véritable défi qui va de pair avec les tolérances plutôt serrées de fabrication et de positionnement, les dimensions impressionnantes, le matériau des objets, fibre de carbone ou structure fragile et légère et enfin la complexité et l'intrication des éléments à mesurer et positionner.

Le détecteur CMS (*Compact Muon Solénoïde*) est construit autour d'un énorme aimant solénoïde, bobine supraconductrice de forme cylindrique générant un champ magnétique de 4 Teslas – environ 100 000 fois le champ magnétique terrestre. Le champ est confiné par une "culasse" d'acier de 22 m de longueur et 14 m de hauteur qui constitue la plus grande partie des 12 500 tonnes du détecteur. Cette culasse est sectionnée en 11 roues, chacune portant et contenant des éléments de détection. Contrairement aux autres détecteurs du LHC, construits sous terre, CMS a été construit en surface et chaque section, une fois assemblée, emplie de détecteurs et mesurée, est ensuite descendue dans la caverne pour y être alignée, l'une par rapport à l'autre et l'ensemble par rapport à la géométrie de l'accélérateur.

La problématique de CMS est donc que chacune de ces roues doit coïncider l'une par rapport à l'autre en formes, dimensions et positions dans "le" millimètre et en plus positionnée par rapport à la ligne faisceau dans le même millimètre.

Voici donc la belle histoire des géomètres, de la photogrammétrie numérique et de CMS !

## Le CERN et le LHC

Le CERN est aujourd'hui l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. L'acronyme institué en 1952 pour "Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire", qui avait pour mandat de créer en Europe une organisation de rang mondial pour la recherche en physique fondamentale, a été abandonné lorsque le laboratoire vit officiellement le jour, en 1954 mais il fut toutefois conservé. A ce jour, notre compréhension de la matière va au-delà du noyau, et le principal domaine de recherche du CERN est la physique des particules, à savoir l'étude des composants fondamentaux de la matière ainsi que des forces auxquelles ils sont soumis.

Les instruments principaux sont les accélérateurs qui portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes pendant que les détecteurs de particules observent, enregistrent et analysent.

Le grand projet actuel du CERN est le grand collisionneur proton-proton, le LHC. C'est un gigantesque accélérateur de particules, à environ 100 mètres sous terre, quasi circulaire de 27 km de circonférence, avec lequel les physiciens vont étudier les plus petites particules connues : les composants fondamentaux de la matière. Le LHC, en mettant deux faisceaux de protons accélérés chacun à des énergies de 7 TeV, en collision frontale soit donc à une énergie de 14 TeV au centre de masse, jamais atteinte auparavant, permettra aux physiciens de pénétrer encore plus profondément dans la structure de la matière et de recréer les conditions qui régnaient dans l'Univers juste dans les  $10^{-16}$  secondes qui ont suivi le "Big Bang" – voir figure 1.

Le LHC va révolutionner notre compréhension du monde, de l'infiniment petit, à l'intérieur des atomes, à l'infiniment grand à l'échelle de l'Univers. L'accélérateur entrera en service courant 2008. Le principal résultat attendu est la découverte d'une encore hypothétique "particule" responsable de

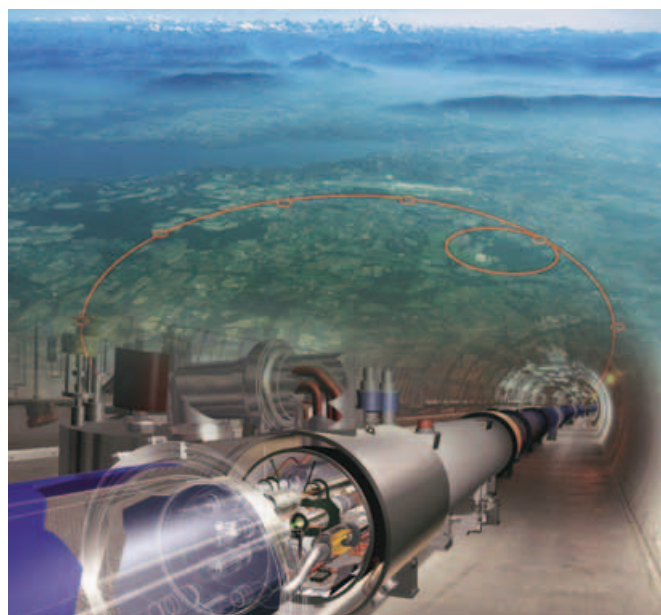


Figure 1. Vue d'artiste du LHC.

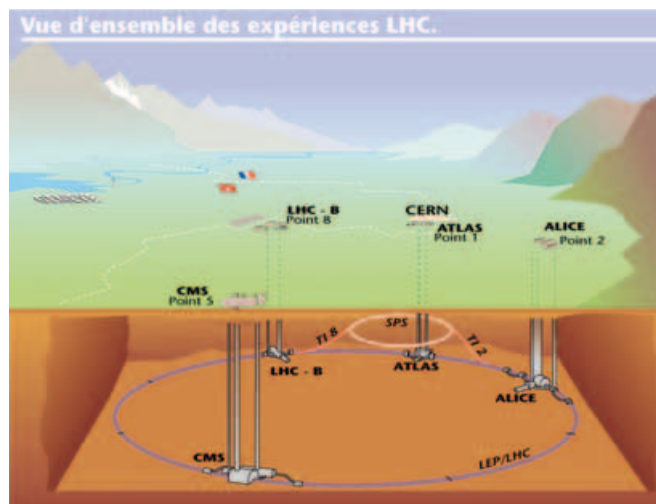


Figure 2. Répartition des expériences LHC.

la masse, déjà baptisée boson de Higgs du nom du physicien théoricien écossais auteur de la théorie prévoyant son existence. Un futur Prix Nobel ?

Quatre grandes expériences : ALICE, ATLAS, CMS et LHCb sont en phase finale d'installation 100 m sous terre sur le parcours du LHC et au lieu des futures collisions – voir figure 2.

La physique nécessite pour la reconstruction des trajectoires et la reconnaissance des particules des tolérances très serrées de positionnements relatifs des détecteurs de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$  à 200  $\mu\text{m}$ , avec des incertitudes en écart-type inférieures à 50  $\mu\text{m}$  en alignement interne et une incertitude en écart-type en alignement externe des différents composants, supports et détecteurs, par rapport à la géométrie de l'accélérateur comprise entre 0.3 mm et un maximum de 1 mm. Certaines opérations de métrologie par photogrammétrie ont dû être réalisées avec une incertitude en écart-type de 20  $\mu\text{m}$ .

## L'expérience CMS et méthodologie de la métrologie

### Description

Toute expérience en physique des particules comporte plusieurs degrés de détecteurs, chacun étant spécialisé en un type de mesures : les détecteurs centraux, en fait les premiers touchés lors des collisions, déterminent la quantité de mouvement des particules produites, produit de la masse par la vitesse, les calorimètres à l'extérieur déterminent leur énergie.

Le tout est disposé dans et autour du plus grand champ magnétique possible fourni par une bobine et une culasse afin de courber les particules chargées électriquement et étudier leur trajectoire qui est en fait leur carte d'identité pour un champ magnétique donné.

Ainsi CMS – voir figure 3 – est un solénoïde supraconducteur de 4 Teslas, composé de 15 blocs quasi cylindriques de plus de 1000T chacun, soit :

- 5 roues "Yoke Barrel" YB (4 de 1500T chacune), la roue cen-



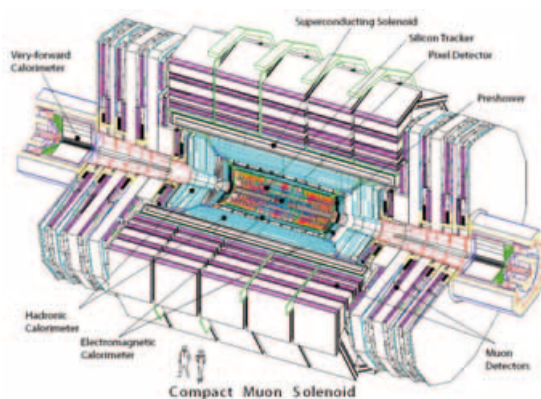
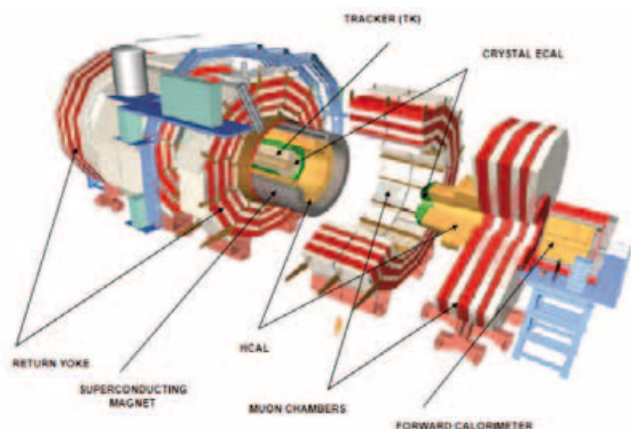


Figure 3. Configuration ouverte (installation) et fermée (fonctionnement) de CMS.

trale (YB0, 2000 T) supporte la bobine (Superconducting Magnet) dans son cryostat, celui-ci servant de supports aux calorimètres (HCAL et Crystal Ecal) et au détecteur central (Tracker :TK), cylindre central de 8 m de long et 3 m de diamètre, considéré comme un objet "rigide" à  $30 \mu\text{m}$ .

- 6 disques "Yoke Endcap" YE placés par ensemble de 3 disques indépendants à chaque extrémité ferment CMS.
- ces 11 éléments forment la culasse de l'aimant (Return Yoke) servant aussi de blindage le calorimètre. Elle est constituée de couches de plaques de fer (structure en sandwich) entre lesquelles sont disposés des détecteurs pour mesurer les muons (Muon Chambers), particules qui interagissent très peu et donc très utiles pour reconstituer les trajectoires enregistrées dans le détecteur central.
- les calorimètres extérieurs (Forward Calorimeter) sont indépendants et complètent les mesures des énergies pour les particules émises sous de petits angles.

Chaque roue "Barrel" (YB) et disque "Endcap" (YE) repose sur des pieds indépendants (Feet) permettant l'alignement individuel mais, une fois aligné, chacun de ces éléments est attaché l'un à l'autre par des vérins venant assurer la fermeture et la rigidité de l'ensemble des "Yokes".

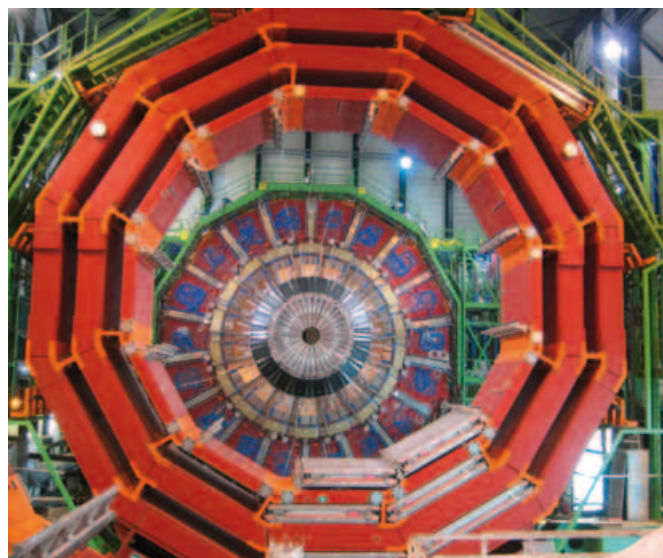


Figure 4. Roue Barrel (YB) et disque Endcap (YE) en cours de remontage au CERN.

Chaque étape de montage de chaque YB, un assemblage de 36 plaques reliées par des cornières, et de chaque YE, ici 12 secteurs circulaires boulonnés entre eux, a été suivie et contrôlée par photogrammétrie, les dimensions la justifiant pleinement ainsi que les plannings, d'abord en usine (Allemagne et Japon) lors des montages à blanc puis lors des remontages en hall de surface – voir figure 4.

### ■ Procédure dite des "poupées russes"

L'arrangement de CMS dit encore en peau d'oignon avec toutes ces couches successives de détecteurs, est comparable à une énorme poupée russe renfermant les autres plus petites jusqu'à la plus minuscule.

La difficulté est qu'ici, au lieu de commencer par cette dernière comme dans le jeu des "poupées russes" en finissant par la plus grosse, pour réaliser le montage final, on doit commencer la plus grosse, celle-ci venant alors recouvrir la suivante immédiate et "légèrement" plus petite qui, à son tour, recouvre la suivante, jusqu'à la "minuscule", la plus critique puisque, placée au centre du tracker, elle est aussi la plus précise car elle voit toutes les particules créées lors des collisions.

Les physiciens attendent des géomètres la livraison des positions relatives 3D des différentes couches de détecteurs jusqu'au cœur de l'expérience.

En fait, chaque élément à positionner comporte des marques fiducielles extérieures (trous de référence qualité H7/G7) connues dans le référentiel propre à l'élément, c'est-à-dire reliées géométriquement à la partie sensible du détecteur, soit par construction soit par mesures de calibration-fiducialisation par divers moyens tels que machine "à coordonnées" ou laser tracker ou photogrammétrie.

Les mesures de ces références extérieures, visibles, accessibles au moins une fois et si possible permanentes, dans un référentiel donné, soit par rapport à un autre objet environnant, une autre poupée, soit par rapport à un référentiel général lié à la géométrie de l'accélérateur, la poupée la plus extérieure, donnent donc le positionnement, soit relatif soit absolu, soit même les deux si le contenant est déjà connu dans le système général.

Le jeu consiste donc à associer pour adaptations tridimensionnelles successives des fichiers de construction des détecteurs

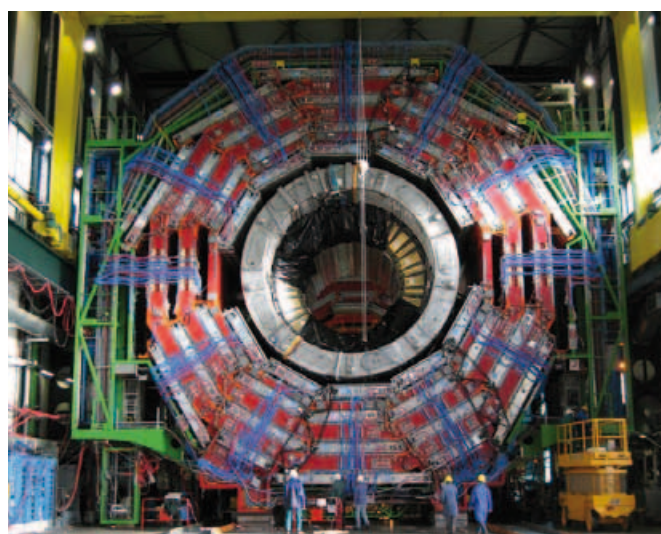
► (données internes), des fichiers de calibration-fiducialisation, des fichiers de mesures relatives et référencés à un système local et/ou général, avec à chaque étape une analyse raisonnée des écarts d'adaptation dus soit à des déformations locales et/ou générales soit aux différentes configurations non reproductibles a priori soit, bien sûr et le plus souvent, à ces deux effets conjugués, ce qui complique sérieusement la discrimination déformation réelle-corrélation des différentes "précisions" d'une adaptation à l'autre.

Les physiciens souhaitent connaître la position de tous ces éléments une fois l'expérience CMS fermée et installée dans la caverne par rapport à un même référentiel appelé "système physicien" déterminé par le point d'interaction des collisions au cœur de l'expérience et les directions des faisceaux proton-proton entrant en collision.

Ainsi et afin de répondre à ces besoins des analyses "en ligne" des trajectoires de particules dans le champ magnétique, caractéristiques de leur quantité de mouvement (*momentum*) et de leur énergie, un système de surveillance interne des positions relatives d'un grand nombre de détecteurs est installé, inspectant en cours de fonctionnement chaque élément d'une même couche ainsi que la liaison avec, au moins, les deux couches adjacentes.

Ce système propre à CMS, est basé sur un arrangement approprié de caméras digitales montées et calibrées sur des supports en fibre de carbone (MAB : Muon Alignment Barrel) au nombre de 36 répartis dans les 5 roues BarrelYBs et regardant les 250 chambres à muons et faisant la liaison optico-géométrique avec les chambres des EndcapsYEs et le central trackerTK – voir figure 5.

Le groupe a largement contribué au concept de ce type de contrôle unique, son intégration dans l'environnement de l'expérience, sa calibration et sa mise en place et aux mesures correspondantes. Là aussi la photogrammétrie a été l'instrument idéal à tous les niveaux de contrôles et mesures.



**Figure 5.** Fin du montage des roues Barrel - Chambres à muons et MABs (structure noire).

Enfin, l'expérience CMS étant un ensemble de près de 160 laboratoires et Universités répartis entre 36 nations du monde entier et réunissant 2 100 scientifiques et ingénieurs, la conception et le suivi industriel de bon nombre de composants ont été en fait supervisés par les différentes collaborations, le lieu de fabrication n'étant d'ailleurs pas toujours dans le pays d'origine de la collaboration en charge, certaines parties ayant été fabriquées dans des pays ne participant pas directement à l'expérience.

Cette approche, nécessaire vu l'ampleur du projet, a amené le groupe à intervenir régulièrement en usine (Japon, Corée du Sud, Allemagne, Russie, Grèce, Italie, Espagne, Portugal...) à la demande des responsables de projet pour des mesures de métrologie à différents stades, depuis les tests de déformation de prototypes, puis les validations géométriques des modèles individuels finaux et enfin, pour les objets modulaires tels que les YBs et YEs, aux mesures d'acceptation des pré-assemblages "à blanc" en usine avant démontage et expédition au CERN.

Ainsi près d'une centaine de fois en 3 années, les géomètres sont partis en mission emmenant avec eux une petite valise contenant la caméra numérique et les accessoires indispensables.

## ■ Les moyens à disposition et les principes d'utilisation

Ils sont basés sur les techniques de mesures et maintenance des réseaux tridimensionnels, complétées par la photogrammétrie numérique avec des adaptations, hardware et software, pour le traitement des objets de grandes dimensions y compris l'utilisation du laser tracker pouvant être conjoint avec la photogrammétrie, la micro-triangulation de bancs de calibration-fiducialisation et la mise en œuvre d'instrumentation en complément des réseaux spatiaux. Ainsi des équipements spécifiques, caméras électro-optiques "angle monitoring" (BCAM), capteurs hydrostatiques capacitifs (HLS) et clinomètres électroniques viennent compléter la "boîte à outils" des moyens traditionnels de "survey" pour des applications bien déterminées. Les liaisons géométriques de ces instruments spéciaux avec les détecteurs étant connues par calibration et adaptation, ceux-ci sont tous intégrés dans la métrologie générale de CMS et servent à la surveillance extérieure permanente des positionnements relatifs et absolus des YBs et des YEs qui sont les vrais contenants physiques des détecteurs.

Les supports informatiques de traitement vont de pair avec les moyens techniques de terrain auxquels ils sont connectés électroniquement. Ils sont adaptés pour des prises de données rapides et des analyses sur place, aucune opération n'étant close avant sa validation et le départ du lieu de mesures. Citons par exemple la récapitulation des mesures faites et le contrôle de la redondance par point et station puis le calcul en bloc, le contrôle du contraste des premières photos suivant les paramètres de réglage, la visualisation des stations de caméras par rapport à l'objet mesuré pouvant conduire à un complément de prises de vues dans les situations difficiles (encombrement, angles morts, masques), le calcul "en libre" des coordonnées image en fin d'acquisition.





Figure 6. Caméra D2X et flash annulaire.

## Système de photogrammétrie numérique au CERN

### ■ Description et caractéristiques du système

Le CERN a fait l'acquisition d'un système de photogrammétrie numérique en 1998 dès l'apparition sur le marché des premières caméras numériques à cette époque à grande résolution 6 millions de pixels DCS 460 puis DCS 660, le tout piloté avec le software DPA-Win-Aicon. De nombreux projets de fin d'études en collaboration avec les Ecoles et Universités européennes, ainsi que des participations à des projets de recherche et développement industriel ont permis d'apprivoiser les techniques et de les adapter aux besoins et contraintes inhérentes aux grandes dimensions – voir figure 6.

Les effets de l'instabilité des boîtiers, des optiques et des "chips" ont été étudiés et quantifiés, en particulier la transmission des erreurs dans les cas où seuls certains points très dispersés sont à mesurer, là où on doit assurer le bon recouvrement des prises de vues en arrangeant judicieusement les points auxiliaires de contrôle et les barres d'étalonnage. Le système a été remplacé par des caméras D2X 12,4 millions de pixels plus stables, plus performantes et équipées de communications WLAN puis complété avec des logiciels plus rapides tels que 3D STUDIO-Aicon.



Une grande variété de types et de tailles des cibles rétro-réfléchissantes, fabriquées à la demande par Géodésie Maintenance Services (G.M.S) telles que boutons, sphères (très utiles lorsque les espaces autour de l'objet sont restreints) étiquettes, plaques codées et plaques codées trouées pouvant être mises autour d'une cible bouton la rendant ainsi codée, permet d'opérer jusqu'à 20 m de l'objet, les objectifs les plus utilisés étant les 20 mm et 24 mm. De nombreuses barres étalons en fibre de carbone (de 0.5 m à 1.5 m), certaines en forme de croix définissant un référentiel initial, régulièrement étalonnées avec une machine à coordonnées, peuvent être disposées dans diverses directions lors des prises de données, ce qui aide très efficacement le contrôle et l'analyse de la propagation des erreurs. Les codes sont définis sur 14 et 20 bits ce qui autorise respectivement un jeu de 520 et près de 10 000 désignations différentes – voir figure 7.

Les précisions généralement atteintes sont de l'ordre de 1/30 à 1/50 pixel, un grand soin étant toujours donné à l'obtention des meilleurs recouvrements et donc la plus grande surabondance possible, le tout pour un nombre raisonnable de prises de vues, les conditions d'opérations n'étant elles pas toujours favorables au vu de l'encombrement des zones et le peu de place d'évolution autour de l'objet.

Le software utilisé permet dans certaines conditions de réglage, de reconnaître avec une précision de l'ordre de 1/20 pixel, des cibles codées imprimées sur papier non rétro-réfléchissant, donc produites à bas coût, ce qui peut "dépanner" quelquefois quand un très grand nombre de cibles est nécessaire (mesures de profil, surface, enveloppe, supports de structure) et que la haute précision n'est pas exigée.

### ■ Mise en œuvre et résultats d'une opération de photogrammétrie

Un projet de photogrammétrie comporte plusieurs étapes :

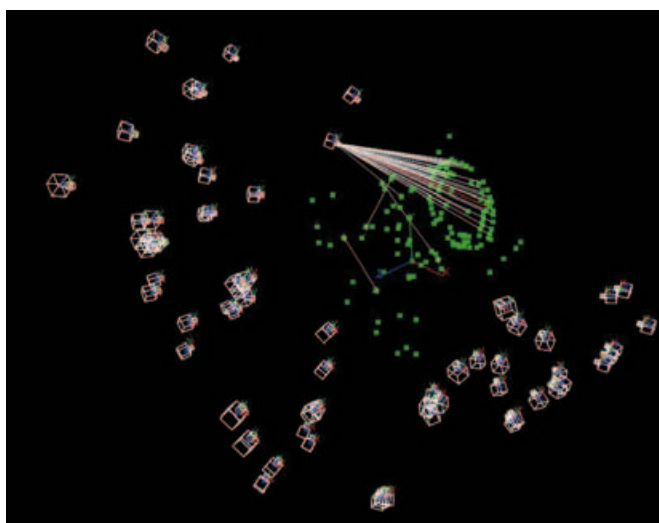
- Équiper les marques fiducielles de l'objet de cibles rétro-réfléchissantes, si possible codées ou les entourer de plaques codées trouées.
- Disposer les points de contrôle communs (au minimum 7 étiquettes codées) aux prises de vues successives de recouvrement régulier horizontal et vertical. Cette délicate opéra-



Figure 7. Divers types de cibles photogrammétriques (Aicon et G.M.S) et barre en croix.

tion demande un savoir-faire certain, particulièrement lorsque toutes les faces, ni toujours planes ni régulières doivent être liées entre elles. La précision finale dépend largement de la densification et la disposition de ces points et le jeu consiste à ce que tous les points vus depuis une même station remplissent le format, ce qui dépend principalement des distances d'opération et des espaces d'évolution autour de l'objet. Les cibles-sphères, soit centrées dans un trou de référence, soit montées sur un support magnétique en points de contrôle, permettent un large angle de prises de vues en réduisant ainsi de possibles erreurs d'excentricité des cibles circulaires boutons ou étiquettes dues à des prises de vues trop rasantes. Le choix, quand on peut, du lieu d'opération est donc primordial en sachant bien qu'a priori, il est peu recommandé, même si possible, d'ajouter des points de contrôle en cours de prises de vues.

- Disposer les barres de mise à l'échelle (au moins 2) et les répartir dans le volume de l'objet suivant des directions spatiales différentes. Ces barres en fibre de carbone (1.50 m) ne sont pas adaptées à la mise à l'échelle pour un objet de grandes dimensions supérieures à 10 m (roues YBs et YEs). C'est pourquoi on complète par des mesures de grandes distances prises sur l'objet lui-même soit avec un disto-chaîne/fil (précision : 0.2 mm) soit directement par triangulation locale (précision : 0.3 mm).
- D'effectuer et contrôler les prises de vues. Elles sont volontairement sous-exposées afin d'avoir le meilleur contraste (paramètres : f/16 ou f/22 et vitesse : 1/250). Tout comme la disposition des points de contrôle et des barres, la précision finale dépend de cette opération. Cela suppose de laisser la caméra au repos au sortir de sa valise avec mise en température avant toute manipulation (moins sensible avec les D2X), de contrôler en début d'opération le contraste, de pouvoir opérer avec un format bien rempli avec le recouvrement horizontal et vertical au mieux, s'assurer du blocage de la focale et des retournements et déversements réguliers de la caméra.
- le software 3D STUDIO permet de visualiser en cours d'opération les photos prises, les positions des caméras, le nombre



**Figure 8.** Visualisation spatiale des stations de caméras, des rayons de prises de vues et des répartitions des distances et barres de contrôles – 3D STUDIO.

de rayons passant par chaque cible, ainsi que le déroulement du calcul si, au préalable, les premières photos ont englobé une barre en croix définissant ainsi un référentiel de départ. Toute intervention supplémentaire au vu des répartitions et résultats partiels est donc possible – voir figure 8.

- Les paramètres de prises de vues sur cibles "papier" non réfléchissantes doivent être correctement adaptés à l'environnement et aux distances moyennes d'opération, l'ouverture dépendant des conditions d'éclairage et de la nécessité de "flasher". Des ouvertures de 5.6 à 8, pour des vitesses d'exposition de 1/125 et un nombre ISO (sensibilité du capteur) réglé à 300 et utilisation du flash à 1/2 sont les paramètres le plus souvent retenus, les résultats finaux, pour un objet "moyen" et dans de bonnes conditions, n'étant alors pas significativement différents de ceux obtenus avec des cibles rétro-réfléchissantes. Enfin, si on dispose d'un fort éclairage, on peut mêler cibles rétro-réfléchissantes ou non.

- Traiter et analyser les données finales. L'interface WLAN – portée 12 m environ – permet le traitement et contrôle quasi "on-line" sur le terrain. Le calcul approché et itératif des positions successives des caméras et des points dans l'espace s'opère dès la troisième photo si on a pris soin d'incorporer la barre en croix dans les premières prises de vues, la compensation par les moindres carrés par la méthode des faisceaux convergents s'appliquant au fur et à mesure affinant ainsi les résultats jusqu'à la dernière prise de vue. Le calcul final est validé à la suite de l'obtention et l'analyse des coordonnées "image" et de leurs écarts-types, des valeurs des paramètres internes d'auto-calibration de la caméra, aussi de leurs écarts-types (focale, coordonnées point principal, radial symétrique plus tangentiel et asymétrique distorsions de l'objectif, échelle et cisaillement du chip), des coordonnées tridimensionnelles "objet" après mise à l'échelle, transformations finales dans le référentiel choisi, analyse des résidus et des ellipses d'erreurs données en écart-type.

L'option FiBun (*Finite Element Bundle Adjustment*) de 3D STUDIO-Aicon permet de modéliser la non-planéité du chip. Une grille de correction type "raster" est appliquée suivant un pas de 2.35 mm et tend à réduire les effets des distorsions en bordure de format. Le gain en précision peut être de l'ordre de 40 % mais l'application de cette facilité demande des excellentes densité et répartition de points et un plus grand nombre de prises de vues, pas toujours réalisables suivant les formes de l'objet.

- Enfin déséquiper l'objet, ranger les cibles et étiquettes codées, d'où l'importance d'avoir des jeux de codes collés sur des feuilles magnétiques ou supports carton facilement récupérables et réutilisables.

Malgré les étapes d'installation et de rangement qui peuvent être longues et fastidieuses, la photogrammétrie en fonction des dimensions, nombre de points, de l'espace disponible et du temps d'immobilisation alloué de l'objet à mesurer, s'impose par sa souplesse d'utilisation, sa mobilité, sa précision contrôlée et la rapidité de traitement. Cette méthode de mesure a marqué un tournant dans la métrologie des quatre expériences LHC, autant en laboratoire et usine en lieu et place d'autres moyens mécaniques de contrôle que lors des réassemblages et positionnements finaux.



**Figure 9.** Contrôle en usine (Allemagne) cibles codées magnétiques et sphères rétro-réfléchissantes (production G.M.S) et premier remontage au CERN (2000).

## Exemples d'application et résultats

Les "précisions" des résultats sont exprimées en valeurs moyennes d'écart-types donnés pour un intervalle de confiance à 95 %.

### ■ Contrôles de fabrication des roues Yoke Barrel YBs (1999-2001)

Chronologiquement, ce furent les premiers objets de grandes dimensions – chaque roue fait 14 m de diamètre – traités en photogrammétrie par le CERN et à eux seuls, ils ont justifié pleinement l'utilisation et l'achat d'un système complet. Le projet était de mesurer à des étapes données de montage en usine en Allemagne les 5 roues, chacune montée l'une après l'autre sur un chevalet support d'un gabarit de montage et un mandrin de centrage.

Chaque roue est un assemblage de 3 couronnes circulaires, constituées chacune de 12 plaques, et des doubles cornières font la liaison mécanique entre les plaques adjacentes et les couronnes. Ces cornières, de 2.50 m de longueur, en fait l'épaisseur de la roue, sont repérées par 6 trous de précision, 3 pour chaque face, connus par rapport aux faces de contact avec les plaques et pratiqués avec précision lors de leur usinage : la position spatiale de chaque cornière, liée aux plaques, donne ainsi la géométrie couronne par couronne puis de l'ensemble de la roue et les coordonnées relevées donnent les écarts par rapport à la figure théorique. La tolérance contractuelle d'assemblage d'une roue a été fixée à l'intérieur d'une enveloppe générale réelle "telle que construit" limitée à 5 mm "min/max". Les contraintes de temps, d'espace et de configuration ont conduit à effectuer les prises de vues depuis une nacelle élévatrice, permettant des stations à 18 m du sol et des vues plongeantes englobant les 2 faces de la roue.

Plutôt que des simulations théoriques, une maquette au CERN d'un peu moins 2/3 de roue constitué d'un empilage de blocs de béton a servi à établir la procédure de mesure en fonction de l'espace alloué, de choisir la bonne focale en fonction des distorsions connues, des distances d'opération et de la taille de l'objet puis de tester divers types de cibles et plaques codées correspondantes et disposées autour des cibles boutons et finalement à définir la séquence de prises de vues pour connecter les deux faces de l'objet en un nombre minimum d'images – voir figure 9.

Afin d'assurer une précision objet maximale générale de 0.2 mm avec la DCS 420 6 millions de pixels, seule disponible à cette époque, et un objectif de 20 mm, un diamètre de 40 mm de partie rétro-réfléchissante des cibles avait été adopté à 40 mm garantissant un minimum de 5 pixels touchés pour des distances maximales d'opération de 16 m. L'utilisation des cibles sphères rétro-réfléchissantes, aussi de 40 mm, ont permis d'éviter des prises de vues trop rasantes et d'opérer les liaisons photogrammétriques entre les faces dans les conditions optimales de convergences.

Le matériel en usine a comporté 240 cibles boutons référence, autant de plaques codées sur support magnétique trouées et entourant ces références plus 200 autres plaques codées magnétiques et près de 100 cibles sphères montées sur des queues magnétiques.

La mesure a demandé un minimum de 300 clichés – 100 photos par face plus une centaine pour les connexions, l'ajout de 12 barres d'échelle de 1.50 m calibrées à 10 µm en écart-type plus la mesure à l'aide du disto-chaîne d'une quinzaine de grandes distances de 8 m à 13 m à 0.2 mm en écart-type pour compléter la mise à l'échelle. Chaque opération – une quinzaine de fois – prenait 4 heures de prises de vues mais nécessitait 2 heures de "ciblage" et presque autant de démontage, la lec-



ture des photos noir et blanc en format bitmap non compressé puis le calcul et l'analyse prenant à l'époque avec le programme DPA-Win lui aussi quelques heures. Les positions dans un même référentiel objet des 240 points des cornières de liaison ont montré que les 5 roues avaient été construites en usine dans une enveloppe extérieure réelle de 3 mm, les corrections ayant été bien appliquées lors des contrôles partiels couronne après couronne. Les résultats ont vérifié que les précontraintes appliquées étaient correctes puisque, chaque roue, démontée puis réassemblée au CERN avec l'outillage de l'usine, validée de nouveau, devait être libérée du mandrin central et une fois reposée sur ses pieds, remesurée et vérifiée comme ayant la forme la plus exacte sous son propre poids par rapport à la théorique. L'incertitude spatiale obtenue sur l'ensemble de chaque roue a été conforme aux prévisions de la maquette autant en usine que lors des contrôles au CERN, soit 0.2 mm en écart-type, voire même 0.1 mm en écart-type pour les points d'une même face. Ces valeurs, bien meilleures que celles demandées pour la construction des roues, ont permis que les points des cor-



Figure 10. Descente du YB0 (noter les cibles) - Février 2007.

nières constituent l'ossature métrologique "objet" de référence pour le positionnement des détecteurs venant entre les plaques et à l'intérieur de la roue centrale YB0 et demandant des précisions submillimétriques. Il y avait donc dès le départ un intérêt évident à avoir et maintenir la meilleure métrologie possible attachée à chaque roue.

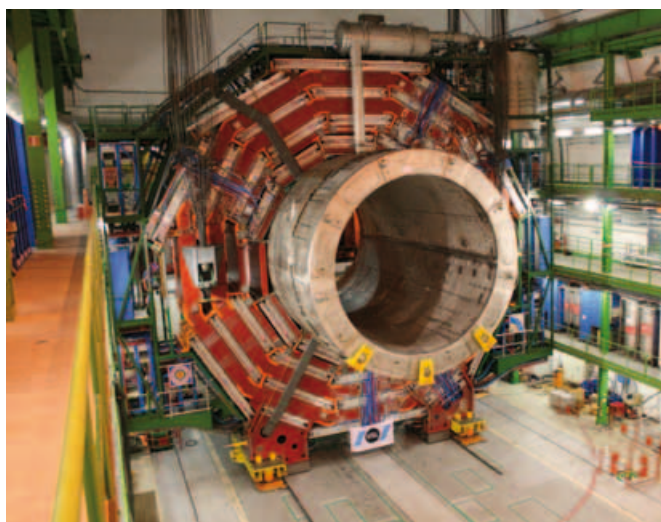


Figure 11. Positionnement YB0 depuis le réseau et photogrammétrie d'ensemble des YBs.

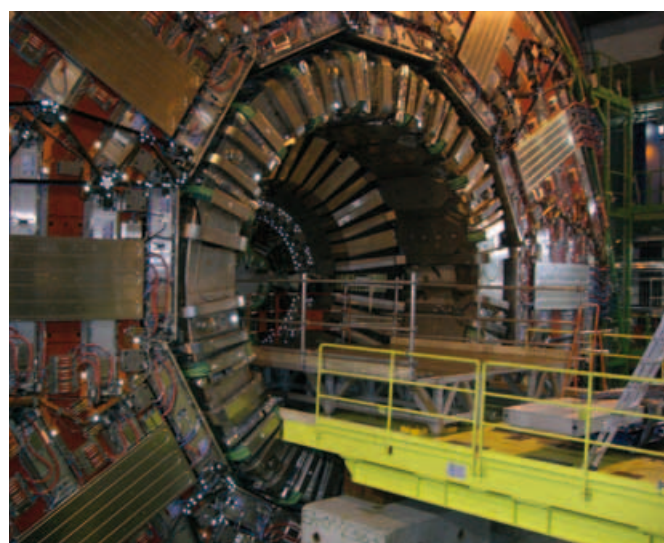
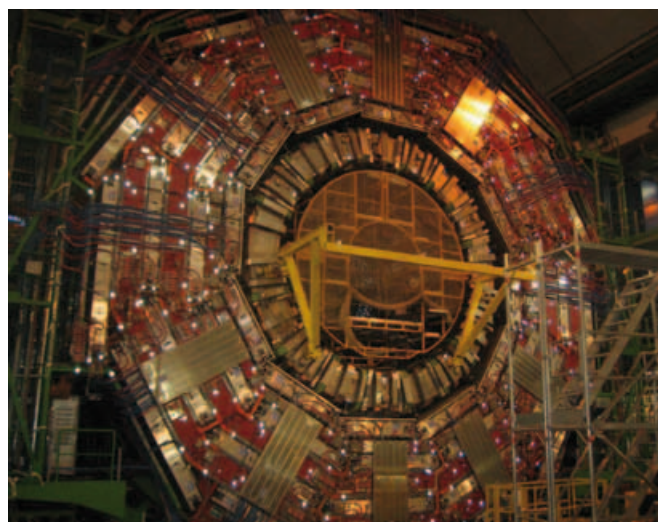


Figure 12. Photogrammétrie locale roue extérieure (YB), central tracker (TK) et calorimètre.



### ■ *Positionnements des roues Yoke Barrel YBs et des détecteurs contenus*

Les 5 roues, déjà équipées des chambres à muons, ont été descendues début 2007 dans la caverne. Chacune a été remesurée pour rendre compte des déformations possibles après descente, un "tassement" maximum de 1.5 mm ayant été enregistré, déterminer une nouvelle géométrie de référence de l'objet et sa position dans le référentiel lié à la géométrie de l'accélérateur – voir figure 10.

Le recul plus limité en caverne après les descentes de tous les éléments a conduit à remplacer les cibles de 40 mm par des cibles permanentes de 20 mm qui équipent maintenant toutes les roues YBs et disques YEs.

Les coordonnées relatives tridimensionnelles des détecteurs connues dans le référentiel objet des roues les contenant et mesurées lors de leur insertion en surface ont été transformées par ajustement spatial en coordonnées définitives dans le référentiel général de l'accélérateur via des mesures géodésiques depuis le réseau de base matérialisé par plus de 80 références aux murs de la caverne (potences "plug-in", mires permanentes) et rattaché aux références géométriques de la machine qui ont servi aux alignements précis de ses composants.

Les coordonnées spatiales des détecteurs descendus ensuite (compléments des systèmes MABs d'alignement interne des chambres à muons, calorimètres HCAL et CRYSTAL ECAL, détecteur central TK) et contenus dans les YBs et YEs déjà connus dans le référentiel général ont été mesurées par des photogrammétries locales rattachées aux référentiels des contenants, assurant ainsi une excellente précision locale relative inférieure à 0.2 mm en écart-type. L'incertitude générale de positionnement de tout détecteur ou autre dans le référentiel général de la machine est donnée et vérifiée à 0.5 mm en écart-type – voir figures 11 et 12.

### ■ *Positionnements des disques Yoke Endcap YEs et des détecteurs attachés*

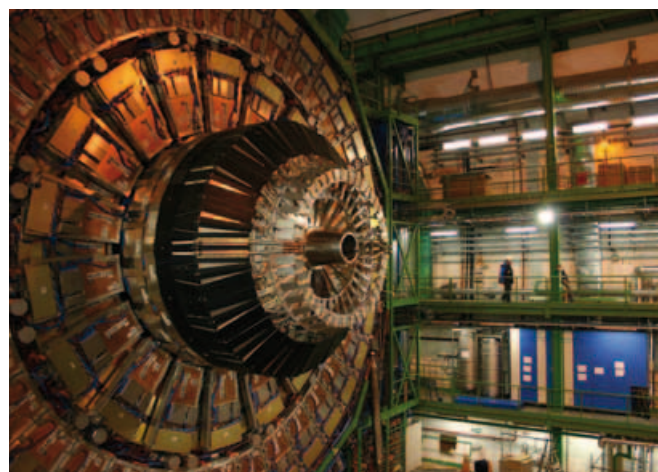
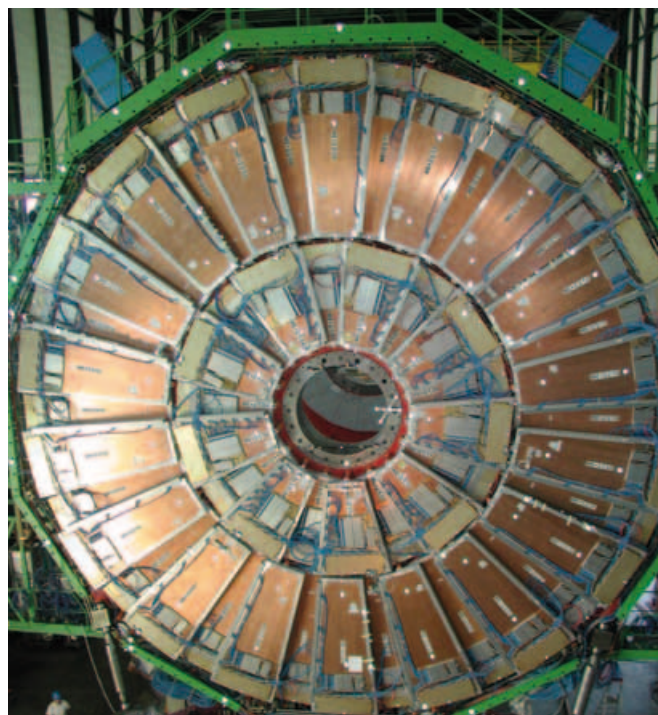
La métrologie de contrôle de fabrication des 6 disques YEs a permis de tester une utilisation à distance du système lors des montages à blanc et des validations qui ont eu lieu à Kobé au Japon où chacun des 12 demi-disques de 14 m de diamètre,



**Figure 13.** Validation en usine d'un 1/2 disque et remontage au CERN en position verticale.

composé de 10 secteurs boulonnés, a été contrôlé en position couchée par photogrammétrie. Le projet supposait que le personnel soit formé à la préparation et à la prise de vues et puisse opérer suivant une procédure établie sur place lors du premier contrôle, envoyer les photos au CERN où elles étaient vérifiées (recouvrements et formats corrects, distances d'opération respectées etc), puis traitées jusqu'aux résultats finaux. Cet exemple de transfert de technologie réussi, a montré la facilité d'apprentissage du système.

Les disques remontés au CERN et contrôlés, les détecteurs à muons disposés en secteurs une fois ajustés couche après couche sur leurs supports, ont été mesurés, une précédente mesure de ces derniers ayant permis de valider les systèmes d'accrochage et de minimiser les temps de mise en place suivant un schéma précis. Les incertitudes de toutes les mesures se sont révélées mieux que 100  $\mu$ m en écart-type, les configurations étant très favorables malgré les dimensions de l'objet – voir figures 13 et 14.



**Figure 14.** Montage des détecteurs à muons (hall de surface) et installation finale en caverne.

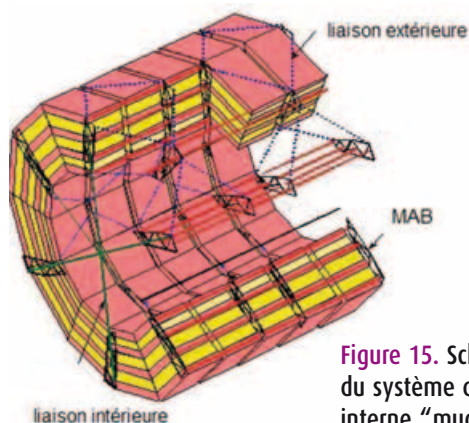


Figure 15. Schéma d'ensemble du système d'alignement interne "muon barrel".



## ■ Photogrammétries et Métrologies particulières

Dans l'expérience en cours, les positions relatives des 250 détecteurs à muons "Barrel" des YBs et des 540 "Endcap" des YEs sont inspectées à  $200\text{ }\mu\text{m}$  en écart-type près par un système d'alignement interne. Les chambres "Barrel" ont été fiducialisées spécifiquement, chaque coin comporte 1 cible extérieure photogrammétrique, les 4 devant être liées à des diodes lumineuses LED internes au détecteur et vues par des caméras CMOS montées sur des structures spécifiques (MABs). Les 5 roues YBs fermées, la disposition des structures recrée un schéma de triangulation active et redondante, chaque coin pouvant être vu d'au moins 2 MABs différents – voir figure 15.

La photogrammétrie (D2X et 3DSTUDIO-Aicon) a été intensivement utilisée pour déterminer les positions relatives des cibles, des diodes et des caméras via un banc de calibration électro-optique, périodiquement contrôlé avec la photogrammétrie et le laser tracker LTD 500. Chaque MAB a été validé en laboratoire (dimensions et déformations "tel que construit", détermination des logements des caméras CMOS) avant son transport et sa calibration au CERN. Après installation des détecteurs et détermination dans le référentiel de la roue correspondante, chaque MAB a été ajusté suivant le schéma proposé puis mesuré dans le référentiel de la roue. Un ajustement tridimensionnel type Helmert considérant comme "passives" toutes les coordonnées relatives aux MAB (validation et calibration), toutes les coordonnées relatives aux chambres (fiducialisation et positionnement dans chacune des roues lors de leur montage) et toutes les coordonnées relatives à chaque roue (validation et contrôle) et comme "actives" les coordonnées des points de contrôle de

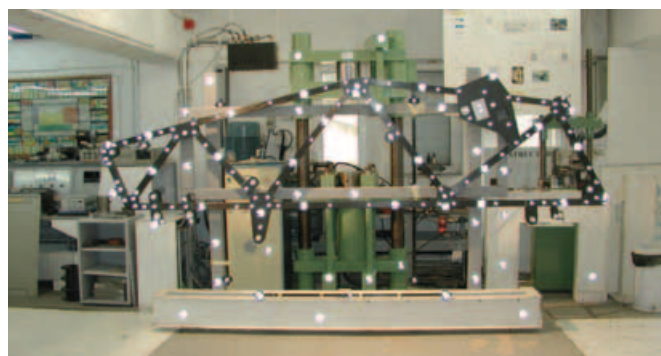


Figure 16. Banc de validation d'un MAB en usine (Grèce).



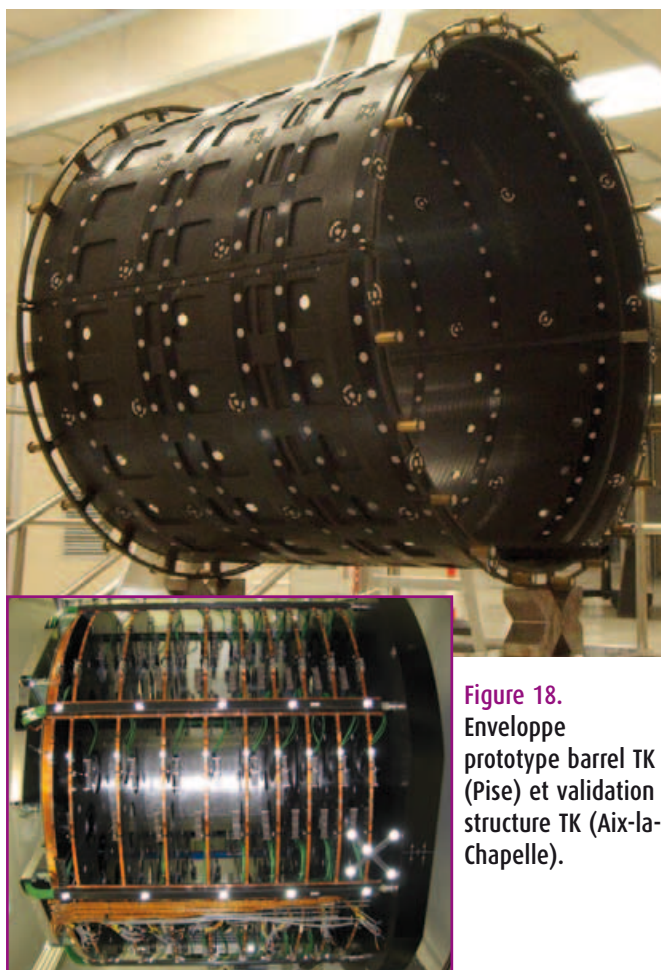
Figure 17. Calibration optique d'un MAB et installation dans une roue YB.



chaque roue ayant servi à son positionnement dans le référentiel général de la machine, fournit toutes les positions spatiales des chambres et des éléments du système interne d'alignement dans le référentiel général de la machine. Le fichier obtenu constitue la base de données géométriques attendue par les physiciens. L'incertitude en écart-type des mesures de validation et calibration est donnée chacune à  $20\text{ }\mu\text{m}$ , celle de positions à  $100\text{ }\mu\text{m}$ , respectant le budget total d'erreur total de  $200\text{ }\mu\text{m}$  en écart-type. On estime à près de 40 000 photos l'opération "détecteurs muons barrel" – voir figures 16 et 17.

Les 13 composants du détecteur central (TK), cylindre de 7 m de long et 2.5 m de diamètre et dont la "précision interne" est prévue à  $20\text{ }\mu\text{m}$ , se décomposent en demi-barrels et demi-end-caps gauches-droites, chacun se présentant suivant 3 couches (interne, intermédiaire et extérieure) s'emboîtant les unes les autres. Le volume et le nombre des services imposés par l'électronique de fonctionnement et de contrôle ont rendu les validations des enveloppes primordiales tant au stade des prototypes que des objets "tels que construits". Chaque composant, sous-couche et enveloppe comprise, une fois validé individuellement, est inséré et repose dans le cylindre container via un système unique de 2 rails, est rattaché par photogrammétrie (D2X et 3DSTUDIO-Aicon) relativement à des marques fiducielles extérieures du cylindre ménagées près des dispositifs de réglage de l'ensemble. Chaque sous-couche demi-barrel et demi-end-cap a ses propres paramètres géométriques de positionnement dans le cylindre principal, les incertitudes relatives





**Figure 18.**  
Enveloppe  
prototype barrel TK  
(Pise) et validation  
structure TK (Aix-la-  
Chapelle).



**Figure 19.**  
Métrologie du  
cylindre final  
après validation  
d'une structure  
en sous-couches  
(CERN).

## ■ En savoir plus sur le hadron et l'électron-volt

### Le hadron

Un hadron est un élément composite non homogène de particules subatomiques, les quarks et/ou les antiquarks, régi par l'interaction forte, caractérisée elle par la présence de gluons qui sont "les vecteurs porteurs de cette force". On ne compte que 6 quarks et 6 antiquarks fondamentaux qui sont donc les "briques" constitutives de la matière. Un "vecteur" ou "boson" n'est pas une particule mais l'agent d'une force : s'il n'y a pas de "vecteur", aucune "force" ne peut s'exprimer, autrement dit, rien ne se passe ! Les gluons sont les responsables de la cohésion des quarks, les "bosons"  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$ , découverts au CERN il y a plus de 20 ans, sont les agents de la force électrofaible, alliant la force électromagnétique dont le boson est le photon et la radioactivité : les explosions solaires sont les exemples types de manifestation de la force électrofaible.

Pour aider à la compréhension, osons une comparaison : au cours d'un match de football, le boson c'est le ballon : pas de ballon, quoi faire des 11 joueurs d'un côté et des 11 autres de l'autre ? Les hadrons sont aussi appelés particules lourdes puisque constitués d'au moins deux quarks (quark et/ou anti-quark), par comparaison aux leptons dites particules légères car elles sont des éléments uniques de matière et donc dépourvus de quarks. Le hadron le plus célèbre est le proton (renfermant 3 quarks) et on dénombre plusieurs centaines de hadrons, le lepton le plus célèbre est l'électron et on ne compte que 6 "vraies" particules leptons fondamentaux, associés à leur antiparticule, soit donc 12 également. Les quarks et les leptons sont donc en fait les "vraies" particules élémentaires puisque tous les hadrons sont une association de quarks et antiquarks. Cette similitude (appelée SUSY, super-symetry en anglais) – 12 "quarks" et 12 "leptons" – même si confortable à ce jour ne "suffit" pas tout à fait, le boson responsable de la masse reste à découvrir et les grandes questions quant à certains comportements de la matière sont toujours à l'ordre du jour.

### L'électron-volt : symbole eV

**1 TeV =  $10^{12}$  eV.** L'électron-volt est défini comme étant l'unité d'énergie d'un électron accéléré depuis le repos par une différence de potentiel de 1 volt. Un électron-volt est égal à environ  $1,602\,176\,53 \times 10^{-19}$  joule. Aussi utilisé en physique relativiste pour donner la masse des particules. Le proton "pèse" environ 2 GeV. Le "boson" de Higgs serait de l'ordre de 130 à 150 GeV.

**Rappel :** le "poids" de l'électron est égal à  $9,11 \times 10^{-31}$  kg soit donc pas de grands dangers à 14 TeV ...

#### Vocabulaire :

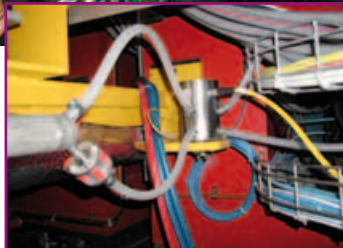
**Boson :** provient du nom du physicien Satyendranath Bose et introduit en physique relativiste par Paul Dirac

**Quark :** provient d'une phrase du roman *Finnegans Wake* de James Joyce et introduit en physique des particules par Gell-Mann qui en a formulé le premier la théorie avant les découvertes et confirmation expérimentales.

étant estimées à 100  $\mu$ m en écart-type et c'est l'axe moyen calculé qui est retenu pour le positionnement du TK dans le référentiel général de la machine, à 0.5 mm en écart-type . Grâce à des préparations méticuleuses et des conditions de laboratoire, les métrologies individuelles ont été réalisées à des incertitudes de 20  $\mu$ m en écart-type : ces opérations ayant eu lieu à différents endroits non équipés de machines à coordonnées, la photogrammétrie s'est révélée le seul moyen sans contact adapté



**Figure 20.** Capteur HLS YB0, liaison vers le réseau principal – capteur HLS dans un pied du YB0 et liaisons vers les 2 autres capteurs des pieds.



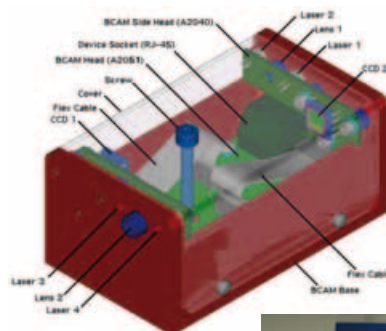
vu la fragilité de certains éléments, leurs forme, dimension et configuration – voir figures 18 et 19.

La métrologie de positionnement des détecteurs a été complétée par des systèmes extérieurs spécifiques de surveillance, insensibles au champ magnétique principal, cause de déformations possibles et le groupe a la supervision et la maintenance des instrumentations correspondantes.

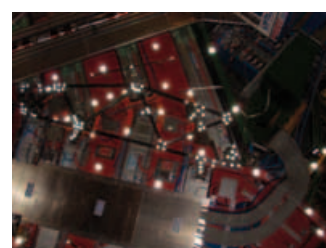
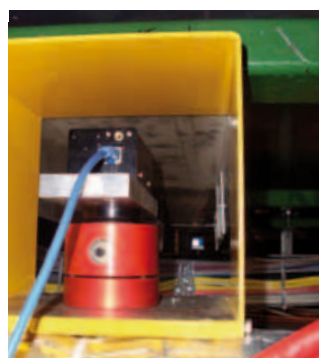
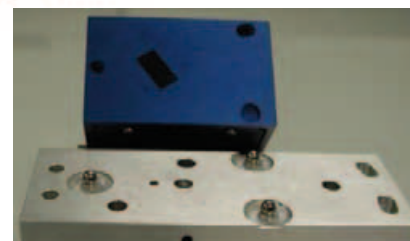
Le suivi vertical est un ensemble de 4 capteurs capacitifs bien connus HLS (*Hydrostatic Leveling System*) disposés dans la roue YB0 qui contient les détecteurs centraux TK et les MABs de référence, le suivi radial est assuré par 3 lignes disposées le long des YBs et YE une fois fermées et inspectées à partir de caméras BCAM (*Brandeis Camera Angle Monitor*).

Le système HLS (résolution donnée à 1  $\mu\text{m}$ ) comprend 1 capteur sur une face du YB0, relié directement au réseau principal, machine liant les 2 derniers éléments magnétiques de l'accélérateur situés à 45 m de part et d'autre et fixant le plan de référence, l'altitude du YB0 et son contenu étant ainsi directement surveillés suivant une incertitude de 10  $\mu\text{m}$  en écart-type. Il comprend aussi 3 capteurs installés dans les pieds du YB0 reliés entre eux et disposés tels que les inclinaisons longitudinale et radiale puissent être suivies avec une incertitude de quelques  $\mu\text{mrad}$ s – voir figure 20.

Le système BCAM, moins connu, est basé sur l'utilisation simultanée de 2 caméras se visant réciproquement, chacune comportant 2 ou 4 diodes flash (BCAM double) perçues par leur optique à focale courte et capteur vidéo respectifs. Les distances entre les spots sont corrélées à tout déplacement et rotation relatifs avec une incertitude interne de 5  $\mu\text{mrad}$ . Chaque caméra est centrée sur un support isostatique point-trait-plan, équipé pour des cibles rétro-réfléchissantes et la photogrammétrie a permis de valider dans une incertitude globale radiale et hauteur de 30  $\mu\text{m}$  en écart-type, incluant l'optique et la mécanique du système complet, les calibrations BCAM-BCAM et BCAM-coin de cube, celui-ci réfléchissant les spots émergents. La photogrammétrie a aussi permis de rat-



**Figure 21.** Schéma d'une BCAM, support et trous de référence.



**Figure 22.** Couloir avec BCAMs et fiducialisation dans le référentiel d'une roue YB.

tacher les ensembles supports-BCAMs-coins de cubes dans un référentiel objet donné. Les 3 couloirs, 2 latéraux et 1 supérieur, ont été aménagés sur 25 m de longueur pour recevoir plusieurs ensembles, le grand champ d'ouverture de 40 mrad permettant de disposer plusieurs caméras dans un même couloir, les fréquences des flashes pouvant être modulées, réalisant ainsi un contrôle optique permanent d'alignement multipoint. Des comparaisons lors des tests de fermeture des YBs et des YEs entre des données BCAM et survey traditionnel ont montré pour les 3 couloirs des différences radiales et hauteurs toutes inférieures à 0.3 mm – voir figures 21 et 22.

Enfin et en complément du traitement standard des mesures périodiques des déformations, les configurations, surabondances et robustesses se dégradant depuis la mesure 0, les insertions de détecteurs et fermetures rendant indisponibles nombre d'accès et de visibilité, une approche prospective est actuellement testée. Celle-ci est basée sur le filtre de Kalman en considérant l'objet comme un système cinématique avec vitesse et accélération et en tenant compte de la fiabilité d'origine. Elle permet d'analyser au mieux les résultats successifs malgré le manque de mesures, et aussi de prédire les futures positions et estimations d'erreurs.

## Conclusion et références

La mesure précise et contrôlée d'objets de grandes dimensions par photogrammétrie numérique est une activité de base bien maîtrisée par le groupe au CERN. En complément des techniques de scanning, faisant aussi partie de notre



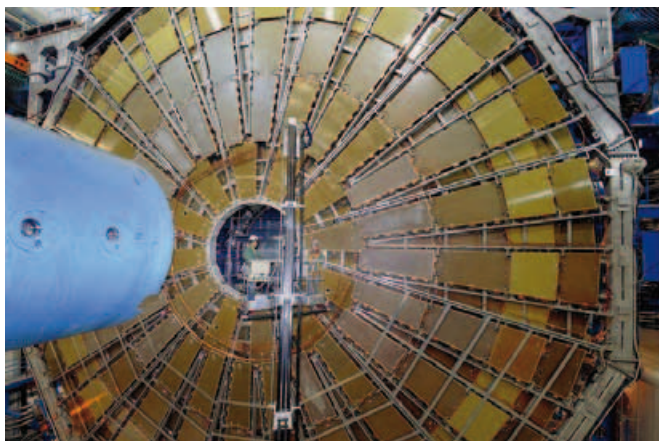


Figure 23. Roue muon Atlas - 25 m diamètre.

“boîte à outils”, la photogrammétrie telle qu’appliquée pour CMS, grâce à sa portabilité, sa rapidité d’exécution et d’analyse en rapport au grand nombre de points pouvant être traités en une même opération quasi “on-line” avec l’équipement D2X/WLAN et 3DSTUDIO-Aicon, et son adaptabilité au milieu en fait l’instrument idéal pour de nombreuses autres applications, soit en complément soit en substitution avantageuse des techniques théodolites et laser trackers.

Elle a été amplement utilisée à tous les stades des validations, contrôles et positionnements des supports et détecteurs des autres expériences LHC, chaque opération ayant ses propres spécificités. On estime ainsi à 40 000 le nombre total des prises de vues effectuées sur Atlas ce qui, vu les conditions d’accès et d’environnement, mérite aussi d’être qualifié de “grande première” – voir figure 23.

Certaines configurations d’utilisation ont pu être testées comme la synchronisation (production G.M.S) de prises de vues jusqu’à 5 caméras pour des mesures dynamiques à des fréquences compatibles – voir figure 24.

Les facilités de 3DSTUDIO de reconnaissance de contour n’ont pu être testées par manque de temps et d’application comme la modélisation rapide d’objets, particulièrement celle de l’enveloppe des détecteurs, la détermination de coordonnées ayant été privilégiée.

Le système mis en place, après validations et formations sur place, s’est aussi “déplacé” vers d’autres projets et lieux de la physique fondamentale ou appliquée (Expérience OPERA au Gran Sasso – Italie, projet Tokamak NCX Princeton – USA).



Figure 24. Synchronisation de 3 caméras DCS 620 (interface électronique G.M.S).

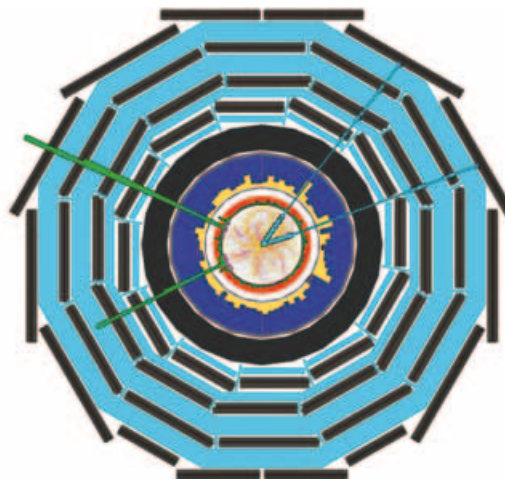


Figure 25. Simulation d’un événement caractéristique du boson de Higgs – émission de 2 électrons et 2 muons.

CMS va bientôt enregistrer les premières collisions proton-proton et “nos” coordonnées approchées de positionnement relatif des détecteurs, sont à la base des analyses et reconstructions plus précises et plus fines des trajectoires caractéristiques du boson de Higgs, chaînon manquant responsable de la masse, et vont donc contribuer à la découverte – voir figure 25.

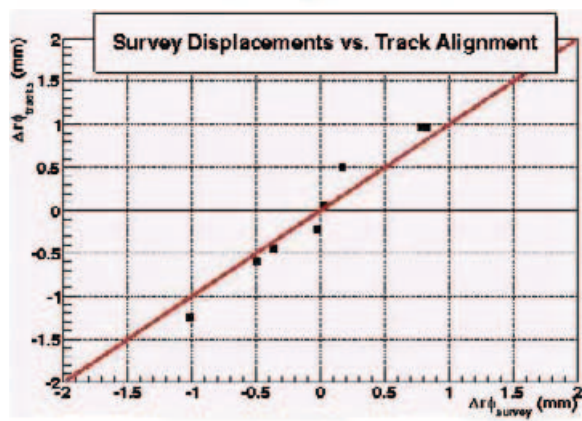
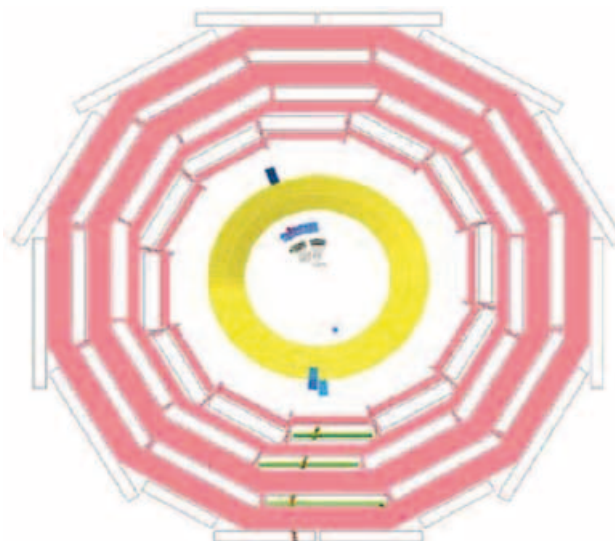


Figure 26. Rayons cosmiques dans les détecteurs muons et corrélation avec la géométrie.

► En fait, les physiciens analystes ont déjà testé les algorithmes de reconstruction en utilisant les traces des rayons cosmiques traversant les couches de détecteurs de l'expérience et en exploitant nos données de positionnement et celles vues par les systèmes internes. La corrélation "géométrie-alignement des traces" pour les chambres à muons barrel s'est révélée être à mieux que 50 µm en écart-type, belle preuve indépendante et irréfutable de la qualité de la métrologie d'ensemble – voir figure 26. Enfin, le sujet a fait l'objet de nombreux travaux de fin d'année d'études d'écoles et universités, la liste complète à ce jour suit, et de présentations à divers séminaires internationaux dont il est donné quelques titres. ●

## Contacts

**Jean-Frederic FUCHS** (CERN-CMS)  
jean-frederic.fuchs@edf.fr

**Raphaël GOUDARD** (CERN-CMS)  
Raphael.Goudard@cern.ch

**Christian LASSEUR** (CERN-TS-SU)  
Christian.Lasseur@cern.ch

**Jean-David MAILLEFAUD** (CERN-PH)  
Jean-David.Maillefaud@cern.ch

**Aurélien MAURISSET** (CERN-CMS)  
Aurelie.Maurisset@cern.ch

## Références

**Clarisse WANTZ** (ENSAIS) - Octobre 1998  
*Analyse des performances du logiciel de photogrammétrie numérique RolleiMetric/CDW et son application aux installations du CERN*

**Katja NUMMIARO** (Helsinki University of Technology) - December 1998 - *Master's thesis: Geometrical Validation of the CMS Magnet by Close-range Photogrammetry*

**Jean-Frédéric FUCHS** (ENSAIS) - Juin 1999 - *Mesure des objets industriels de grandes dimensions par photogrammétrie numérique. Performances et analyse du système caméra DCS 460 - logiciel Rollei/CDW*

**Marc DAEFFLER** (ENSAIS) - Octobre 2001  
*Etude de stabilité des caméras Kodak DCS-460 et DCS-660 utilisées au CERN en métrologie de positionnement des détecteurs*

**Sandrine THIRIET** (ESGT) - Juillet 2001  
*Etudes des performances d'un système de photogrammétrie digitale - Application à la construction d'un grand détecteur de particules CMS*

**Henning KVAERNO** (Norwegian University of Science and Technology) - 2004 - *Master thesis: Evaluation of digital compact cameras for use in close-range photogrammetry*

**Solveig FISKAA** (Norwegian University of Science and Technology) - 2008 - *Evaluation of non-retro-reflective targets in digital close-range photogrammetry*

**Angelika LIPPITSCH** (PhD Thesis - Engineering Geodesy - TU Graz) - 2006 - *A Deformation Analysis Method for the Metrological Atlas Cavern Network at CERN Kinematic and Adaptive Adjustment Techniques.*

**Aurélien MAURISSET** (ESGT) - 2007 - *Système électro-optique de mesures métrologiques des grandes structures. Etude des performances et des applications de la caméra digitale BCAM*

**Friedrich LACKNER** (PhD Thesis- TU Vienne) - 2007  
*Design and High Precision Monitoring of Detector Structures at CERN*

## Autres références

**Antje BEHRENS** (IWAA - CERN Genève) - 2004 - *New Developments in Close Range Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors*

**Antje BEHRENS** (Large Volume Metrology Conference - Liverpool) - 2007 - *Three Dimensional Metrology Techniques Applied to Large Particle Accelerators and Detectors at CERN*

**Dirk MERGELKUH** (DGPF - Jahrestagung Konstanz) - 2001  
*Der Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie beim Aufbau des CMS-Detektors am CERN*

**Christian LASSEUR** (CMSC Dearborn et FIG Paris) - 2000 et 2003  
*Digital Photogrammetry Applied to Large Physics Detectors*

## Remerciements

Les auteurs associent tous leurs plus proches collègues, personnel permanent CERN, boursiers et "project associates" à cette belle aventure professionnelle qui n'aurait pas pu être rapportée ici sans leur contribution. Enfin, ils ne peuvent clore sans adresser leurs remerciements aux chefs de projet et ingénieurs CMS qui ont très vite compris l'intérêt de la photogrammétrie et qui leur ont fait confiance en leur attribuant des moyens exceptionnels en personnel et matériel.

Ils se doivent d'en citer quelques-uns : A. Hervé, H. Gerwig, G. Faber, D. Campi, M. Lebeau, A. Ball, P. Petiot, L. Veillet, M. Alidra, T. Rodrigo, G. Bencze., A. Garonna, J. Bos, J.P. Girod, sans oublier les autres.

## ABSTRACT

**Key words:** metrology, digital photogrammetry, large scale metrology

*CERN, near Geneva, is one of the world's largest and most respected centers for scientific research. Its business is fundamental physics, finding out what the Universe is made of and how it works. The world's largest and most complex scientific instruments are used to study the basic constituents of matter — the fundamental particles. By studying what happens when these particles collide, physicists learn about the laws of Nature. The LHC is the current great project which, with an accelerator proton-proton of 27 km of circumference, comprises 4 great experiments. One among them, CMS, is a general-purpose detector to explore a large range of fields of physics. The Group "SU", Large Scale Metrology, is responsible for the precise positioning of the elements of the accelerators and of the detectors and the maintenance of alignments according to the needs functions, also including the metrology of quality control of any component before its installation when the traditional workshop methods are inadequate.*

*The article presents the implementations and the results obtained of the techniques of industrial geodesy and photogrammetry applied to the metrology of positioning of the constituent elements of the experiment CMS.*