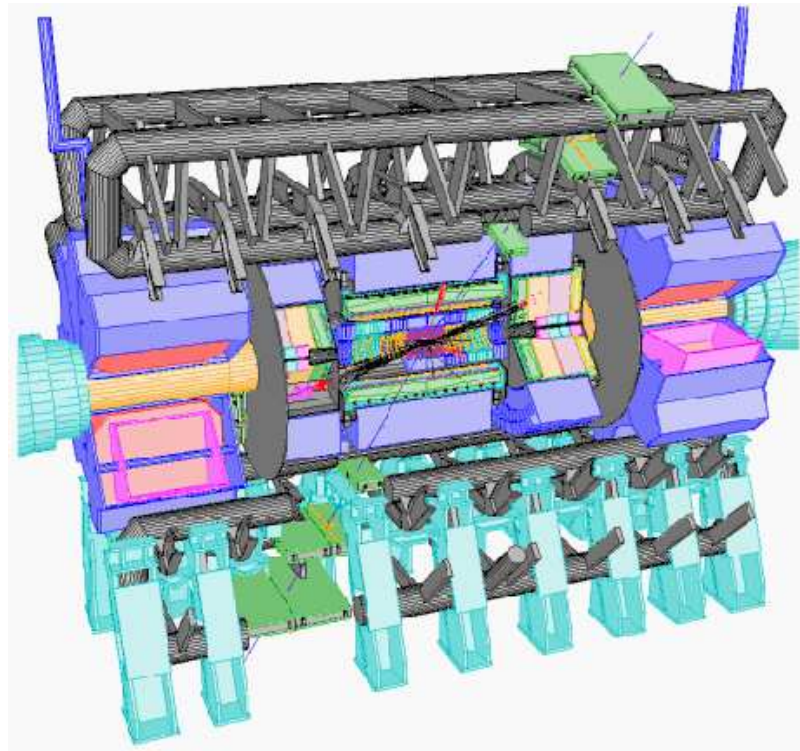


Serrano Justine
Fiasson Armand

Projet de détection

Alignement des chambres à muons de l'expérience ATLAS

CEA DSM-DAPNIA
Service de Physique des Particules
Correspondant : Philippe Schune



Master 2 de Physique Fondamentale et Appliquée
Spécialité Noyaux, Particules, Astroparticules et Cosmologie

1 Introduction

Afin d'étudier la physique des particules dans le cadre du modèle standard et au-delà, un collisionneur proton-proton, le LHC, est en construction au CERN. Il pourra atteindre une énergie dans le centre de masse de 14 TeV. Les particules produites lors des collisions seront analysées par des détecteurs, dont ATLAS (A Toroïdal Lhc AparatuS), placés en différents points du LHC.

De nombreux phénomènes seront recherchés dans ATLAS, et principalement :

1. Le boson de Higgs, seule particule prédite du modèle standard à ne pas avoir encore été observée.
2. La supersymétrie, avec la particule supersymétrique la plus légère, le neutralino, dont on ne peut signer la présence que par l'observation d'énergie manquante.
3. Des mesures de précision sur les paramètres du modèle standard (masse du W et du top,...)

Ces enjeux physiques très importants se traduisent par un ensemble de contraintes techniques : la fréquence de croisement des paquets de protons (toutes les 25 ns) va engendrer une quantité énormes d'évènements. Le détecteurs devra donc posséder une granularité élevée pour pouvoir les reconstruire avec précision. Le flux important de particules va aussi généré des radiations et la présence d'un gaz de neutrons et de photons auquel le détecteur devra résister, d'où la nécessité d'un blindage. De plus, la mesure de l'énergie manquante nécessite une bonne herméticité, les particules doivent être détectées quelles que soient leurs directions.

ATLAS est composé de quatre sous détecteurs cylindriques placés autour du point de collision : un trajectographe interne, des calorimètres électromagnétique et hadronique, et un spectromètre à muons. Nous allons voir plus en détail le fonctionnement de celui-ci.

2 Le spectromètre à muons

2.1 Structure du détecteur

Les muons interagissent peu avec la matière et traversent les détecteurs internes en perdant très peu d'énergie. Le spectromètre à muons constitue donc la dernière couche du détecteur ATLAS, il mesure 46m de long et 22m de diamètre. Il doit identifier et mesurer les impulsions des muons et permettre de reconstruire les traces. Son fonctionnement est totalement indépendant des autres sous-détecteurs.

La mesure de l'impulsion des muons est basée sur la déflexion de leurs trajectoires sous l'effet d'un champ magnétique. Les particules produites lors des collisions sont très énergétiques (jusqu'à 1 TeV) donc le champ doit être intense pour pouvoir courber les trajectoires, c'est pourquoi on utilise des aimants supraconducteurs. Contrairement à son expérience concurrente CMS, ATLAS a choisi de mesurer cette courbure dans l'air et pas dans un matériau dense comme le fer. On pourrait pourtant penser que ce dernier choix est plus facile à réaliser car les muons perdent plus d'énergie dans le fer donc la courbure est plus grande et on peut utiliser un champ moins fort. Cependant, dans un matériau dense les particules subissent des diffusions multiples, on rencontre alors des difficultés lors de la reconstruction des traces.

Pour évaluer la courbure de la trajectoire, on place trois détecteurs successifs sur le trajet des muons et on mesure la flèche, c'est à dire la distance d entre le point d'impact dans le détecteur intermédiaire et le point correspondant à une trajectoire rectiligne (Figure 1). Afin

d'avoir un champ magnétique quasiment partout orthogonal à la trajectoire, le spectromètre est constitué de deux grandes parties (Figure 2) :

1. Une région centrale, le barrel, où le champ est fourni par 8 bobines toroïdales et où les chambres à muons sont disposées en 3 couches cylindriques autour de l'axe du faisceau, à des rayons approximatifs de 5, 7.5 et 10m.
2. Les deux extrémités où le champ provient de 16 bobines (2×8) plus petites et où les chambres sont verticales.

Cette disposition des chambres fait aussi face à la contrainte d'être la plus complète possible. La figure 3 illustre ce fait. L'efficacité du détecteur est optimale sauf à 90° par rapport à l'axe des faisceau (passage des cables) et pour l'angle correspondant à la jointure entre le barrel et les extrémités.

2.2 Les chambres à muons

Le type de chambre varie suivant leurs places dans le spectromètre mais la majorité d'entre elles sont des chambres à dérive, les MDTs (Monitored Drift Chambers). Elles se composent de six ou huit couches de tubes à dérive réparties dans deux plaques rectangulaires espacées de 30cm, ce qui permet à une chambre de mesurer l'impact et la direction de la particule (Figure 4). La géométrie du spectromètre est complexe car tous les câbles d'alimentation, de l'électronique de lecture, ainsi que le système cryogénique nécessaire aux détecteurs internes doivent le traverser. De plus, les pieds qui supportent les 7000t d'ATLAS doivent être insérés à l'intérieur de celui-ci. Les chambres à muons sont donc disposées de façon à ne pas laisser de " trous " sur le parcours des muons tout en tenant compte de ces contraintes, c'est pourquoi elles n'ont pas toutes la même taille (leur surface va de 2 à 10 m²). Les tubes sont en aluminium, leur diamètre est de 30mm et ils contiennent un fil conducteur en tungstène, à une haute tension, et un mélange gazeux. Lors du passage d'une particule chargée, le gaz est ionisé et les électrons sont collectés sur le fil central. Connaissant la vitesse de dérive des électrons et le temps de référence de passage du muon, on en déduit la distance du point d'impact de la trace au fil. Le temps de référence est mesuré par un autre type de chambre, les RPC (Resistive Plate Chambers), moins précises sur la position mais dont la réponse temporelle est beaucoup plus rapide que celle des MDTs (quelques nanosecondes contre une dérive allant jusqu'à 600ns pour les MDTs). Elle est notamment inférieure à l'intervalle temporel entre deux collisions de manière à déterminer de quel croisement le muon détecté provient. Il y a trois RPCs pour une tour projective de trois chambres à dérive : elles sont situées de part et d'autre de la chambre intermédiaire et après la dernière chambre. Cette configuration leur permet de jouer le rôle de seuil sur les impulsions en regardant de façon grossière la flèche de la trajectoire afin de limiter le bruit de fond. Grâce aux informations fournies par les RPCs et les MDTs, on peut connaître précisément le point de passage du muon.

2.3 Nécessité de l'alignement

La résolution sur l'impulsion transverse que l'on veut atteindre est $\frac{\sigma_{Pt}}{Pt} < 10^{-4}$ Pt/GeV pour Pt > 300GeV. Pour des impulsions plus faibles, la résolution est limitée à quelques pourcents à cause de la diffusion multiple sur les aimants et les structures mécaniques des chambres. Ceci se traduit par une précision sur de flèche de l'ordre de 60 μ m, et cette précision est d'autant plus nécessaire qu'à cause du bruit de fond très important dans le spectromètre (du à des particules produites dans des réactions secondaires dans les calorimètres ou le blindage) on peut très facilement reconstruire des traces fantômes. Pour atteindre cette

précision sur les mesures, il faut donc connaître la position de chacune des 1200 chambres dans l'espace avec la même précision. Comme il est impossible de stabiliser les dimensions et positions des chambres sur la globalité du détecteur, car celles-ci se déforment avec le poids et la température, il faut mettre en place un système de mesure de l'alignement des chambres permettant de connaître l'évolution dans le temps de leurs formes et de leurs positions.

3 Le système d'alignement

Il y a deux moyens pour aligner les chambres : le premier utilise des traces de muons produits lors d'évènements connus comme la désintégration du Z. Cette méthode nécessite une bonne connaissance et une bonne compréhension du détecteur. Elle ne sera donc pas facile dans un premier temps. Le second moyen est un ensemble de systèmes optiques qui mesurent les positions des chambres. Nous allons nous intéresser à celui-ci en détaillant dans tout d'abord à la phase de recherche et développement des systèmes optiques, puis nous verrons comment ils sont utilisés pour aligner l'ensemble des chambres.

3.1 Recherche et développement

Plusieurs techniques de détection ont été développées dans le cadre de la R&D sur l'alignement du spectromètre à muon d'ATLAS. Nous allons détailler les deux techniques retenues et les trois alternatives abandonnées.

3.1.1 Le système RASNIK

Le dispositif RASNIK (Red Alignment System from Nikhef) est utilisé pour trois des niveaux de mesures sauf sur le système de référence (voir partie 3.1.3). Il est composé d'une source lumineuse suivie d'un masque codé, d'une lentille et d'une caméra CMOS (Figures 5 et 6). La source est située sur un circuit RasLed composé de 9 LED à 880nm. Leur cône d'émission étant trop petit, on rajoute un verre opalin. La source éclaire ainsi le masque codé dont l'image est focalisée sur la caméra par la lentille. Plusieurs types de lentilles sont utilisés : leurs distances focales variant de quelques mm et plus de un mètre. La caméra est au centre d'un circuit d'acquisition RasCam. Le montage optique est un montage proche d'un montage 4f (grandissement 1) pour les alignements de type in-plane (contrôlant la déformation interne des chambres) et l'axial (contrôlant le positionnement des chambres dans un même plan). Un montage allant de 1/1.5 jusqu'à un grandissement 1/7 a été élaboré pour l'alignement dit praxial (contrôlant le positionnement proche de deux chambres voisines). Le grandissement est ici défini comme étant le rapport de la distance masque-lentille sur la distance caméra-lentille. Dans le cas de grandissement 1/7, le pas du masque codé est de 600 μm alors qu'il est de 120 microns ou 170 microns pour les grossissements plus petit. Nous verrons par la suite comment sont disposées les trois parties du montage pour les différents systèmes.

La précision de la mesure des déplacements par ce système est d'environ $2\mu\text{m}$ pour les déplacements transverses par rapport à l'axe optique. La rotation de l'image est quand à elle mesurée avec une précision de $150\mu\text{rad}$ et le grandissement à un facteur variant de 3.10^{-4} à 3.10^{-5} environ. Dans le système d'alignement de proximité dit praxial, deux RASNIK croisés sont utilisés. Ce montage permet donc d'obtenir 8 paramètres de positionnement. On est alors en mesure de retrouver les variations des six degrés de libertés physiques et donc de déterminer la position relative d'une chambre par rapport à sa voisine.

Pour le système de référence, on utilise le dispositif SACAM, qui suit le même principe. Une source lumineuse est constituée de quatre spots formant un carré dont un des coins est légèrement décalé. L'image de la source est focalisée sur une caméra CMOS par une lentille

de courte focale ($<70\text{mm}$). La précision obtenue sur l'objet est inférieure à $50\text{-}100\ \mu\text{m}$ pour les translations transverse, $100\ \mu\text{rad}$ pour les rotations et équivalente à un mm pour les dilatations.

3.1.2 Autres alternatives

Trois autres technologies ont été élaborées pour réaliser le système d'alignement. Deux ont été mises au point par le CEA à Saclay, le système STAMP et SATRAPs et un à l'institut MPI de Munich, l'ALMY. Les trois dispositifs ont pour particularité de permettre l'alignement de plusieurs objets sur un même faisceau laser, ce qui n'est pas le cas pour le système RASNIK. Cependant pour des raisons de coût et de performance, c'est le système RASNIK qui a été choisi par la collaboration.

Le montage STAMP (Figure 7) consiste en un support sur lequel sont montées deux lames de verre traitées renvoyant environ 1% du faisceau vers deux écrans et deux caméras CCD. Les deux écrans étant à deux distances différentes des lamelles de verre, les mouvements du support se traduisent par des déplacements différents des images sur le plan des caméras. La précision obtenue par ce dispositif est de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$. Il a pour avantage de réduire le nombre de faisceaux mais a un inconvénient : il ne permet pas la mesure de translation ou de rotation du support dans la direction du faisceau.

Le montage SATRAPs utilise des lames de verres dopés au néodyme. Le verre dopé, au passage du faisceau laser, émet une lumière isotrope de fluorescence à $1064\ \text{nm}$. En disposant sur le pourtour de la lame de verre 4 photodiodes sur chaque côté, on peut retrouver la position du faisceau sur la lame par la répartition de lumière sur l'ensemble des photodiodes. En utilisant des ajustements à partir des courbes d'étalonnage, ce système permettrait une précision de l'ordre de $10\text{-}20\ \mu\text{m}$ sur la position du centroïde du faisceau laser. Il a comme précédemment pour avantage de limiter le nombre de sources lumineuses. Il a cependant un inconvénient : au fur et à mesure que la distance au laser s'éloigne, un halot lumineux entoure le spot laser et perturbe la mesure (au delà de quelques mètres).

Enfin le montage mis au point par l'institut MPI de Munich, ALMY, utilise des lames de verres dont la surface est couverte d'un réseau de 64×64 strips de silicium croisés. Le faisceau laser induit à son passage un courant dans les strips et permet de mesurer sa position sur la lame. La résolution obtenue est dans ce cas aussi de l'ordre de quelques μm . Un problème de vieillissement se posait avec ce montage : les lasers fonctionnant en continu, les strips de silicium finissaient par perdrent en efficacité.

3.1.3 Description du dispositif d'alignement

Le dispositif d'alignement retenu est composé de quatre systèmes différents.

INPLANE

Le premier système dit Inplane est le système contrôlant la déformation d'une chambre à muon : flexion, torsion, élongation, forme en banane. Dans chaque chambre sont installées quatre lignes RASNIK, entre les deux couches de tubes. Quatre masques codés sont disposés sur la largeur de la chambre et font face à deux caméras placées dans les coins opposés. Les quatre lentilles sont disposées au centre de la chambre (Figure 8). Ce système permet d'obtenir 16 paramètres que l'on traduit en 9 paramètres de déformations de la chambre. La précision obtenue est de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$ pour la déformation de la chambre.

PRAXIAL-AXIAL

Le deuxième système est dit praxial-axial. Il permet de mesurer la position d'une chambre par rapport à ses voisines sur un même plan. Ce système est composé de deux parties implantées sur un même support. Une partie dite de proximité (praxial) est utilisée pour mesurer

la position d'une chambre par rapport à sa voisine immédiate. Deux RASNIK sont montés avec un angle allant de 25 à 7 degrés. La figure 9 montre le montage de ce système qui est composé de deux platines chacune étant installée sur deux chambres adjacentes. La seconde partie de ce capteur permet de mesurer les déplacements des chambres par rapport aux autres dans une même couche. Le masque codé est situé sur un coin d'une chambre, la lentille sur le coin opposé sur cette même chambre et la caméra sur le coin opposé de la chambre adjacente (voir figure 10). Ces trois éléments sont fixés sur les boîtiers servant aux éléments du système précédent. L'ensemble du système praxial-axial permet de mesurer la position d'un plan avec une précision de $30\mu\text{m}$ environ pour les translations entre chambres et $200\mu\text{rad}$ pour les rotations. L'ensemble du détecteur comptera 2300 modules RASNIK pour le système praxial-axial.

PROJECTIF

Le troisième système d'alignement est le système dit projectif. Il intervient dans la mesure des positions des plans les uns par rapport aux autres. C'est le point essentiel du dispositif d'alignement. Le système RASNIK est ici aussi employé. Le système praxial-axial précédemment décrit a pour but de limiter le nombre de systèmes projectifs car ces derniers sont plus difficiles à positionner dans le détecteur. Le circuit RasLed est posé sur un support lui-même fixé sur la chambre du plan le plus intérieur. La lentille est fixée sur un support collé sur la chambre correspondant au plan milieu et le circuit RasCam sur un support de la chambre du plan extérieur (Figure 11). Le montage est présent des deux côtés des chambres. Les lignes RASNIK sont disposées toutes les deux.

REFERENCE

Enfin le système dit de référence a pour but d'évaluer la position angulaire des différents plans de chambres les uns par rapport aux autres. Le montage utilisé est le montage SACAM. Les sources lumineuses sont placées sur des plaques en aluminium fixées sur le support des bobines toroïdales. Elles pointent vers des caméras disposées sur les chambres à l'aide d'extension en aluminium (Figures 12 et 13). L'intérêt de ce dispositif est de mesurer très précisément les translations du motif de la source sur le plan de la caméra pour obtenir la rotation des plans de chambres. Une partie de ce système consiste aussi en une connexion optique entre les chambres.

3.2 Développement

3.2.1 Calibration des détecteurs

La calibration du système d'alignement s'effectue en deux temps. Une première étape consiste en la calibration précise des détecteurs. Cette étape est réalisée à Saclay et à l'institut Nikhef à Amsterdam. A Saclay, un hall a spécialement été conçu pour cette opération. Une climatisation assure une température constante de 20 degrés pour éviter toute fluctuation thermique.

Le système d'étalonnage du praxial est composé de deux bancs. Un premier sert à déterminer une position de référence mécanique. Un autre calibre la position des capteurs optiques par rapport aux billes de positionnement. Pour cela une des deux platines constituant le praxial effectue 64 mouvements dans une gamme de mouvements de $\pm 3\text{mm}$ et $\pm 3\text{mrad}$ par rapport à sa voisine (Figure 14). Un ensemble de 6 palpeurs permet de mesurer précisément le mouvement appliqué ($\pm 3\mu\text{m}$ et $\pm 30\mu\text{rad}$). A partir des 8 paramètres fournis par le système RASNIK pour les 64 mouvements effectués, un programme élabore la matrice de transfert permettant de retrouver tous les degrés de liberté physiques du capteur. Une série de 34 mouvements aléatoires permet le contrôle de l'étalonnage. Cette séquence dure en moyenne 40 à 45 minutes par capteur.

Saclay a aussi la responsabilité de la calibration des systèmes axial et de référence. Dans ce cas des cubes parfaits (à $10\mu\text{m}$ près) et des supports connus avec la même précision sont utilisés. Les trois éléments du système RASNIK sont successivement placés à l'intérieur des supports. Deux cubes déjà calibrés servent de référence lors de cette calibration. On calibre donc l'axial avec une seule mesure. Plus de 2500 modules RASNIK ont été assemblés, tous ceux constituant le système de proximité ont été calibrés et à ce jour 200 ont été expédiés au CERN.

Pour ce qui est du système projectif, les éléments sont supportés par des pattes d'extensions dont les mesures ont été réalisées à l'aide d'un capteur mécanique tridimensionnel. Les boîtiers optiques de ce système sont calibrés par l'institut Nikhef à Amsterdam.

Dans le cadre du système INPLANE, les détecteurs sont calibrés au moment de la construction de la chambre à muon. Celle-ci est effectuée sur un marbre sur lequel on dépose et aligne une couche de tube. On colle alors la couche de tube au support en le déposant dessus. La même opération est alors effectuée de l'autre côté et ainsi de suite. Une fois les six (ou huit) couches de tubes collés, la chambre est posée sur le marbre et on étalonne alors les détecteurs à partir de cette position de référence sans déformation de la chambre.

L'ensemble des informations obtenues lors de la calibration individuelle des détecteurs est réuni dans une base de données qui sera transmise au CERN une fois les étalonnages effectués.

3.2.2 Calibration des chambres et des systèmes de fixation

L'ensemble des systèmes est collé sur les chambres à muon (Figure 15). Il s'agit de connaître avec précision leurs positions sur les chambres par rapport aux fils qui détectent les muons. 10% des chambres passent à leur arrivée au CERN par un tomographe optique 2D. Cet appareil permet grâce à deux canons à rayons X, de mettre en évidence les fils de tungstène contenu dans chacun des tubes de la chambre (absorption plus importante). Saclay a pour sa part fourni des outils permettant de mesurer la position des plates-formes supportant les détecteurs optiques de la chambre par rapport au fil de la chambre. Pour cela des fils de tungstène ont été collés sur un support à billes l'ensemble étant mesurés sur un microscope optique. Chaque chambre passant au tomographe est ainsi équipée de ces outils pour mesurer les plates-formes servant à l'alignement.

3.2.3 Problème rencontré

Une des difficultés rencontrées lors de l'étalonnage a résidé dans la qualité des lentilles. La contrainte portant sur la longueur focale des lentilles était de $\pm 3\text{mm}$. Cette contrainte a difficilement pu être respectée par le constructeur et a induit du retard dans la chaîne de calibration. Le montage optique principalement employé étant un montage $4f$ proche d'un grossissement 1, le capteur n'est pas suffisamment long pour permettre un déplacement suffisant pour corriger les défauts de focale de la lentille. Dans certain cas, la lentille doit être déplacée du centre du capteur pour être fixée à son extrémité. De ce fait, le temps consacré à la caractérisation des lentilles permet un rendement de 10-15 lentilles par jour. Un récapitulatif approximatif du prix des différents éléments du système d'alignement et de calibration se trouve en annexe dans le tableau 1.

3.3 Intégration

3.3.1 Utilisation des données fournies par les détecteurs

Un autre objectif majeur pour le groupe de Saclay est la création de soft capable de traduire les paramètres de déplacements obtenus par l'ensemble des 6000 capteurs optiques en informations utilisables par les programmes de reconstruction de trajectoires des muons. Ceci devant permettre au final de faire des analyses de physique précises. Le programme d'alignement développé à Saclay est intitulé ASAP pour Atlas Spectrometer Alignment Program. Ce programme fait la synthèse de trois bases de données. La première source de données est la mesure des positions des différentes chambres et des détecteurs associés par les géomètres lors de l'installation et par les mesures des géométries des différents objets lors de leur étalonnage. La seconde base de données est celle constituée lors de la calibration des détecteurs. La troisième source de données est l'acquisition des mesures des capteurs. Cette opération aura lieu toutes les 20 minutes en cours de fonctionnement.

Le code est élaboré en C++ et consiste en un fit sur la position des chambres par rapport aux données fournies par les capteurs. La finalité de ce programme est de fournir en sortie le déplacement relatif des chambres pour que les reconstitueurs obtiennent facilement la flèche de la trajectoire des muons. Les physiciens ont mis au point une version réduite du programme destiné à la simulation d'un faisceau test au CERN nommé H8, composé de 6 chambres à muon. Ils travaillent à l'heure actuelle à la généralisation de ce programme pour les 650 chambres d'ATLAS de la partie barrel.

3.3.2 Test du système d'alignement

Test sur faisceau H8

Afin de tester les différents détecteurs d'ATLAS et notamment le système d'alignement dans les conditions de fonctionnement réelles, un test sur faisceau a été réalisé au CERN de juillet à novembre 2004 : c'est l'expérience H8. Un échantillon de chaque couche de détecteur, représentant 1% de l'expérience finale, a été installé et soumis au faisceau de proton du SPS. Six chambres MDTs (deux sur chaque couche) ont été installées avec leurs systèmes d'alignement, soit un total de 66 lignes optiques (6 axial, 6 praxial -soit 12 capteurs-, 16 référence, 24 In-plane et 8 projectifs). Deux séries de tests ont été effectués : les premiers visaient simplement à vérifier la concordance des données des différents capteurs, car un tel système possède une certaine redondance. Pour la deuxième série de tests les chambres étaient déplacées et on cherchait à trouver ces déplacements avec les informations fournies par le système d'alignement et le programme ASAP. Les résultats des tests, qui sont toujours en cours d'analyse, ont permis de montrer que pour les mesures relatives (déplacements des chambres par rapport à une position de référence) l'objectif d'une précision de $30 \mu\text{m}$ a été atteint et même dépassé. Pour le positionnement absolu, la précision est pour l'instant de l'ordre de la centaine de micromètres. Ceci signifie que tous les paramètres de calibration, de mesure des pièces mécaniques qui se trouvent dans la base de données ne sont pas encore complètement maîtrisés. La solution envisagée est d'utiliser des traces de muons pour fournir une autre mesure dans les parties du détecteur présentant des problèmes sur le positionnement absolu, mais cela implique une bonne connaissance des chambres à muons et une statistique élevée.

Test lors de l'installation des chambres dans la caverne ATLAS

Au fur et à mesure que les chambres sont installées dans la caverne d'ATLAS, le système d'alignement va être testé. On pense utiliser les muons cosmiques pour vérifier l'alignement.

4 Conclusion

Nous avons étudié le système d'alignement du spectromètre à muons d'ATLAS, essentiel pour la reconstruction des traces et donc essentiel pour les analyses de physique.

Il est important de se rendre compte de la difficulté d'un tel projet car tout doit être mesuré, calibré avec une précision de l'ordre de $30 \mu\text{m}$ depuis les systèmes optiques, en passant par les pièces mécaniques qui les relient aux chambres, jusqu'à la position des systèmes une fois collés sur les chambres. Ceci représente une base de données gigantesque qui devra être lue par le programme d'alignement ASAP pour reconstruire les positions des détecteurs grâce aux mesures des systèmes optiques. Le travail du groupe aujourd'hui consiste en l'exploitation des résultats du test H8 afin de s'assurer des performances du détecteur et aussi à l'installation des milliers de capteurs optiques composant l'alignement. Deux bobines toroïdales ont été installées dans la caverne ainsi qu'une vingtaine de chambres à muons. Le démarrage du LHC est prévu pour 2007 et d'ici là, la phase d'installation servira à valider le bon fonctionnement de l'ensemble.

Appendice

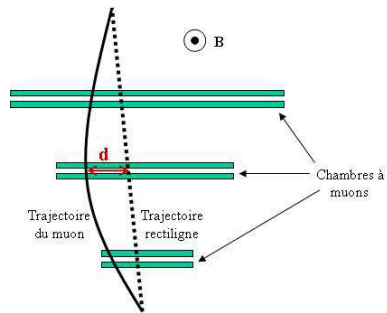


FIG. 1 – Principe de la mesure de la flèche des muons dans ATLAS

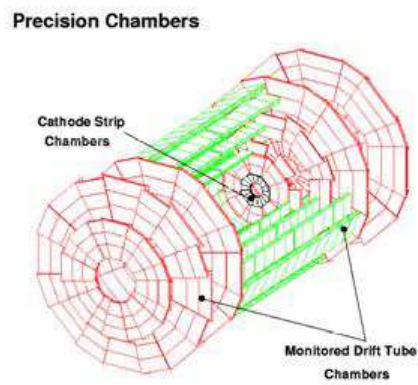


FIG. 2 – Géométrie du spectromètre à muon

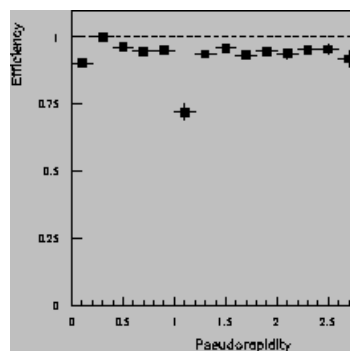


FIG. 3 – Efficacité en fonction de la rapidité de la particule (variable dépendante de l'angle d'émission de la particule par rapport à celui du faisceau)

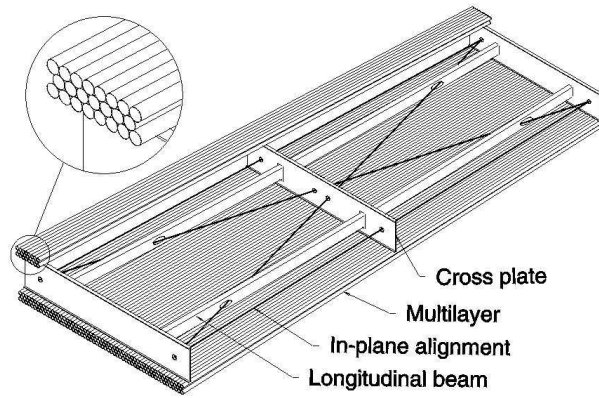


FIG. 4 – Schéma d'une chambre à dérive MDT

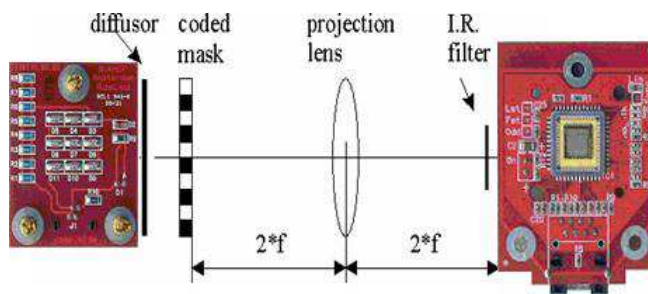


FIG. 5 – Schéma du système RASNIK



FIG. 6 – Masque codé

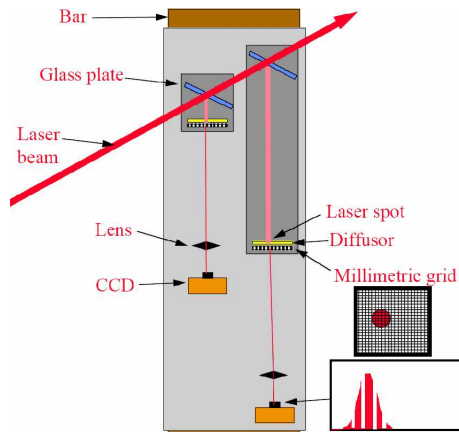


FIG. 7 – Système STAMP

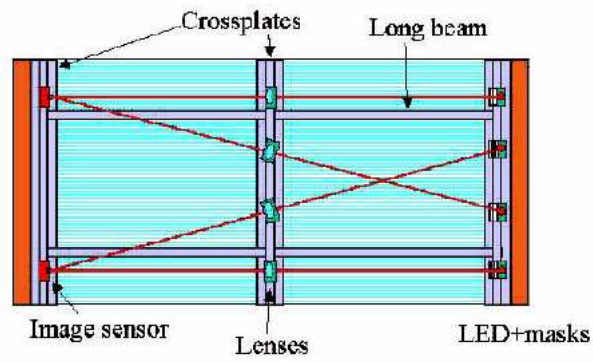


FIG. 8 – Alignement INPLANE

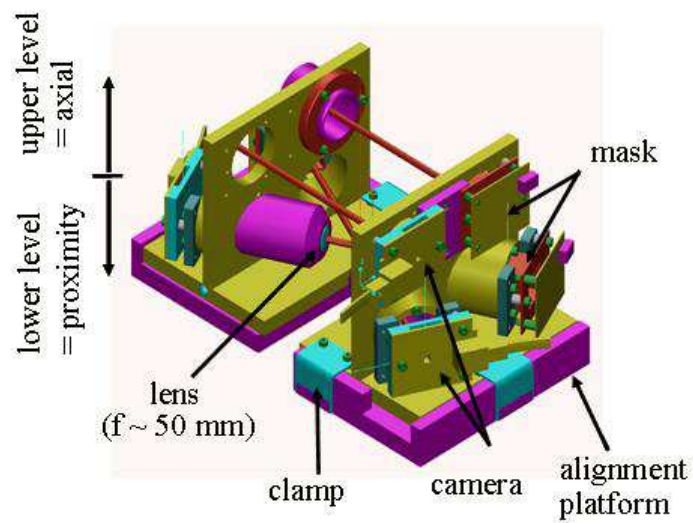


FIG. 9 – Boitiers Praxial-axial

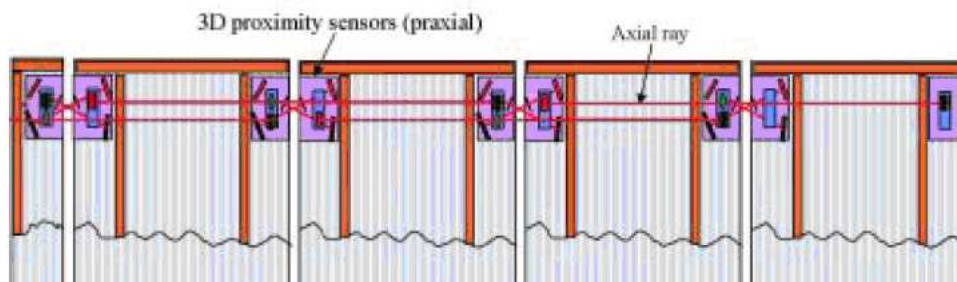


FIG. 10 – Système axial

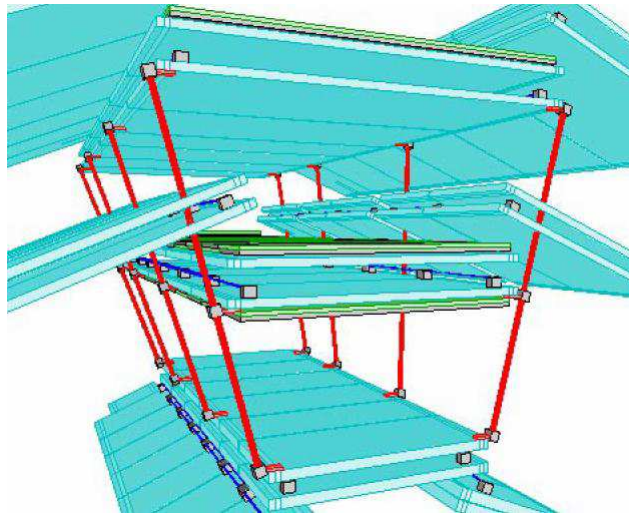


FIG. 11 – Alignement projectif

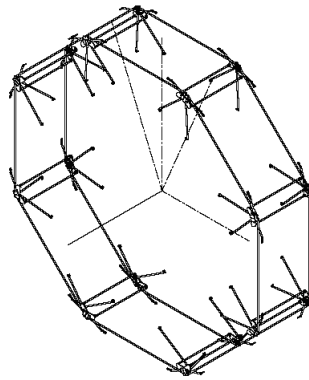


FIG. 12 – Système de Référence



FIG. 13 – Caméra du système de référence fixée sur une chambre

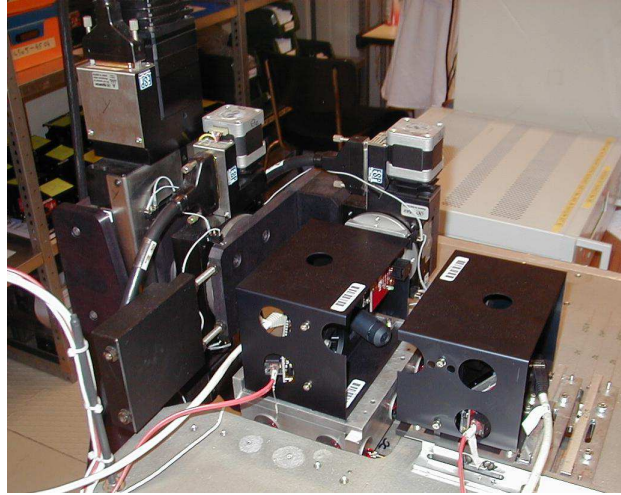


FIG. 14 – Platine de calibration CALIPRAX

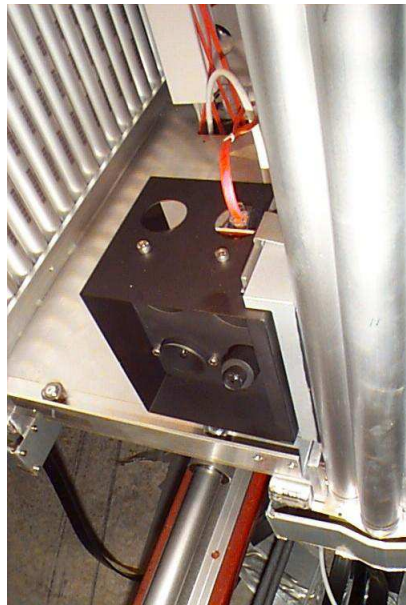


FIG. 15 – Elément praxial collé sur une chambre

Composant	Prix
Lentille	20 à 30 €
CCD	≈ 20 €
Masque codé	< 10 €
Plateforme en aluminium	≈ 30 €
Ligne optique (moyenne incluant l'électronique)(6000)	≈ 200 €
Système d'alignement : total CEA	< 1 M€
Climatisation	60 K€
Platine Caliprax	30 K€
Palpeurs (6)	450 €
Marbre 1	2.25 K€
Marbre 2	22.5 K€
Cubes parfait (6)	1.5 K€
Supports banc axial (9)	2 K€
Machine tri-dim	27.5 K€

TAB. 1 – Quelques prix des éléments du système d'alignement et de calibration. Ces prix sont approximatifs et pour certains sont très dépendants de la quantité de pièces demandées.