

MEMOIRE D'INGENIEUR

présenté au
Conservatoire National des Arts et Métiers

dans la spécialité
INSTRUMENTATION – MESURE Option Optique
par

Jean-Christophe BARRIERE

ETUDE ET REALISATION DU BANC « CALIPRAX »

Soutenu le 28 septembre 2001
devant la commission d'examen composée de :

Yves SURREL (Président)
Olivier CLOUE
Patrick JUNCAR
Jean-Claude LANGUILLAT
Mark PLIMMER

RESUME

Sonder la matière pour en connaître les constituants élémentaires, la description des forces fondamentales et leur interaction, tel est le but de la physique des particules. Les expériences dans ce domaine consistent à provoquer des collisions entre des particules à des énergies très élevées puis à observer les particules créées par ces interactions. Ces observations reposent sur d'énormes détecteurs de particules dont l'utilisation est conditionnée par la connaissance précise de leur géométrie (par exemple : position des chambres de détection). Pour cela, ces détecteurs sont équipés de capteurs d'alignements qu'il faut au préalable étalonner.

Ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un banc d'étalonnage pour des capteurs d'alignement du type « Praxial » (PRoximity AXIAL), et d'autres travaux s'y rapportant. Ce banc est nommé CALIPRAX (CALibration of PRAXial).

Dans un premier temps, nous déterminons puis appliquons une méthode pour régler les outils de positionnement des supports de capteur sur les chambres. Ces réglages s'appuient sur l'utilisation d'une machine de mesures tridimensionnelles.

Ensuite, nous étudions les supports eux-mêmes. Ces études portent sur des aspects mécaniques : qualité du positionnement des capteurs dans leur supports, déformations des supports engendrées par le serrage. Cette fois encore, ces études se rapportent à de la métrologie dimensionnelle.

Après cela, les travaux s'orientent sur le banc, avec la détermination des capteurs de déplacements parmi deux technologies : optique avec le système Rasnik (infraRed Alignment System from NIKhef), et mécanique avec des capteurs de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Ayant découvert une ambiguïté sur le système Rasnik, nous poursuivons l'étude de manière à en comprendre le comportement.

Nous présentons également le principe et les calculs pour l'étalonnage des capteurs Praxial qui s'appuie sur un calcul de minimisation. Les programmes informatiques de contrôle du banc sont alors abordés, ainsi que la mise en place des procédures d'assurance de la qualité. Une autre partie traite des études mécaniques et des problèmes qu'elles ont engendrés.

A la suite de retards imposés par le déroulement du projet, nous réalisons une maquette du banc définitif permettant de faire progresser l'ensemble des activités. Cette maquette permet de tester individuellement les fonctions que le banc final devra posséder. Avec celle-ci, nous acquérons des données pour faire un premier essai du programme de minimisation.

MOTS-CLES

Capteur d'alignement - Banc d'étalonnage - Calcul de minimisation - Mesures - Métrologie dimensionnelle - Physique des particules - Système Rasnik -

ABSTRACT

Probing the matter in order to check its elementary constituents, that is the goal of the particle physic. In this field, the experiments consist in colliding highly energetic particle beams and observing the new born particles. These observations are based on big particle detectors whose running is dependant on the precise knowledge of their geometry (position of the detection chambers). To achieve this, the detectors are equipped with alignment sensors, which have to be calibrated before.

This document describes the study and the making of a calibration bench for the “Praxial” (PRoximity AXIAL) type sensors, and other works related to these sensors.

In a first part, we determine and apply a method to set the tools used to fix the sensor stands on the detection chambers. These settings are made with the use of a tridimensional measuring machine.

Then, we study the stands themselves. These investigations concern mechanics: positioning quality of the sensors in their stands, bendings of the supports due to the tightening. In this part too, the studies are in the field of dimensional metrology.

After this, the works are reoriented toward the bench, with the choice of the displacement sensors among two different technologies: optical, with the Rasnik system, and mechanical, with linear probes as LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Following the discovery of an ambiguity on the Rasnik system, we go on the tests to understand its behaviour.

We introduce the theory of the alignment sensors calibration, which is based on a minimisation calculation. The computer programs are explained in a chapter, and in an other, the implementation of the quality assurance procedures. An other part describes the mechanical studies and the problems they cause.

Because of a delay onset of the project, we make a model of the bench. This dummy allows us to test every single function of the final bench. With this device, we record manually the first calibration data and use them as input of the minimisation program.

KEY WORDS

Alignment sensor - Calibration bench - Dimensional metrology - Measurement - Minimisation calculation - Particle physics - Rasnik system.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	6
JOINDRE LES DEUX INFINIS.	7
PREMIERE PARTIE : ENVIRONNEMENT.....	9
I : L'ENTREPRISE.....	10
I-1 Présentation.....	10
I-2 Le centre de Saclay.....	10
I-3 La D.S.M.	11
I-4 Le D.A.P.N.I.A.	11
I-5 Le Service d'Instrumentation Générale.	12
II : L'EXPERIENCE.....	13
II-1 Théorie : le modèle standard.	13
II-2 Le LHC.	15
II-3 ATLAS.....	19
II-3.1 Description.....	20
II-3.2 Le détecteur de muons	22
II-3.3 L'alignement.	23
DEUXIEME PARTIE : ETUDE.....	26
III : PRESENTATION.....	27
III-1 L'alignement AXIAL/PRAXIAL.....	27
III-2 Le capteur Praxial.	28
III-3 Sujet.....	29
IV : ETUDES PRELIMINAIRES.....	31
IV-1 Les outils de positionnement.....	31
IV-1.1 Utilisation.....	31
IV-1.2 Essais de réglage.	35
IV-1.3 Réglages définitifs.....	36
IV-1.4 Contrôle final.	38
IV-2 Répétabilité de positionnement.	40

IV-3 Mesures d'enfoncement.	46
IV-4 Conditionnement	48
V : PRINCIPE DE « L'ETALONNAGE »	51
V-1 Calcul linéaire	51
V-2 Reconstruction géométrique.	52
V-2.1 Modélisation.	52
V-2.2 Simulation.	53
V-2.3 Mise en évidence des paramètres.	55
V-2.4 Minimisation.	59
VI : CONTROLE DES MOUVEMENTS	61
VI-1 Etalonnage des palpeurs LVDT.	61
VI-2 Vérification du système Rasnik.	67
VII TEST DU SYSTEME RASNIK	72
VIII ETUDES MECANIQUES.	75
VIII-1 Gestion de projet, planning.	75
VIII-2 Le banc Caliprax.	76
VIII-3 Les platines Praxial.	78
IX INFORMATIQUE.	80
X QUALITE.	82
XI BANC D'ETUDE	91
XI-1 Description.	91
XI-2 Résultats.	94
CONCLUSION	95
BIBLIOGRAPHIE	97
LISTE DES FIGURES	98

REMERCIEMENTS

En tout premier lieu, je tiens à remercier Jean-Claude LANGUILLAT, Martial AUTHIER et Olivier CLOUE, respectivement chef du Service d'Instrumentation Générale, adjoint et chef du groupe Mesures et Système, de m'avoir accordé leur confiance pour ce cursus d'ingénieur au CNAM.

Je remercie également toute l'équipe du projet ATLAS menée par Olivier CLOUE pour leur collaboration active au déroulement de ce mémoire, leurs précieux conseils et leurs explications pédagogiques :

Nathalie EYRARD, Michel FONTAINE, Valérie GAUTARD , Patrick GIRARDOT, Patrick GRAFFIN, Claude GUYOT, Patrick MAGNIER, Patrick PERRIN, Patrick PONSOT, Yann REINERT, Philippe SCHUNE (acharnement thérapeutique), Jean-Pierre SCHULLER.

Je souhaite également adresser un clin d'œil à toute l'équipe pédagogique du cursus « ingénieur en instrumentation-mesure » pour la qualité de ses enseignements, ainsi qu'à Monsieur COCQUIDE, qui m'a redonné goût pour les mathématiques, base de ma réussite scolaire ultérieure. Merci à Yves SURREL d'avoir été mon tuteur pour ce mémoire et d'en présider la soutenance.

Je ne peux débiter ce document sans remercier ma femme, pour m'avoir laissé la disponibilité nécessaire à la rédaction de ce mémoire.

JOINDRE LES DEUX INFINIS.

Commençons tout d'abord par l'infiniment grand, de l'ordre de 10^{26} m (10 milliards d'années lumière). C'est la distance à laquelle les objets célestes les plus éloignés sont observés. Nous sommes dans l'étude de l'Univers, sa création, sa taille, sa masse, son expansion.

Pour comprendre les lois qui le régissent et plus particulièrement les mécanismes et réactions qui l'ont engendré, les chercheurs s'intéressent aux instants immédiatement successifs au BIG-BANG. La matière y est portée à des conditions de température et de pression difficilement imaginables. Une cuillère à café de matière pèse plusieurs tonnes. Les particules élémentaires coexistent dans un état de mélange.

Afin de recréer ces conditions étranges et parvenir à isoler les particules élémentaires, les hommes ont construit des appareils immenses. Le tunnel du futur grand accélérateur de particules (Large Hadron Collider ou LHC) à Genève mesure 27 km de circonférence. Cet accélérateur permettra de faire entrer en collision deux faisceaux de protons, afin de sonder les particules qui les composent. Pour détecter et mesurer l'énergie des particules issues de cette collision, le LHC sera pourvu de détecteurs dont la taille est voisine de 30 m de longueur pour une hauteur d'environ 20 m. Lorsqu'au centre du détecteur, deux faisceaux de protons (environ 10^{-15} m) entreront en collision, ils exploseront en une gerbe de particules dont la taille¹ est estimée à 10^{-19} m. Nous sommes aux confins de la matière, en plein domaine de la physique des particules.

La physique des particules étudie les constituants élémentaires de la matière. Au sein des détecteurs, cette étude passe par une reconstruction de trajectoire de chaque particule qui permet par la suite de mesurer sa charge, son énergie pour finir par l'identifier.

Cette mesure de trajectoire s'appuie sur une connaissance précise de la position des éléments de détection. L'ensemble du détecteur est alors pourvu de capteurs d'alignement utilisés pour en contrôler les déformations : dilatations, torsions dues au champ magnétique...

Le sujet de ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un banc d'étalonnage pour l'un des capteurs d'alignement.

La première partie de ce document s'attache à décrire l'environnement dans lequel s'est déroulée cette année de travail. Après un premier chapitre sur l'entreprise, ce document traite la description générale de l'expérience et fait un léger rappel de notions théoriques propres à la physique des particules. Par la suite, le LHC et l'un de ses détecteurs de particules, ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus), sont abordés. Après en avoir appréhendé le fonctionnement, le lecteur découvre l'alignement des chambres à muons d'ATLAS et les principes utilisés.

La seconde partie, consacrée à l'étude proprement dite, commence par un chapitre de présentation de l'alignement Axial, du capteur Praxial (un des systèmes utilisés pour connaître la position des chambres à muons) et du sujet de ce mémoire. Elle décrit l'ensemble des activités menées pendant l'année de mémoire en les découpant par pôles.

Le premier sujet abordé est relatif à des études connexes au sujet principal. Elles concernent le réglage des outils de positionnement des supports des capteurs sur les chambres, les mesures de positionnement des capteurs dans ces supports, des mesures de déformations

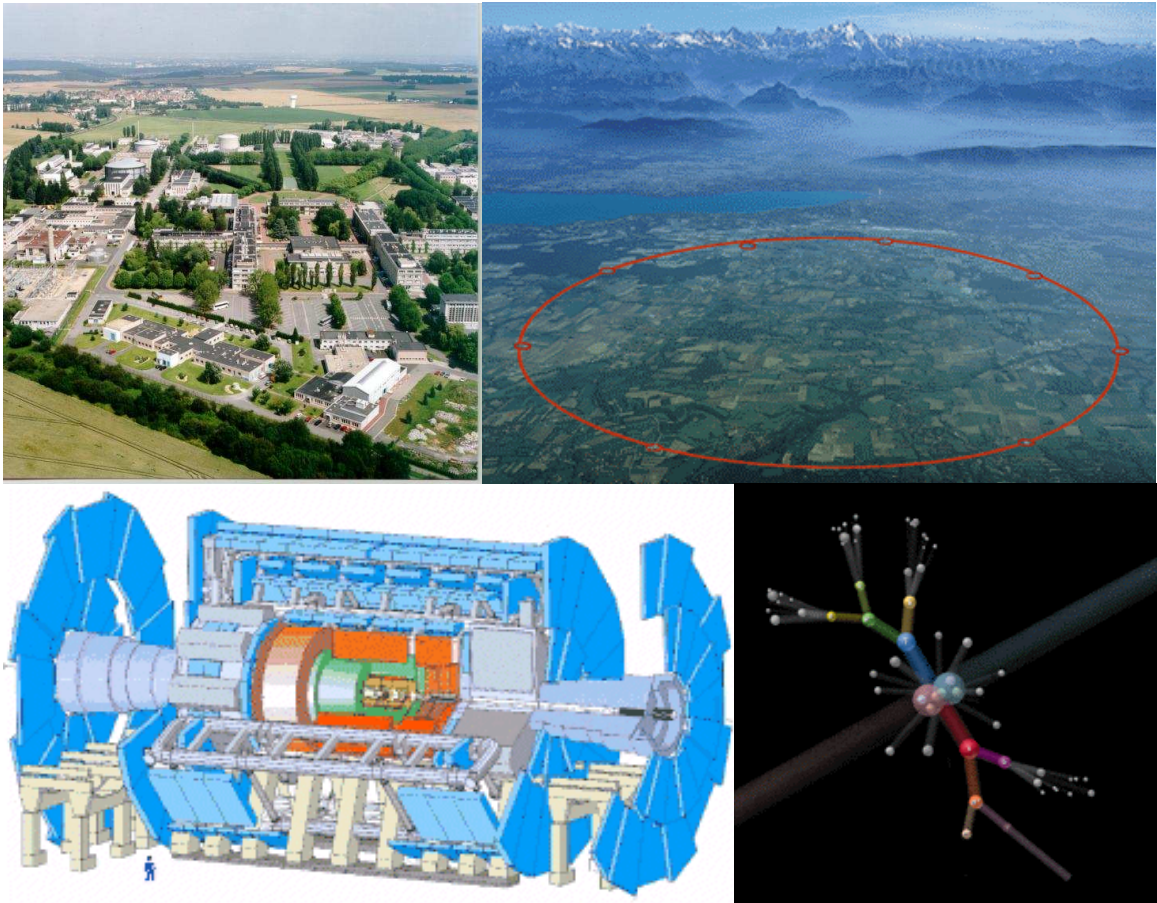
¹ La notion de dimension prend ici une signification très particulière. Elle ne désigne pas le rayon d'une boule de matière puisque les particules en question constituent la matière. Il s'agit du rayon de la sphère dans laquelle la probabilité de présence de la particule est supérieure à un seuil donné.

de ces mêmes supports ainsi que le conditionnement des capteurs. Après cette parenthèse le document se recentre sur des activités directement liées au sujet.

Le lecteur aborde le principe de « l'étalonnage », décrit dans un chapitre. Celui-ci est suivi par l'étude des moyens de mesure de déplacements envisagés pour le banc. Puis un chapitre est consacré aux études mécaniques et présente les concepts finaux du banc et du capteur Praxial. Le banc Caliprax étant semi-automatisé, le document fait ensuite un brève description des développements informatiques réalisés pendant la période du mémoire. Une analyse des différentes tâches liées à une opération d'étalonnage est ensuite décrite. Cette description correspond aux premiers pas effectués dans le sens d'une démarche « qualité » mise en place dans le projet. Enfin, un dernier chapitre présente la maquette du banc réalisée avant la fin de la rédaction de ce document et les premiers résultats obtenus avec cette maquette.

Une conclusion clôt ce document.

PREMIERE PARTIE : ENVIRONNEMENT



I : L'ENTREPRISE.

I-1 Présentation.

Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) fut créé en 1945 par ordonnance du Général de Gaulle. Il avait pour objectif de doter la France d'un institut civil et militaire de recherche dans le domaine nucléaire.

En 1946, Frédéric Joliot choisit un site sur le plateau de Saclay pour y développer la recherche nucléaire civile. En 1948, la première pierre du centre de Saclay est posée par le ministre Raoul Dautry.

En 1951, les premiers chercheurs s'installent sur le centre.

En 1996, le centre de Saclay est devenu le plus grand centre de recherche du CEA parmi les 11 sites existants.

En 1999, le CEA comptait environ 16.000 salariés répartis en 11.500 personnes pour le civil et 4.500 personnes pour les applications militaires. La population scientifique représente 87 % de l'effectif global. Cette même année, ces personnes ont déposé 217 brevets pour en porter le nombre à 1553. Le budget total du CEA pour 1999 s'élevait à 18,6 milliards de francs dont 60 % sont destinés au domaine civil. Le montant des frais de fonctionnement est de 7,7 milliards de francs, 7,4 milliards de francs sont dédiés au soutien des programmes, 1,7 milliards de francs sont consacrés aux investissements et 1,6 milliards de francs sont utilisés pour le remboursement d'emprunts ou de charges fiscales.

Le CEA est un établissement public de recherche et de développement à caractère scientifique, technique et industriel. Son organigramme peut se décomposer en 5 niveaux [1] :

- La direction générale
- Les pôles : défense, énergie nucléaire, recherche fondamentale et recherche technologique
- Les directions opérationnelles
- Les départements ou laboratoires
- Les services.

Nous allons à présent détailler cette structure en commençant par le site de Saclay.

I-2 Le centre de Saclay.

Le centre de Saclay s'étend sur 200 Ha répartis en 25 Ha de bâtiments, 30 Ha de voiries et 145 Ha d'espaces verts. Parmi les 5 établissements du CEA civil (Cadarache, Fontenay-aux-roses, Grenoble, Paris, Saclay), le centre de Saclay est le second en terme de superficie. Les 35 km de route autorisent le déplacement des 8000 personnes présentes quotidiennement sur le site. Les communications sont acheminées au travers de 6700 lignes téléphoniques. Le centre de Saclay a une consommation énergétique comparable à celle d'une ville comme Strasbourg.

Les études et recherches poursuivies à Saclay s'étendent sur un domaine assez large. Nous pouvons les classer en 6 catégories :

- La connaissance de la matière. Ces activités concernent la physique nucléaire, la physique des particules élémentaires, la physique des surfaces et l'astrophysique.

En outre, l'application pratique des méthodes de la chimie et de la physique aux sciences de la terre a permis d'apporter une contribution reconnue en matière de modélisation climatique, de vulcanologie et de sismologie.

- L'électronucléaire. Les recherches appliquées liées aux programmes électronucléaires s'articulent autour de deux grands pôles : les nouvelles techniques d'enrichissement de l'uranium et l'amélioration de la sécurité des centrales nucléaires via l'étude des matériaux irradiés.
- Le développement des technologies avancées. Des études très innovantes sont menées dans quatre domaines : l'électronique, la science des matériaux, l'application et la métrologie des rayonnements ionisants et enfin la robotique et la productique.
- Les sciences du vivant. La biophysique, la biochimie et la biologie cellulaire font l'objet d'études très poussées. Ce secteur d'activité a des retombées importantes pour la recherche médicale de pointe.
- La protection et la sûreté nucléaire. Des équipes de chercheurs contribuent à l'amélioration des connaissances dans le domaine de la protection de l'homme et de l'environnement face aux risques nucléaires.
- L'enseignement et la formation. L'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires dispense des cours pour former les personnes aux particularités des travaux dans le domaine du nucléaire.

C'est à la connaissance de la matière que les agents de la Direction des Sciences de la Matière (DSM) travaillent chaque jour.

I-3 La D.S.M.

La Direction des Sciences de la Matière avec la Direction des Sciences du Vivant (DSV) constituent le pôle Recherche Fondamentale. Elles se situent au même niveau organisationnel que les autres pôles (Energie Nucléaire, Défense et Recherche technologique).

Elle compte deux départements dont la frontière des domaines d'études peut être schématisée par l'atome, un service de physique théorique, un laboratoire d'études du climat et de l'environnement ainsi que deux laboratoires mixtes CEA-CNRS.

Les activités de la DSM se répartissent entre recherche fondamentale et recherche appliquée. Elle emploie 1800 personnes dont un tiers appartient au DAPNIA (Département d'Astrophysique, physique des Particules, physique Nucléaire et Instrumentation Associée).

I-4 Le D.A.P.N.I.A.

C'est en 1991 que le Département d'Astrophysique, physique des Particules, physique Nucléaire et Instrumentation Associée a été créé au sein de la Direction des Sciences de la Matière par la réunion de plusieurs services (plus de 800 personnes) travaillant depuis longtemps dans ce domaine.

Le DAPNIA a pour mission de mener des recherches dans les disciplines de l'astrophysique, la physique des particules et la physique nucléaire et à leurs frontières communes. Ces recherches sont conduites en s'appuyant sur des moyens techniques

importants, liés à une instrumentation spécifique que le département développe en associant physiciens, ingénieurs et techniciens.

Le personnel permanent du DAPNIA compte actuellement 630 agents dont plus de la moitié sont des chercheurs. Une cinquantaine d'étudiants y prépare une thèse de doctorat. Il est constitué de 7 services dont le Service d'Instrumentation Générale (SIG) dans lequel j'évolue parmi 67 autres agents. La structure du DAPNIA doit être réorganisée en janvier 2002.

I-5 Le Service d'Instrumentation Générale.

La taille, la complexité, la durée de vie, l'hostilité de l'environnement imposent aux appareils de physique des caractéristiques d'exactitude et de fiabilité de plus en plus importantes.

Dans ce contexte, le Service d'Instrumentation Générale répond à ces exigences en mettant en œuvre des techniques de pointe et en apportant des solutions originales. Ses travaux mêlent des méthodes industrielles à des conceptions novatrices afin de répondre aux applications particulières que constituent les détecteurs. La pluridisciplinarité des profils présents au SIG permet d'étudier et concevoir des produits aussi bien que d'en assurer la sous-traitance. Les compétences sont distribuées en 6 groupes : la direction, l'automatisme, l'électronique, le génie électrique, l'informatique, ainsi que les mesures et systèmes.

Le SIG tient un rôle de service pilote dans des projets tels qu'ANTARES (détecteur sous-marin de neutrinos de $1/10$ de km^3), ATLAS MUONS (alignement des chambres à muons du détecteur ATLAS) ou MINI-INCA (traitement des déchets radioactifs par incinération) . Il est aussi précurseur dans le développement des réseaux de terrain FIP, réalise des systèmes électroniques embarqués sur satellite, ainsi que des baies d'alimentations et de sécurité pour des grands aimants. Nous allons maintenant décrire le projet ATLAS en débutant par quelques notions de physique des particules.

II : L'EXPERIENCE.

II-1 Théorie : le modèle standard.

Joindre les deux infinis. L'introduction de ce document fait un lien dimensionnel entre deux disciplines de la recherche fondamentale : la cosmologie et la physique des particules.

La cosmologie étudie l'Univers, ses constituants, son évolution. Elle s'appuie sur plusieurs modèles et théories: le modèle du BIG BANG décrit son évolution générale tandis que le MODELE STANDARD décrit ses constituants. La théorie de la relativité générale est peu à peu associée au Modèle Standard pour former des extensions de ce dernier (dimensions supplémentaire, théorie des cordes).

Après le Big Bang, l'Univers s'est refroidi, son énergie a baissé et les particules élémentaires qui le composaient se sont regroupées pour former les atomes et par extension, des nuages, des étoiles et des galaxies.

La famille des particules rencontrées en physique des particules est très étendue. Les plus connus sont les protons, neutrons et électrons, constituants les atomes. A ces trois premiers exemples, il faut ajouter les mesons, les pions, les kaons... Cependant, l'ensemble de ces particules est composé de particules élémentaires. Le MODELE STANDARD, théorie propre à la physique des particules, identifie et décrit les particules élémentaires et leurs interactions (voir figure 1).

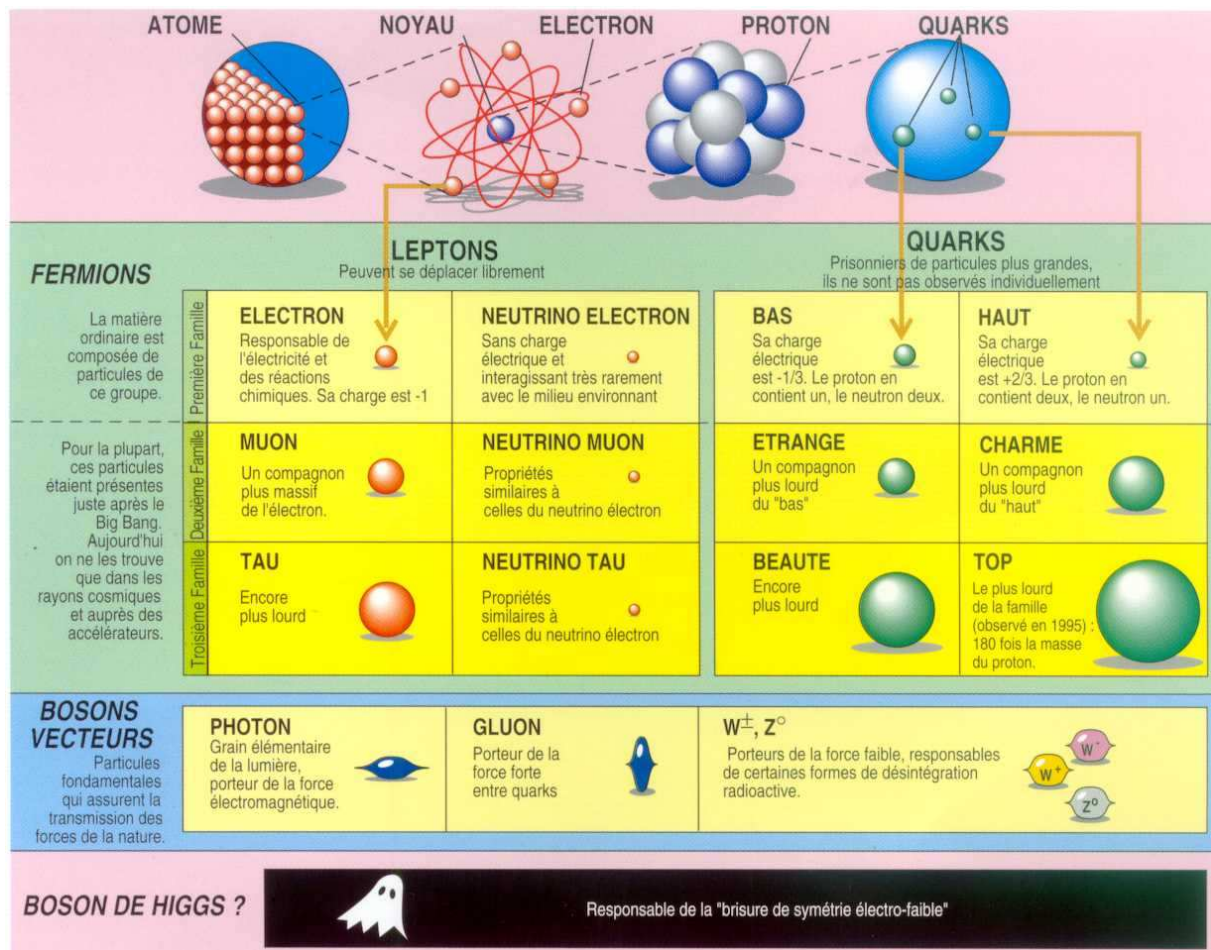


Figure 1: Les particules élémentaires du Modèle Standard.

Ainsi, ces deux disciplines et leur théorie associée tentent de remonter aux origines de la matière.

Une partie de la matière connue dans l'Univers est faite d'atomes constitués d'électrons en orbite autour d'un noyau fait de protons et de neutrons, eux-mêmes composés de quarks. Il existe 6 types de quarks, séparés en trois familles. Les quarks haut et bas, l'électron et le neutrino électron permettent de construire toute la famille des atomes présents sur Terre.

L'étude de la matière à de très haute énergie, créée par les rayons cosmiques ou dans les accélérateurs, met en évidence l'existence d'autres quarks (beauté, charmé, étrange et top) et d'autres leptons (muon, tau et neutrinos associés). Mais la durée de vie de ces particules est tellement faible qu'elles ne sont observables que dans des appareils de physique spécifiques.

Le Modèle Standard nous indique également que plusieurs types de forces ou d'interactions lient les particules entre elles.

- La première découverte, la gravité, nous permet de marcher sur Terre et maintien les planètes en orbite autour du Soleil. Son intensité est liée à la masse de matière agglomérée. Elle est prédominante pour des objets de très grande taille et très « lourds », tels les planètes, les étoiles et les galaxies.
- Ensuite, la force électromagnétique, visible à échelle macroscopique fait dévier un filet d'eau avec un peigne ou permet de soulever une boule de pétanque avec un aimant. Dans ce dernier cas, son intensité est supérieure à celle de la gravité. A échelle microscopique, elle maintient les électrons (de charge négative) en orbite autour du noyau (de charge positive). Selon cette force, deux charges ou deux pôles identiques se repoussent tandis que deux charges ou pôles opposés s'attirent.
- Plus tard, l'interaction faible a été découverte. Elle conduit à la désintégration des neutrons et d'autres particules. Elle est aussi responsable d'une partie du cycle de combustion de l'hydrogène dans le soleil, lorsque celui-ci se transforme en hélium. Les manifestations les plus abordables de cet effet sont des phénomènes de radioactivité (β).
- Enfin, l'interaction forte est responsable du regroupement des quarks au sein des protons. Dans un noyau, son intensité est plus forte que celle de la force électromagnétique. Ceci permet aux protons (tous de charges positives) de rester agglutinés. Contrairement à la gravité ou à la force électromagnétique son intensité sur les quarks croît à mesure que la distance augmente, ce qui explique le confinement de ces derniers dans les protons ou neutrons.

Chacune des forces ou interactions décrites ci-dessus agit au travers de « vecteurs de force » appelés bosons. Les bosons sont également décrits par le Modèle Standard.

L'exemple le plus connu est celui du photon, souvent appelé « grain de lumière », boson de la force électromagnétique.

Le boson de la gravité ou graviton, quant à lui, n'a jamais été vu directement. Sa mise en évidence a été récompensée par un prix Nobel de physique (perte d'énergie d'un système de deux étoiles à neutrons, due à l'émission d'ondes gravitationnelles). Trois expériences d'interférométrie tentent de détecter directement les ondes gravitationnelles.

Découverts dans les années 1980, les bosons W^+ , W^- et Z^0 sont responsables de l'interaction faible.

Enfin, le gluon est le boson de l'interaction forte.

La façon dont les particules acquièrent leur masse n'est pas bien comprise. Peter Higgs a formulé une théorie selon laquelle toutes les particules et les vecteurs de force interagissent avec une autre particule : le boson de Higgs. D'après cette théorie, c'est l'intensité de cette

interaction qui créerait la notion de masse. Le boson de Higgs aurait aussi pour propriété d'être responsable de la brisure de symétrie électro-faible (non développée dans ce document).

La mise en évidence du boson de Higgs est un des défis majeurs de la physique des particules à ce jour. Les expériences menées ces dernières années servent à conforter et préciser le Modèle Standard. Les zones d'ombre qui subsistent concernent des domaines de très haute énergie. Pour tenter de répondre aux questions qui restent en suspend, les hommes construisent le grand collisionneur de hadrons (ou LHC, pour Large Hadron Collider) au Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) [2] et [3]. Nous allons à présent décrire cet instrument.

II-2 Le LHC.

Au travers de la célèbre équation (1), où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide, nous constatons que la masse m et l'énergie E d'une particule sont proportionnelles. Ainsi, nous exprimons la masse du proton comme étant de l'ordre de $1\text{GeV}/c^2$. Par abus de langage, on parle d'une masse de 1 GeV .

$$E = m.c^2 \tag{1}$$

En physique des particules, les expériences consistent en l'observation de réactions particulières. Ces réactions peuvent être générées par des accélérateurs et analysées à l'aide de détecteurs. Elles sont aussi naturellement présentes dans l'espace et sur terre par le biais des rayons cosmiques.

Lors d'une réaction particulière, des phénomènes identiques à ceux qui se sont produits après la création de l'Univers pourraient être observés lorsque la matière avait un niveau énergétique comparable à celui de la réaction particulière. Aussi, pour qu'il y ait création ou disparition de particules, il faut que l'énergie de la réaction particulière dépasse un certain seuil, égal à la « masse » de la particule à créer.

Durant le XX^{ème} siècle, la recherche en physique des particules a permis de découvrir les constituants élémentaires de la matière. En construisant des accélérateurs de particules de plus en plus grands, les hommes se sont donnés les moyens d'élaborer le Modèle Standard. Les tendances de la fin du siècle et de celles du XXI^{ème} siècle concernent la découverte du boson de Higgs et l'unification des interactions.

La théorie d'unification électro-faible (non développée dans ce document) donne une cause commune à la force électromagnétique et à l'interaction faible. Cette théorie a été confirmée par la découverte, en 1986, des bosons W^{+} , Z^0 (prix Nobel de Physique pour C. Rubbia et S. Van Der Meer). Une autre théorie dite de grande unification est pressentie par les chercheurs. Cette théorie ajouterait l'interaction forte à l'union électro-faible. Elle concerne des niveaux d'énergie inaccessibles pour les technologies actuelles, mais les premières manifestations sont attendues pour des énergies voisines de 1 TeV [4].

Pour avancer dans les découvertes, dans la compréhension du Big-Bang, dans la définition du modèle standard et tenter de prouver cette théorie, la construction du LHC a débuté il y a deux ans. Le LHC va profiter de l'expérience acquise par les chercheurs et techniciens des pays membres du CERN sur les accélérateurs précédents et notamment le LEP (Large Electron-Positron collider).

Arrêté à la fin de l'année 2000, le LEP fait entrer en collision des électrons et leur antiparticule² : les positrons. Lorsqu'une particule et son antiparticule sont suffisamment proche l'une de l'autre, elles peuvent s'annihiler (disparition mutuelle) et libérer une bouffée d'énergie. Cette énergie ainsi disponible se transforme alors immédiatement en d'autres particules qui sont alors détectées et analysées (voir figure 2). Pour permettre ce genre de réactions, les hommes ont construit un tunnel circulaire de 27 km de circonférence enfoui à 100 m sous Terre dans lequel les électrons et positrons sont accélérés. Avec le LEP, les énergies atteintes pour les faisceaux de particules étaient voisines de 100 GeV. En le remplaçant par le LHC, les chercheurs souhaitent atteindre des niveaux d'énergie supérieurs à 1 TeV.

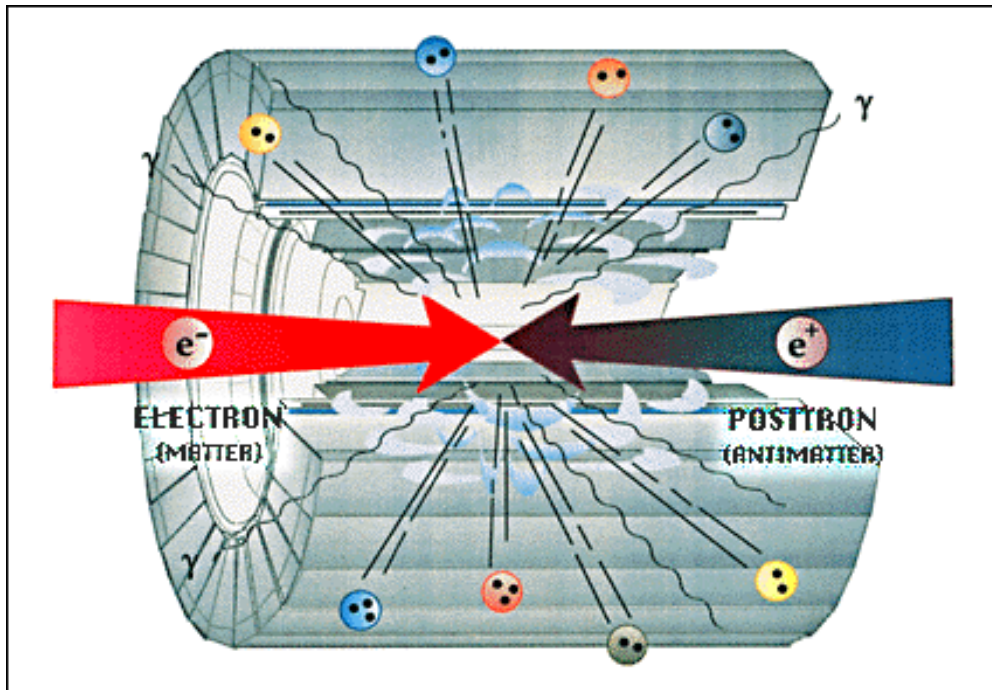


Figure 2: Représentation artistique d'une réaction électron-positron.

Dans un souci d'économie de travaux en génie civil, le LHC prend place dans le tunnel du LEP. Cependant, de nouveaux conduits sont construits spécifiquement. En effet, le LHC réalisant des collisions protons-protons, deux tubes faisceau sont nécessaires pour faire circuler les paquets de protons dans des sens différents. Ce n'est qu'aux endroits pourvus de détecteurs que les collisions sont provoquées, en faisant se croiser les deux faisceaux. Comme son prédécesseur, il utilise les « petits » accélérateurs du CERN comme injecteurs. Après création des protons, le LINAC, un accélérateur linéaire, permet d'en porter l'énergie à 50 MeV. Ils transitent ensuite dans le BOOSTER, un premier accélérateur circulaire pour atteindre l'énergie de 1,4 GeV. Ensuite, ils pénètrent dans le PS (Proton Synchrotron) et sont accélérés jusqu'à 25 GeV pour entrer dans le SPS (Super Proton Synchrotron). Là, ils sont portés à un niveau énergétique de 450 GeV. Enfin, ils sont injectés dans le LHC pour atteindre l'énergie de 7 TeV (voir figure 3). La même chaîne est utilisée pour accélérer des ions, utilisés notamment pour l'expérience ALICE (A Large Ion Collider Experiment).

² Nous limiterons l'explication de cette théorie en disant que pour chaque particule, il existe une antiparticule de même masse, mais de charge opposée.

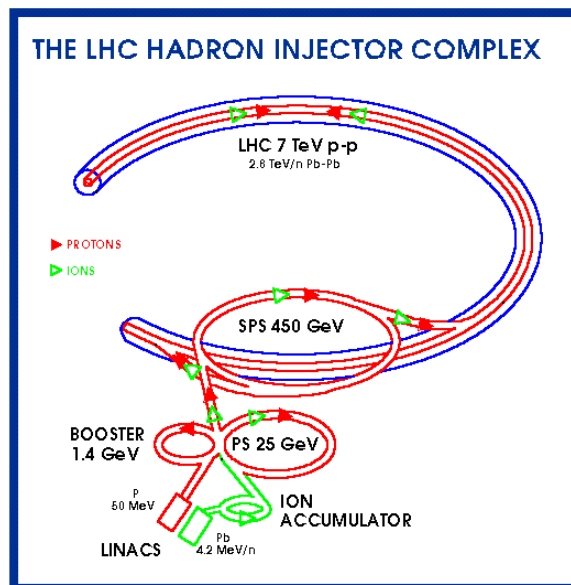


Figure 3: schéma de la chaîne d'injection des protons et des ions du LHC.



Figure 4: Matérialisation des accélérateurs du CERN. Le cercle de plus grand diamètre représente le LHC (Large Hadron Collider), le plus petit matérialise le SPS (Super Proton Synchrotron).

Comme son nom l'indique, le LHC est un collisionneur de particules. Il fera percuter l'un dans l'autre deux faisceaux de protons portés à une énergie de 7 TeV. L'énergie du choc entre les particules sera alors de 14 TeV ce qui semble être dix fois supérieur à l'énergie souhaitée pour faire des observations mais ceci est une mauvaise approximation.

Le proton est constitué de quarks et de gluons. L'énergie acquise par le proton est en fait répartie entre tous ses constituants. Finalement, une estimation indique que chaque quark ne sera pourvu que de 10% à 20 % de l'énergie du proton. Pour réaliser une réaction sur des

quarks à un niveau énergétique de 1 TeV, il faut que le choc entre protons soit au moins à 10 TeV.

Pour atteindre des niveaux d'énergie aussi élevés, des principes identiques à ceux utilisés dans les tubes des téléviseurs sont appliqués. Les particules étant chargées, elles peuvent être accélérées par un champ électrique et ainsi gagner de l'énergie cinétique. En multipliant le nombre de cavités accélératrices, l'énergie donnée à la particule est augmentée. Cependant, pour parvenir à des niveaux de l'ordre de la centaine de GeV ou plus, le nombre de passages dans des cavités est tel que des accélérateurs linéaires seraient trop difficiles à construire.

Des structures circulaires sont alors adoptées. Les particules parcourent plusieurs fois le tour complet de chaque accélérateur pour atteindre le niveau énergétique souhaité. Dans le tunnel du LHC, des cavités accélératrices succèdent à des aimants dipolaires utilisés pour courber la trajectoire du faisceau.

Le principe des cavités accélératrices est fondé sur une loi d'électrostatique selon laquelle une particule de charge q et de masse m , placée dans un champ électrique E , subit une force F donnée par l'équation (2).

$$\vec{F} = q\vec{E} \quad (2)$$

Pour un cas non relativiste, la variation de vitesse Δv d'une particule dans une cavité de longueur d soumise à une différence de potentiel U (le champ électrique est alors le rapport de U sur d) est donnée par l'équation (3).

$$\Delta v = \sqrt{\frac{qU}{m}} \quad (3)$$

De même, la loi de Laplace nous indique qu'une particule de charge q se déplaçant à la vitesse v dans un champ magnétique B subit une force définie par l'équation (4). Si la vitesse est constante et le champ magnétique uniforme et orthogonal à v , alors la particule décrit un mouvement circulaire dont le rayon r est donné par l'équation (5).

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} \quad (4)$$

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (5)$$

Par définition, les vitesses des particules à l'intérieur des accélérateurs ne sont pas uniformes. De plus, elles sont si élevées que les lois de physique générale ne peuvent plus être appliquées. Elles sont alors remplacées par celles de la physique relativiste. Cependant, si les équations citées ne sont plus exactes, les principes restent valables.

La construction du LHC, en termes de travaux de génie civil, s'est accompagnée durant ces dernières années de nombreux travaux de recherche et développement. Par exemple, la supraconductivité a été appliquée à la conception de cavités accélératrices ainsi qu'à la fabrication d'aimants dipolaires et quadripolaires utilisés pour modeler le faisceau de particules. Ces avancées technologiques donnent au LHC la capacité de réaliser des collisions de protons à 7 TeV, mais aussi d'accélérer des ions lourds (du plomb) à 1250 TeV.

En fonction de la réaction provoquée et des résultats attendus, différents types de détecteurs seront disposés le long du LHC. Pour les collisions de protons, ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) et CMS (Compact Muon Solenoid) traqueront le boson de Higgs. ALICE (A Large Ion Collider Experiment) utilisera les collisions d'ions lourds pour étudier le plasma de quarks-gluons. La figure 5 montre les deux détecteurs associés aux expériences de collisions protons-protons. Le détecteur ALICE n'y figure donc pas.

Parmi ces détecteurs, nous allons à présent nous intéresser plus particulièrement à ATLAS.

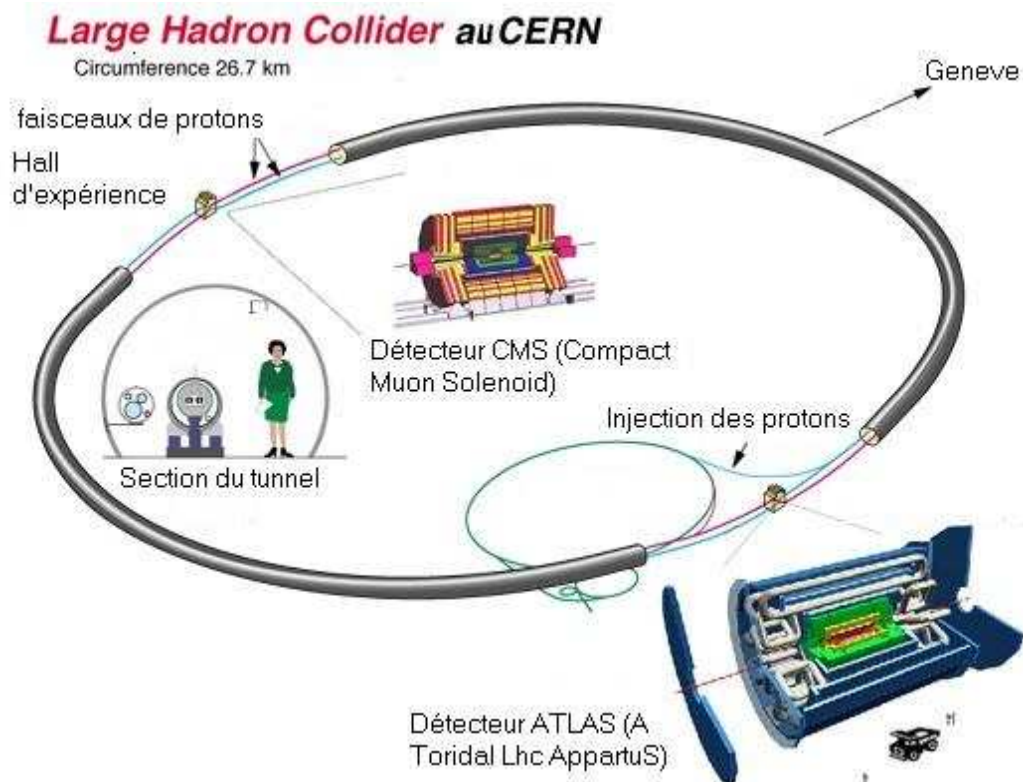


Figure 5: Schéma du LHC avec ses deux principaux détecteurs.

II-3 ATLAS.

Rappelons qu'ATLAS est un détecteur conçu pour étudier les particules émises lors du choc entre deux protons [5]. Pour identifier les particules, les physiciens ont besoin de connaître leur direction, leur type, leur charge électrique si elles en possèdent, ainsi que leur impulsion qui représente la quantité de mouvement de la particule et leur énergie totale, si celle-ci est mesurable. Tout ceci est réalisé en faisant régner un champ magnétique intense au sein du détecteur et en adaptant la nature et la position des éléments de détection aux particules recherchées. Ainsi, la structure d'un détecteur comme ATLAS est constituée de « couches ». Afin d'avoir le moins de pertes sur l'angle solide de détection, la forme du détecteur tend vers une surface fermée.

ATLAS est un parallélépipède de section polygonale régulière à 16 cotés mesurant plus de 25 m de long, pour une hauteur totale d'une vingtaine de mètres. Le corps du détecteur est appelé « tonneau » ou « Barrel », tandis que les extrémités sont nommées « bouchons » ou « end-caps ». En comptant les bouchons, la longueur totale du détecteur est voisine de 45 m. Le paragraphe suivant décrit plus précisément les différentes parties du détecteur.

II-3.1 Description.

La figure 6 montre une vue écorchée du détecteur ATLAS sur laquelle les éléments actifs sont représentés par plusieurs couleurs [6].

Le tube à vide (en rouge) parcourt le détecteur jusqu'à son centre. De chaque partie du tube provient un paquet de protons. Ceux-ci se percutent au point d'interaction, situé en plein centre du détecteur.

Au plus proche du point d'interaction se trouve le détecteur de traces (en rose). Constitué d'un grand nombre de cellules en silicium, il permet de déterminer précisément la trajectoire des particules. L'épaisseur de cette partie est suffisamment faible pour ne pas trop absorber d'énergie des particules. Entourée d'un aimant solénoïdal, cette partie est utilisée pour visualiser les particules chargées, dont la trajectoire sera courbée par le champ magnétique.

L'aimant solénoïdal (en gris) produit un champ magnétique linéaire parallèle au tube à vide au niveau du détecteur de traces. C'est une bobine supraconductrice qui constitue cet aimant.

Le calorimètre électromagnétique (en jaune) est utilisé pour mesurer l'énergie des photons γ , des positrons e^+ et des électrons e^- . En pénétrant dans le calorimètre électromagnétique, chacune de ces particules va créer à son tour soit une paire électron-positron (si un photon a pénétré dans le détecteur) soit un photon d'énergie un peu moindre que les particules initiales (dans le cas d'électrons ou de positrons). A leur tour, les électrons, positrons et photons « secondaires » vont déposer leur énergie en se mutant en d'autres particules et ainsi de suite, jusqu'à ce que les particules créées n'aient plus suffisamment d'énergie pour progresser dans la matière qui constitue le calorimètre. Pour une particule ayant pénétré dans le calorimètre, il se forme une gerbe de particules. Le courant total produit par cette gerbe est proportionnel à l'énergie de la particule incidente.

Le calorimètre hadronique (en vert) fonctionne selon le même principe que le calorimètre électromagnétique. Sa position plus extérieure lui permet de détecter des particules plus pénétrantes: protons, neutrons et mesons π, κ .

L'aimant toroïdal (en gris) est constitué de huit bobines supraconductrices d'une vingtaine de mètres de long disposées aux sommets d'un octogone. Il crée un champ magnétique toroïdal dont l'axe de symétrie correspond au tube à vide. Afin d'améliorer la qualité du champ magnétique dans l'espace du détecteur, il est complété par huit petites bobines à chaque extrémité. Les champs magnétiques au sein d'ATLAS ont une intensité de l'ordre de 1,5 T.

Le détecteur de muons (en bleu) se situe sur la partie la plus extérieure d'ATLAS. Les muons et les neutrinos n'ayant que très peu d'interaction avec la matière, ils parviennent aisément aux couches externes du détecteur. La détection des muons se fait au travers de chambres à muons qui constitueront une peau pour ATLAS. Afin de couvrir un angle solide le plus proche de 4π str, les extrémités du détecteur sont également équipées avec des chambres à muons.

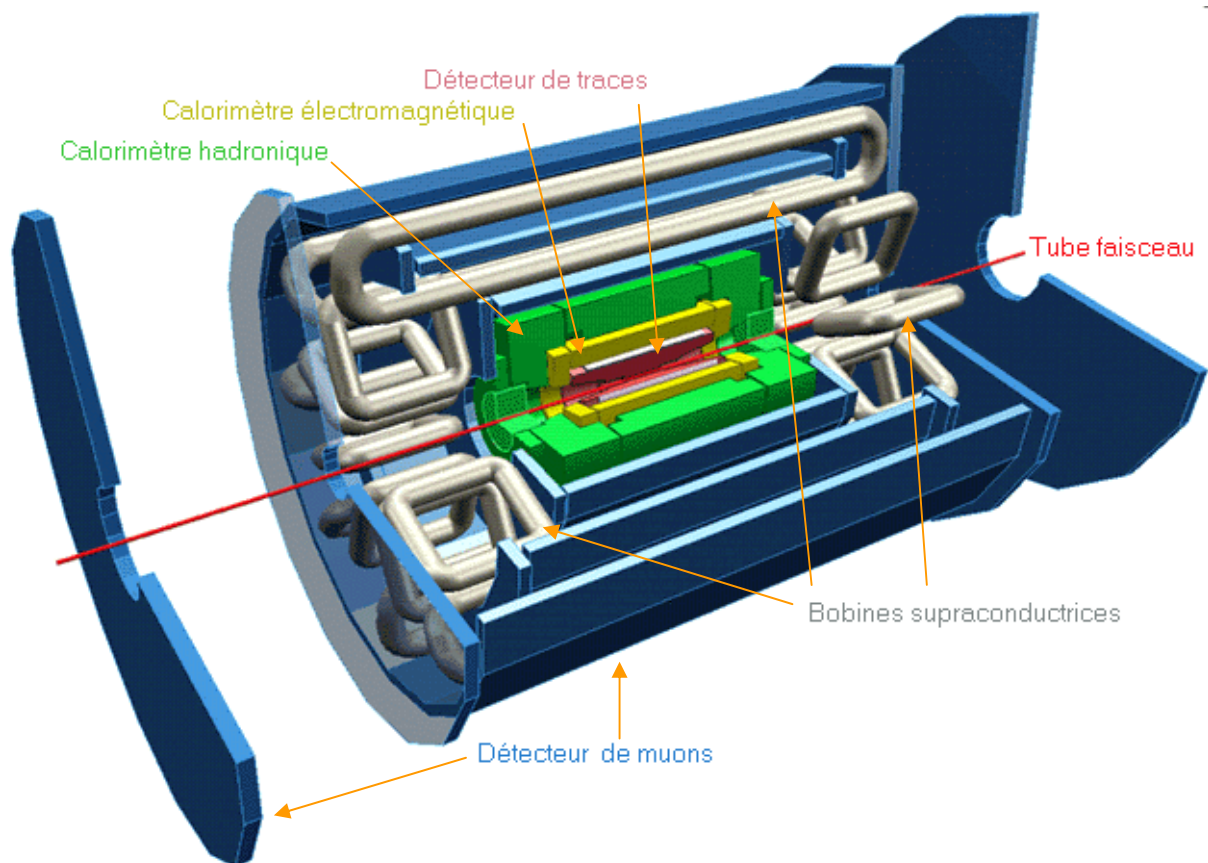


Figure 6: vue en écorché du détecteur ATLAS.

La description précédente ne traite que les éléments actifs pour l'aspect détection des particules. Elle omet toute la logistique nécessaire au bon fonctionnement du détecteur : l'infrastructure mécanique qui donne sa géométrie au détecteur et maintient tous ses éléments en place, les câbles de lecture des signaux, les services (hautes tensions, cryogénie), les galeries utilisées pour le montage ou la maintenance. La figure 7 montre aussi une vue en écorché sur laquelle l'infrastructure apparaît en restreignant le nombre de chambres à muons (en bleu). Les autres couleurs ne respectent pas celles de la figure 6.

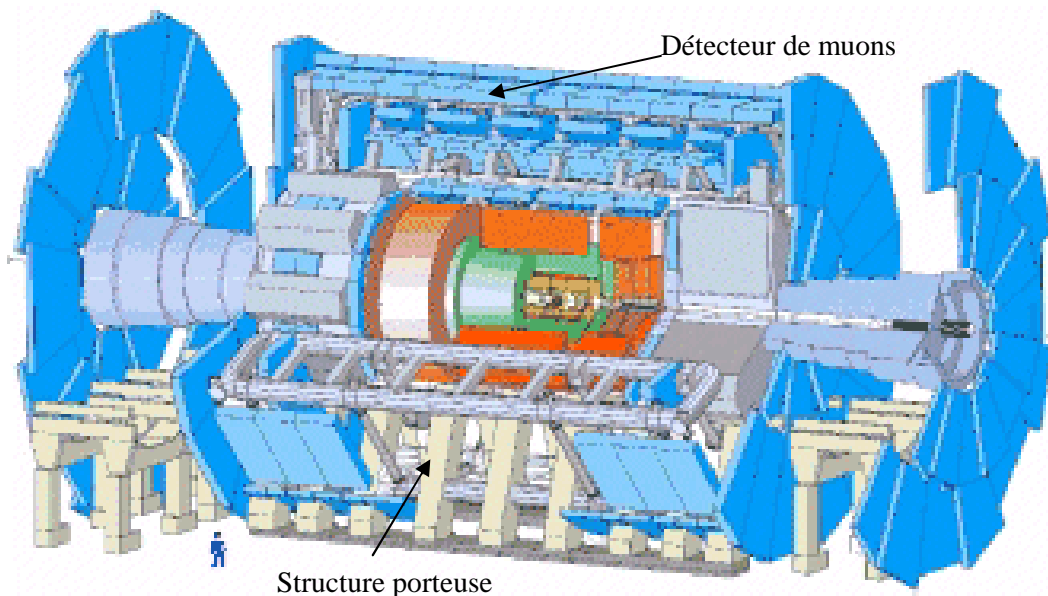


Figure 7: un écorché d'ATLAS laissant apparaître une partie de l'infrastructure. La représentation d'un homme indique la taille de l'instrument.

Le paragraphe suivant décrit plus en détails le détecteur de muons.

II-3.2 Le détecteur de muons

Situé sur les couches extérieures d'ATLAS, le spectromètre à muons est un assemblage de chambres à dérive représentant une surface de 5500 m², soit à peu près l'équivalent d'un terrain de football. Il est constitué de trois « cylindres » concentriques au milieu desquels se trouve l'aimant toroïdal, ainsi que de quatre bouchons placés aux extrémités.

La structure porteuse d'une chambre est constituée de deux poutres appelées « longitudinal beams » (poutres longitudinales) supportant trois barres d'aluminium, les « cross-plates » (poutres transversales) en leur milieu et aux extrémités. Les cross-plates servent de support pour des couches de tubes d'aluminium contenant un fil en leur axe de symétrie. La longueur de ces tubes varie de 1,5 à 4 m pour un diamètre de 30 mm, en fonction de la position de la chambre dans le détecteur. Au total, trois couches de tubes sont disposées en quinconce sur chaque face de la chambre (voir figure 8). Les chambres sont disposées de manière à ce que les lignes de champ magnétique soient dans l'axe des tubes. Ainsi, une particule animée d'une vitesse perpendiculaire aux faces de la chambre verra sa trajectoire déviée dans un plan orthogonal aux tubes.

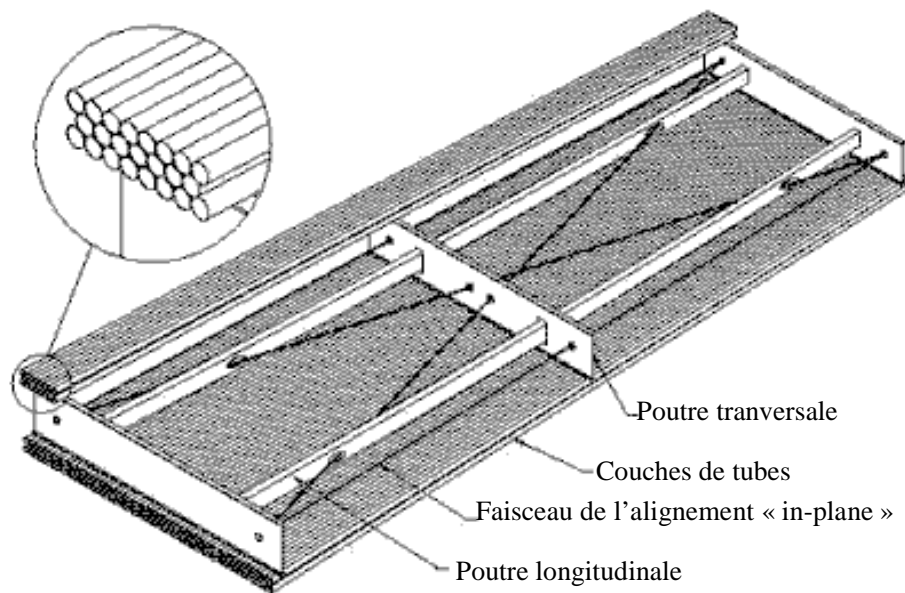


Figure 8: schéma d'une chambre à muons.

Chaque tube contient un gaz facilement ionisable. Une différence de potentiel est appliquée entre le tube et le fil permettant de créer un champ électrique dans le gaz. Lorsqu'un muon traverse un tube, il ionise le gaz en créant des paires électron-molécule de gaz. Les électrons se trouvent accélérés par le champ électrique régnant entre le tube et le fil. Dans leur trajet, ils percutent et ionisent d'autres molécules de gaz libérant des électrons, à leur tour accélérés.

Ce processus se répète et pour un muon ayant pénétré dans le tube, apparaît un pic de charge électrique sur le fil. Un muon traversant une chambre laisse sa « signature » dans chacune des faces de la chambre, constituant alors un vecteur témoin de la trajectoire du muon.

Disposer les chambres à muons sur trois couches espacées permet de relever trois vecteurs témoins de la trajectoire d'un muon. Avec ces trois vecteurs, les physiciens peuvent alors reconstruire le trajet des muons et mesurer leur impulsion. En effet, le rayon de courbure de la trajectoire est directement lié à l'énergie de la particule (si le champ magnétique est connu).

Ce principe de reconstruction de la trajectoire s'appuie sur une hypothèse de connaissance de la position des chambres les unes par rapport aux autres. C'est pourquoi le spectromètre à muons est équipé de capteurs d'alignement.

II-3.3 L'alignement.

Reconstruire la trajectoire des particules pour mesurer leur énergie requiert une connaissance de la position des chambres avec une incertitude de mesure de l'ordre de 30 μm (dans le cas des muons les plus énergétiques, ceci donne une incertitude de 10 % sur la connaissance de l'impulsion). Pour atteindre cet objectif, tout le spectromètre à muons est pourvu de différents capteurs répondant à différentes mesures d'alignement.

- L'alignement « in-plane » mesure les déformations d'une chambre à muons. Il utilise quatre systèmes Rasnik disposés dans les poutres transversales. Ainsi les déformations de type allongement, dues à des variations de température, ou torsions dues à la gravité peuvent être contrôlées par rapport à un état initial défini à la construction de la chambre sur un marbre plan.
- L'alignement « projectif » mesure la position des chambres de chaque couche du spectromètre à muons en regard du point d'interaction. Un ensemble de trois chambres alignées projectivement avec le point d'interaction est appelé une « tour ». L'alignement projectif mesure donc la géométrie des tours, en employant des systèmes Rasnik.
- L'alignement « Axial » consiste à vérifier la position des chambres le long du détecteur. Il fait également appel au système Rasnik. Sa configuration le rend très sensible aux déplacements dans les plans orthogonaux à l'axe faisceau, mais peu sensible pour des déplacements parallèles à l'axe du faisceau.
- Pour compléter l'Axial, un autre type d'alignement est défini : le « Praxial ». Il utilise encore une fois le système Rasnik disposé de telle sorte qu'il soit sensible aux déplacements dans l'axe du détecteur. Le Praxial (PRoximity AXIAL) mesure la position d'une chambre par rapport à la chambre immédiatement suivante.
- Dans le secteur très particulier des pieds, un dispositif spécifique est mis en place pour répondre à une géométrie « exotique » des chambres. Ce système est nommé « connexion BIR-BIM ». Comme tous les autres systèmes précédents, il utilise des capteurs Rasnik.

Les cinq types d'alignement cités ci-dessus ne concernent que le « tonneau », dont Saclay a la charge. La figure 9 montre les trajets optiques des alignements projectifs (en rouge) et axiaux (en bleu). D'autres systèmes d'alignement existent pour les « bouchons ». Ils utilisent des « B-cams », développés par nos collègues américains du Brandeis Institute de Boston. Le « système de référence », est une association de capteurs d'alignements permettant de lier les différents types d'alignement entre-eux.

En fonctionnement normal, toutes les données issues des capteurs d'alignement seront lues et enregistrées. La géométrie du détecteur étant connue à quelques mm près, elle sert de base à un calcul complexe de minimisation. L'ordinateur fait appel aux données théoriques puis, à l'aide de l'ensemble des mesures des systèmes d'alignement, il calcule plus précisément la position des chambres les unes par rapport aux autres et aussi par rapport aux bobines (par le « système de référence »).

Le chapitre suivant s'intéresse de plus près au système Rasnik sur lequel s'appuie tout l'alignement du barrel.

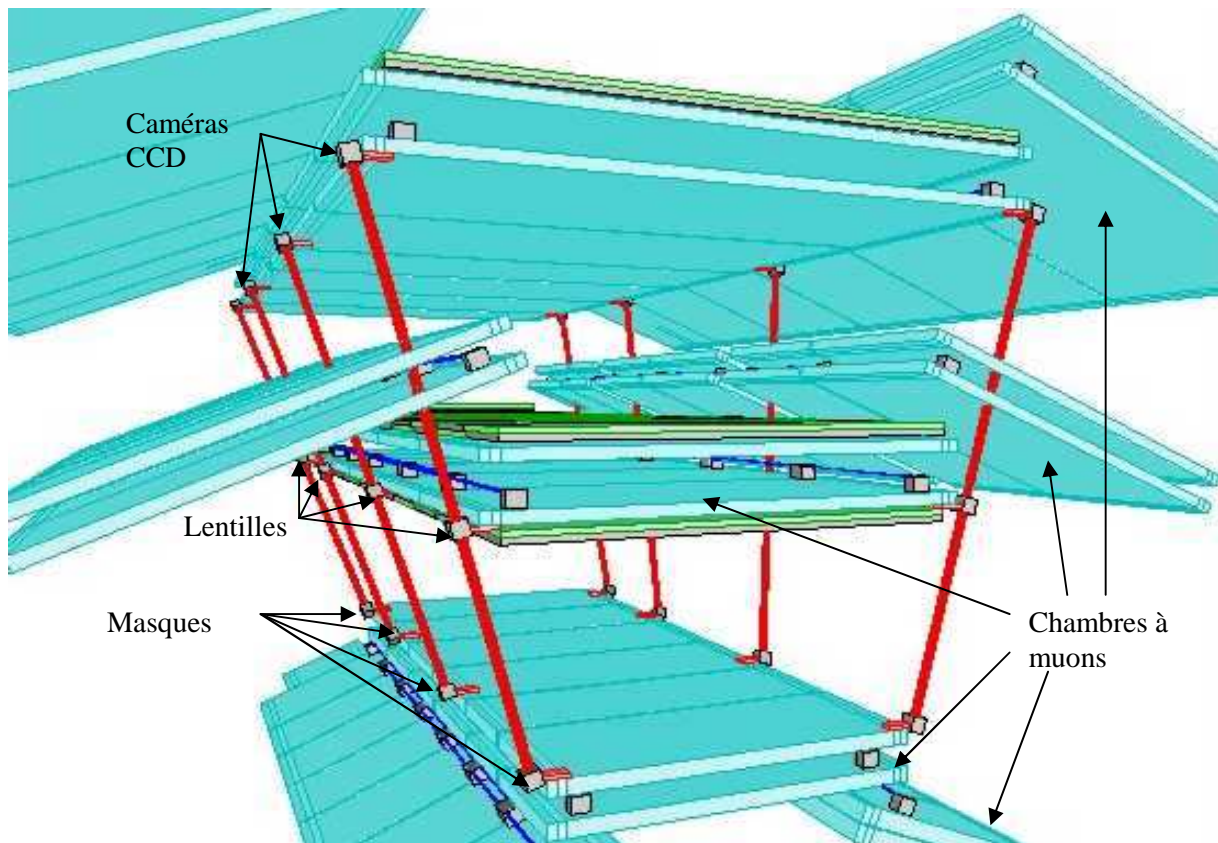


Figure 9: représentation des alignements projectifs (en rouge) et Axial/Praxial (en bleu)

II-3.4 Le système Rasnik.

Le système d'alignement Rasnik a été conçu et développé par l'institut NIKHEF d'Amsterdam. Rasnik est un acronyme pour infraRed Alignment System from NIKhef [7]. Ce capteur se base sur trois composants optiques simples et courants ce qui lui donne un coût peu élevé (voir figure 10).

- Un masque photolithographié sur lequel est tracé un damier (pas compris entre 120 et 340 μm) muni de figures fidussiennes est éclairé par des diodes infrarouges (880 nm) au travers d'un écran diffuseur (verre opalin).
- Une lentille est utilisée pour faire l'image du masque sur le capteur vidéo.
- Un capteur matriciel d'image de type CCD (Charge Coupled Device) ou CMOS (Complementary Metal Oxyde Silicon), permet de capturer l'image du masque et de l'analyser sur un micro-ordinateur. Les pixels, éléments constituant la matrice de détection, ont une taille de l'ordre de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$.

- Un micro-ordinateur, muni d'une carte vidéo et du logiciel adapté (Icaras), permet de calculer les coordonnées du point du masque vu par le centre du CCD, l'angle entre le masque et le capteur d'image ainsi que le grandissement optique du système. Avec des multiplexeurs adaptés, une station de travail peut lire jusqu'à 256 capteurs Rasnik.

En fonction du choix de la lentille et de la position des éléments optiques, le système Rasnik peut avoir une incertitude de mesure de $1\ \mu\text{m}$ sur des déplacements dans le plan du masque pour une étendue de mesure de $20 \times 20\ \text{mm}^2$. Cette étendue de mesure est directement liée à la taille du masque dont les substrats peuvent atteindre $100\ \text{mm}$ de côté. La conception de ce capteur en fait un système absolu. En effet, les figures présentes sur le masque se comportent comme des graduations. Dès la première mesure, le système fournit les coordonnées X et Y du point du masque vu par le centre du CCD, l'angle Θ_x entre les axes du masque et ceux du capteur matriciel et le grandissement g du montage. Cependant, les informations les plus précises concernent les déplacements dans le plan du masque. La mesure d'angle est obtenue avec une incertitude de $0,15\ \text{mrad}$ et celle du grandissement avec une incertitude de mesure relative de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$.

Le principal inconvénient de ce système est que l'on est incapable de savoir lequel des trois éléments a bougé. C'est par l'association de plusieurs systèmes que cette indétermination est levée.

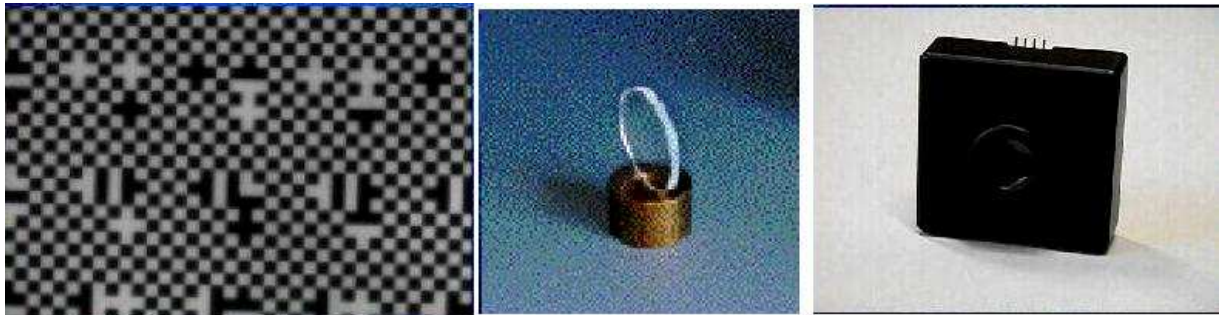
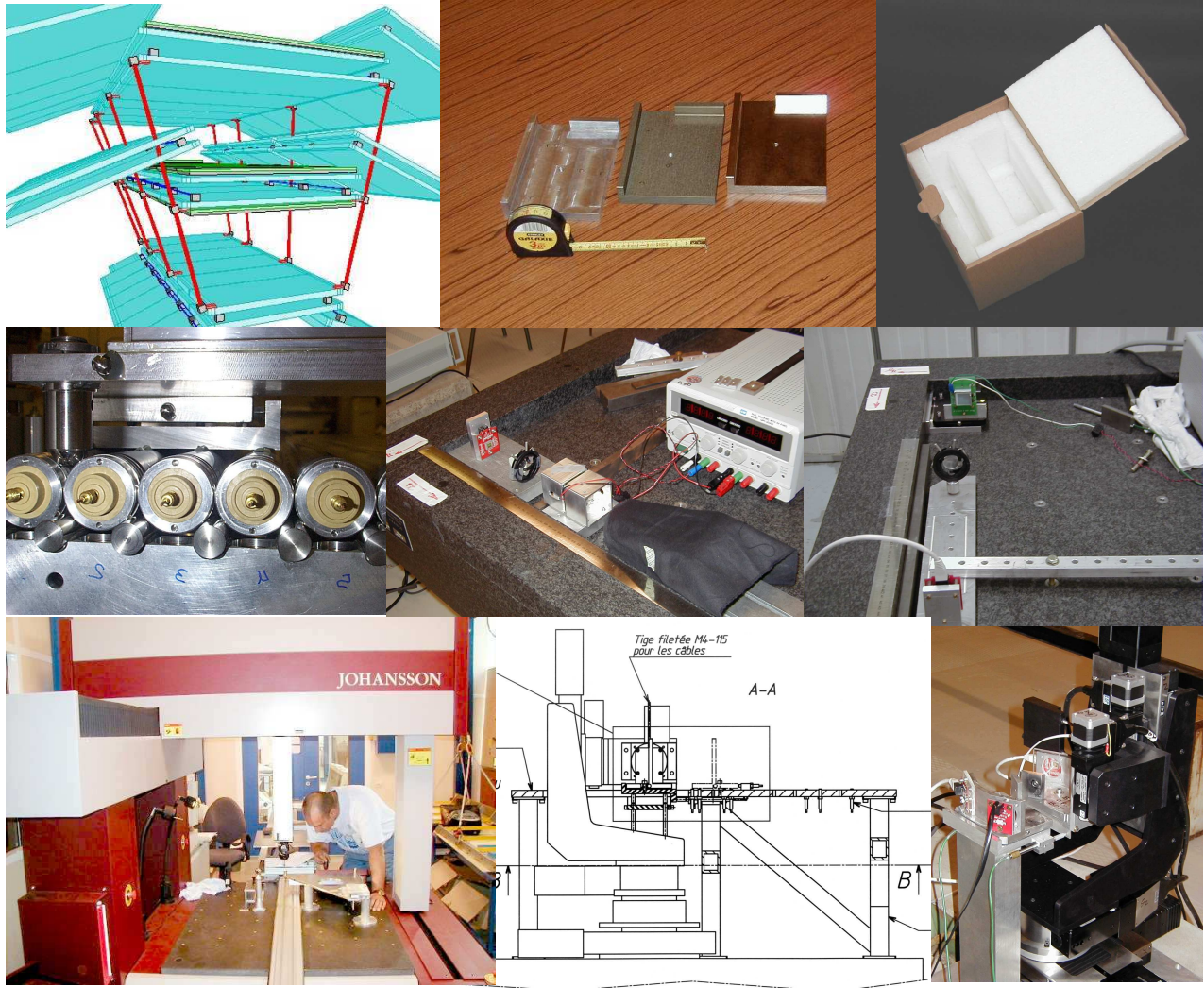


Figure 10: Les trois éléments optiques d'un Rasnik de gauche à droite : le masque vu par la caméra (pas d'un carré $170\ \mu\text{m}$), la lentille, le capteur d'image (matrice CCD $3 \times 4\ \text{mm}^2$).

DEUXIEME PARTIE : ETUDE



III : PRESENTATION.

III-1 L'alignement AXIAL/PRAXIAL.

Vu en coupe, le détecteur ATLAS ressemble à un polygone régulier à seize cotés. Les alignements axiaux (Axial et Praxial) servent à mesurer les déplacements des chambres d'une même face du polygone sur toute la longueur du détecteur. Ils sont tous deux fondés sur des systèmes Rasnik, utilisés dans des configurations géométriques différentes :

- Pour l'Axial, les éléments Rasnik sont disposés en quinconce dans l'axe du détecteur, c'est à dire que les axes optiques définis par la droite masque-lentille-CCD sont parallèles au tube faisceau. Cette configuration a une très bonne sensibilité aux déplacements en translation dans un plan perpendiculaire à l'axe optique et en rotation autour de l'axe optique, mais pas sur les autres mouvements qui font alors intervenir le grandissement optique. Chaque chambre est munie de quatre lignes Rasnik, soit deux sur chacun des petits cotés.
- L'existence de l'alignement Praxial est due à la mauvaise sensibilité de l'Axial pour des translations le long de l'axe optique du Rasnik ou des rotations autour des deux axes orthogonaux à l'axe optique. Pour cela, le capteur Praxial fait appel à deux systèmes Rasnik de courtes focales disposés en croix. Cette configuration croisée donne alors une bonne sensibilité là où l'Axial n'en a pas. Les chambres sont équipées aux quatre coins de capteurs Praxial.

La figure 11 montre un schéma de principe de l'installation des capteurs Axial/Praxial sur 4 chambres à muons successives. Les chambres sont délimitées par un trait noir fin. Sur la partie basse du schéma, ces capteurs ne sont pas visibles car ils sont situés entre les couches de tubes (traits bleus fins). Les traits rouges épais représentent la structure porteuse des chambres : poutres transversales et longitudinales. Les boîtes mauves représentent les platines sur lesquelles sont disposés les masques (en rouge), les lentilles (en vert) et les CCD (en noir). Le lecteur peut distinguer les éléments du Praxial (traits rouges croisés) des éléments de l'Axial (traits rouges parallèles).

Un côté de chambre est équipé d'un masque, d'une lentille appartenant à une ligne Rasnik Axial, d'une CCD appartenant à une seconde ligne Rasnik Axial ainsi que de deux ensembles masque-lentille-CCD du Praxial.

Les valeurs d'incertitudes de mesures souhaitées pour la partie Axial sont de $\pm 5 \mu\text{m}$ pour des translations perpendiculaires à l'axe faisceau (X et Y). La partie Praxial nécessite pour sa part d'avoir une incertitude de mesure de $\pm 5 \mu\text{m}$ pour les translations et $\pm 30 \mu\text{rad}$ pour les rotations. Ces incertitudes de mesures doivent être obtenues dans une étendue de $\pm 5 \text{mm}$ et $\pm 5 \text{mrad}$. Pour la connaissance de la position absolue des chambres, le besoin est de $\pm 25 \mu\text{m}$ pour les translations selon Y et Z. Pour les translations selon X (dans l'axe des fils), l'incertitude de mesure requise est moins importante : $\pm 200 \mu\text{m}$. Pour les mesures de rotations, l'incertitude de mesure doit être inférieure à $80 \mu\text{rad}$ selon X et Z, et de l'ordre de $200 \mu\text{rad}$ selon Y. Les axes cités ci-dessus sont représentés sur la Figure 11.

Nous allons à présent décrire plus précisément le capteur Praxial.

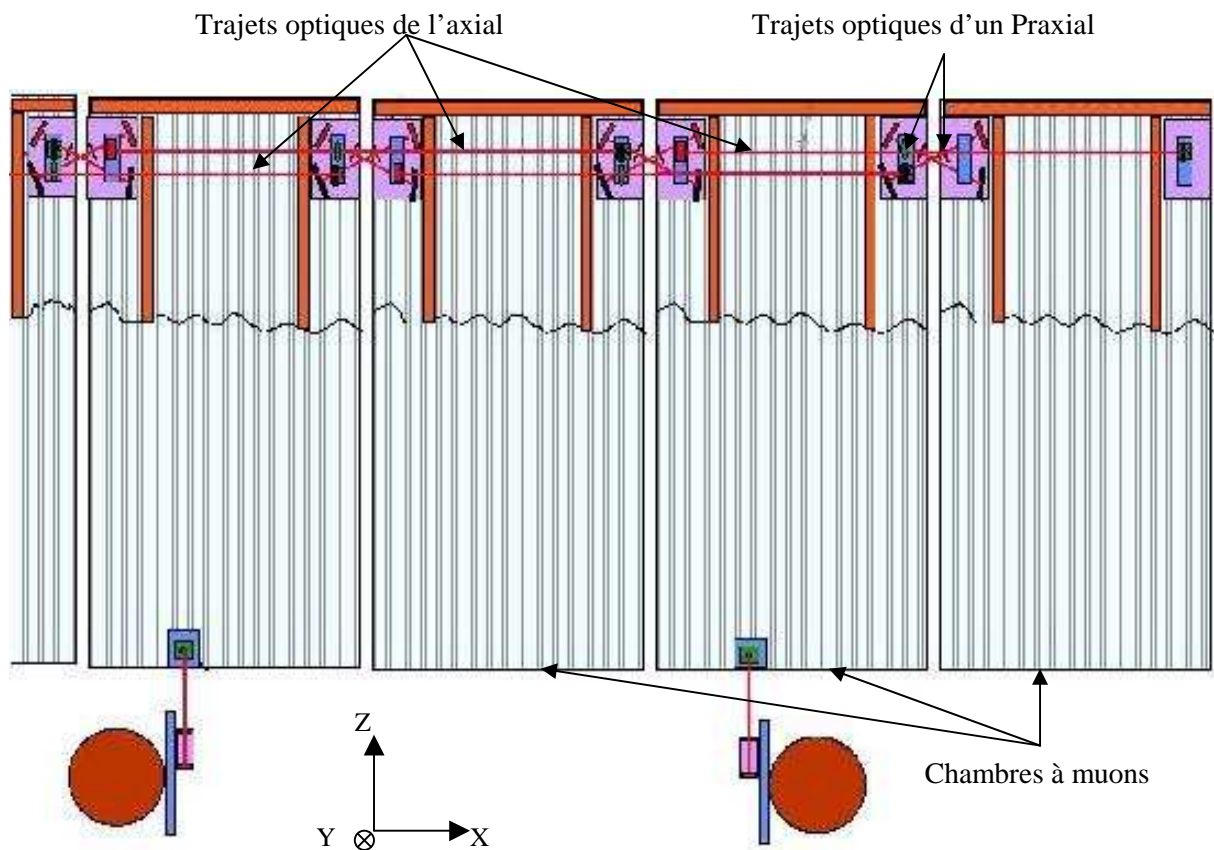


Figure 11: Schéma écorché des chambres avec les capteurs Axial et Praxial.

III-2 Le capteur Praxial.

Dans notre langage courant, nous utilisons indifféremment les mots « Axial » et « Praxial » pour désigner le capteur ou le type d'alignement ; le contexte éclaire le sujet. De ce fait, nous considérons ces mots comme invariables, et le lecteur ne devra pas s'étonner de voir écrit : « les capteurs Praxial ».

Un capteur Praxial est constitué de deux supports mécaniques symétriques appelés platines et de deux lignes Rasnik (masque, lentille et CCD). Sur chaque support, sont disposés le masque de l'un des systèmes Rasnik, la lentille et le CCD de l'autre système. Sur l'étage supérieur des supports mécaniques se trouvent les emplacements des éléments Axial. Compte tenu de la différence de configuration entre les Rasnik de l'Axial et du Praxial, l'association de deux supports mécaniques munis des deux systèmes Rasnik croisés est appelée capteur Praxial. La Figure 12 montre une étude d'un capteur Praxial complet, équipé en plus d'un masque et d'un capteur CCD de l'Axial. Le modèle représenté sur cette figure n'est pas la version définitive car nous l'avons fait évoluer de manière à en réduire le coût. La version définitive apparaît dans le chapitre VIII-3, consacré aux études mécaniques. Les traits rouges de la figure 12 représentent les trajets optiques des systèmes Rasnik pour les alignements Axial et Praxial. Dans une utilisation normale, l'une des platines est fixée sur un coin d'une chambre tandis que l'autre est attachée à la chambre immédiatement successive, comme le montre la Figure 11.

Pour l'alignement du « tonneau », 1200 capteurs Praxial seront utilisés, ce qui représente 2400 platines. Ces platines reposent sur des appuis plan-trait-point définis par 6 billes en acier inoxydable. Elles sont fixées sur les chambres par l'intermédiaire de plates-formes, pièces d'aluminium en forme de coin de cube, sur lesquelles viennent se loger les 6 billes de référence. Les déplacements de la chambre sont alors mesurés par les capteurs Praxial au travers des plates-formes.

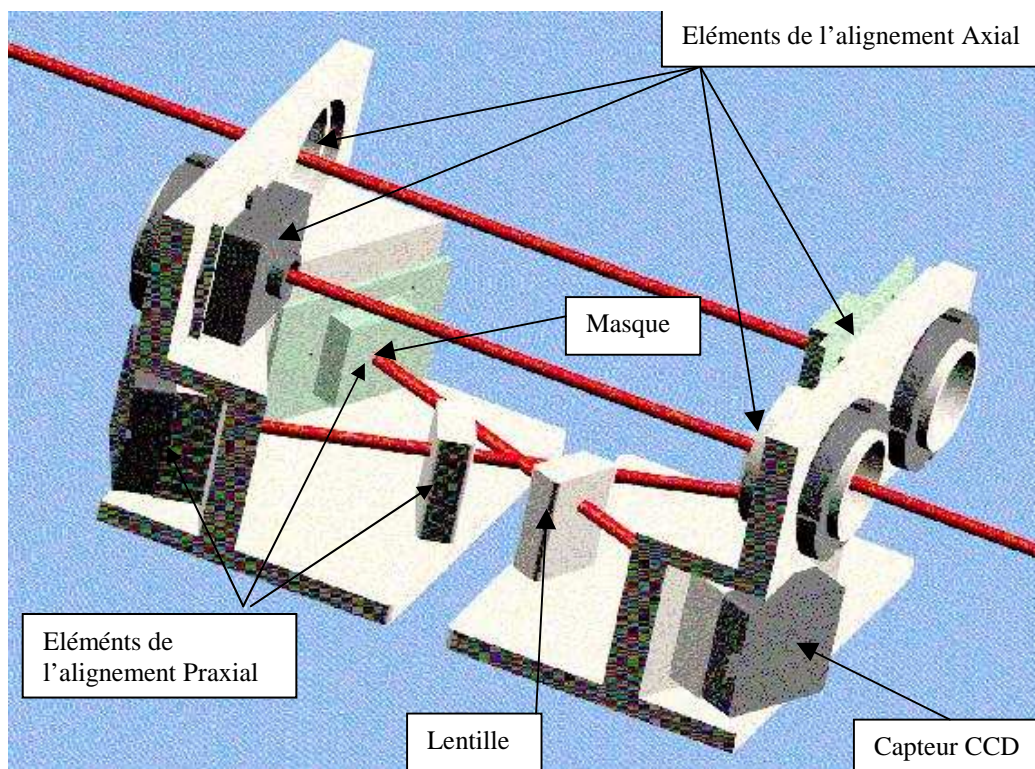


Figure 12: un capteur Praxial, constitué de deux platines symétriques. Les éléments supérieurs appartiennent à l'Axial.

III-3 Sujet.

Lors d'un déplacement, chaque ligne Rasnik du capteur Praxial va fournir 4 mesures : ΔX , ΔY , $\Delta \Theta_x$ et Δg le grandissement, dans un repère propre à cette ligne. A partir de ces 8 mesures brutes issues du capteur, nous devons déterminer les valeurs des déplacements d'une chambre par rapport à sa voisine dans un repère lié à la chambre. Il faut donc trouver un moyen de transcrire les mesures Rasnik en mesures exploitables pour les physiciens.

Le sujet de l'étude porte sur la réalisation d'un banc permettant de faire une opération « d'étalonnage » pour les capteurs Praxial. Ce banc a été nommé CALIPRAX. Par définition, un étalonnage correspond à l'opération qui consiste en la comparaison entre la valeur mesurée par un capteur, et la valeur vraie ou supposée connue du mesurande. Le banc Caliprax n'effectue pas cette opération. Par abus de langage, la communauté des personnes travaillant sur le projet nomme « calibration » (mot francisé) l'opération qui va permettre d'exploiter les mesures des Rasnik pour calculer les déplacements d'un Praxial. Nous verrons par la suite que derrière cet étalonnage se cache en réalité une minimisation d'un χ^2 .

Compte tenu du nombre de capteurs à fournir pour ATLAS, ce banc doit être semi-automatisé, de manière à pouvoir être exploité par un opérateur quelconque. A l'issue de cette

opération, le capteur doit avoir une incertitude de mesure inférieure à 5 μm avec une étendue de ± 5 mm pour les mesures de translations, et inférieure à 30 μrad avec une étendue de ± 5 mrad pour les rotations. Le principe de l'étalonnage sera décrit dans le paragraphe V.

Le point de départ du travail effectué sur ce banc est une pré-étude à laquelle j'ai participé, menée par Florent Baglina, élève ingénieur au CEFIPA en 2000. Son travail a abouti au concept du banc tel qu'il a été construit [8]. Dans un premier temps, il était envisagé d'acheter un actionneur très précis permettant de déplacer la plate-forme mobile sur les six degrés de liberté (quelques μm d'incertitude de positionnement dans un cube de 12 mm de côté). Une solution « hexapode » a été étudiée mais après un audit du constructeur, cette option s'est avérée inenvisageable. En effet, l'incertitude de positionnement annoncée n'est tenue que sur de très petits déplacements. Nous avons alors opté pour un ensemble motorisé six axes moins précis, mais dont nous contrôlerions la position par des capteurs de déplacement à définir (lacet, tangage roulis < 120 μrad ., mouvements parasite < 50 μm). C'est à ce moment précis que j'ai pris en charge l'étude puis la réalisation du banc. C'est donc un rôle de chargé d'affaires que j'ai tenu dans la période été 1999-automne 2000.

Pendant la phase de transition entre le travail de Florent Baglina et de moi-même, le banc « théorique » tel que nous le concevions était constitué :

- d'une plate-forme mobile mue par des tables motorisées,
- de plates-formes fixes disposées sur un support mécanique, correspondant aux différents écartements rencontrés dans ATLAS,
- de capteurs de déplacement,
- de sondes de température,
- d'un système d'identification à codes-barres,
- d'un micro-ordinateur programmé pour assurer le contrôle et la commande de l'ensemble et calculer les paramètres propres à chaque capteur.

Tout cela n'était qu'un concept, il restait à réaliser et à faire fonctionner l'ensemble.

Par ailleurs, des travaux connexes à l'étude se sont greffés au cours de l'année. Si le réglage des outils de positionnement des plates-formes et les mesures de répétabilité de positionnement des platines dans les plates-formes ne concernent pas directement le banc Caliprax, ils sont cependant indispensables à l'intégration des Praxial dans ATLAS. J'ai donc élargi mon étude à tout ce qui convergeait vers le bon fonctionnement du capteur Praxial. Nous allons débiter la description des travaux par ces études connexes et en premier lieu, le réglage des outils de positionnement.

IV : ETUDES PRELIMINAIRES.

IV-1 Les outils de positionnement.

IV-1.1 Utilisation.

Le principe de l'identification des particules nécessite de connaître de façon très précise leur trajectoire. Or pour cela, il faut connaître la position des chambres, leurs déplacements et leurs déformations. Les différents systèmes d'alignement utilisés sur l'expérience visent à contrôler tous ces paramètres. Ils supposent cependant que la position des capteurs sur les chambres est elle-même connue. Pour cela, les bureaux d'études mécaniques travaillant sur la construction du détecteur ont conçu et réalisé des outils d'aide au positionnement des plates-formes sur les chambres.

La construction d'une chambre à muons se décompose d'une manière générale selon les étapes décrites ci-dessous. Toutefois, la fabrication des quelques 600 chambres réparties en 8 types différents est distribuée dans plusieurs instituts appartenant à plusieurs pays. Chacun a développé sa propre gamme de montage en fonction de la taille des chambres à construire et des moyens dont il disposait.

1. Les tubes sont collés entre eux en étant maintenus sur des peignes permettant de conserver un écart constant entre chaque tube. A chaque extrémité des tubes, un bouchon nommé « end-plug » et usiné précisément garantit le placement précis du fil selon l'axe du tube. Il assure également l'étanchéité. L'ensemble repose sur un marbre qui garantit la planéité de la chambre.
2. Sur cette première couche de tubes, les équerres de positionnement sont placées afin d'effectuer le collage des plates-formes.
3. Après séchage de la colle, les équerres sont ôtées, et les poutres longitudinales et transversales (voir figure 8) sont collées sur les tubes.
4. La première couche de tube, collée sur la structure, est retournée pour effectuer le collage de la première couche de tubes sur la seconde face.
5. Par retournements successifs, les trois couches de tubes sont assemblées sur chaque face.

Les outillages de positionnement sont des équerres en « L » que nous disposons aux quatre coins d'une chambre. Chaque équerre prend appui sur la chambre au travers de deux sphères et d'un couteau. La première sphère, appelée « sphère end-plug », vient se loger entre deux bouchons « end-plugs » (voir figure 13). La seconde sphère se place entre les deux tubes dont les bouchons servent de support à la première sphère. L'appui couteau se place alors sur le sommet d'un tube décalé d'une quarantaine de centimètres de la première sphère. L'équerre se situe alors dans un plan parallèle au plan des tubes. L'écartement entre ces plans doit être réglé de manière à ce qu'une plate-forme fixée sous l'équerre vienne affleurer les tubes. Une couche de 200 à 300 μm de colle placée sous la plate-forme vient se fixer sur les tubes lorsque l'équerre est en place. Une équerre est choisie comme origine et sa position le long des tubes est déterminée par des appuis ponctuels qui prennent pour référence le marbre sur lequel la chambre est assemblée. La position des trois autres équerres est déterminée par rapport à la première par l'intermédiaire d'entretoises. Les figures 14 et 15 illustrent la mise en place des équerres sur une chambre et le dessin d'une équerre.

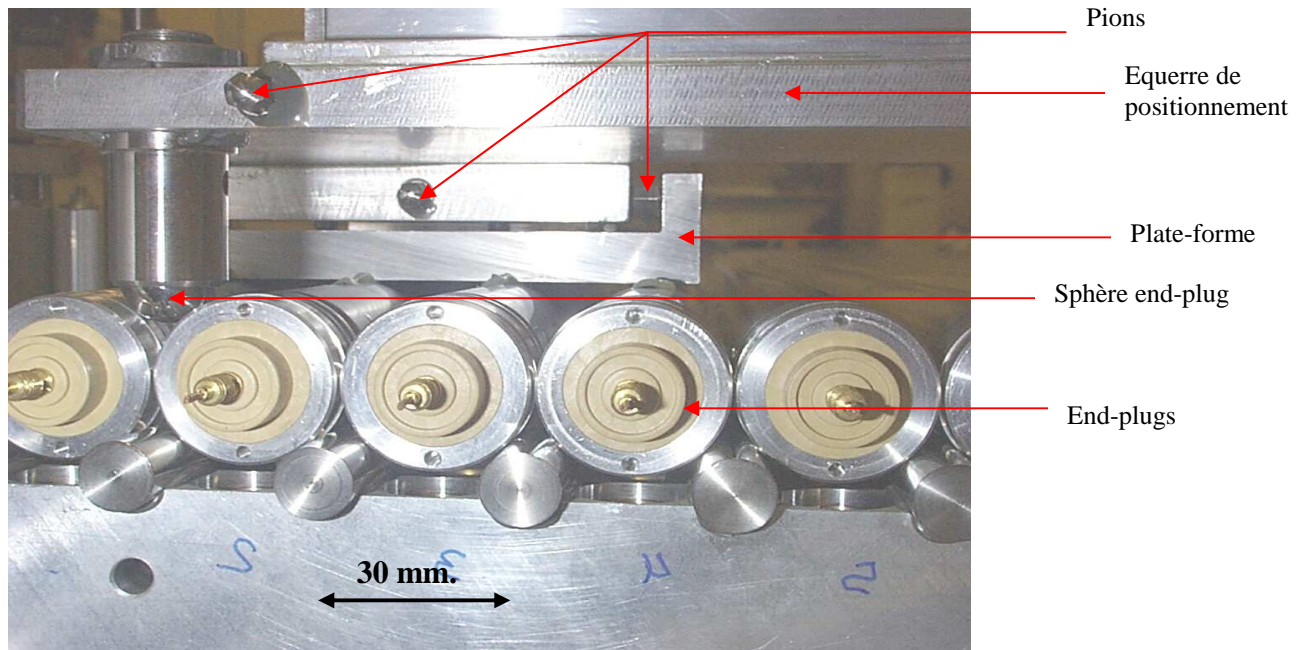


Figure 13: collage d'une plate-forme sur les tubes

La Figure 13 montre une plate-forme en cours de collage sur les tubes. Le lecteur peut voir sur la partie supérieure de la photo l'équerre de positionnement (couleur aluminium) sur laquelle on distingue les pions de réglage. Les end-plugs (couleur dorée) servent de support à la sphère end-plug sur le côté gauche. La plate-forme est collée sur les tubes au moyen d'une couche de colle (de couleur grise, au sommet des tubes). Les tubes sont maintenus à un pas constant avec un « peigne » qui repose sur une marbre.

Nous allons maintenant expliquer le réglage de ces outils et les problèmes rencontrés pendant cette période.

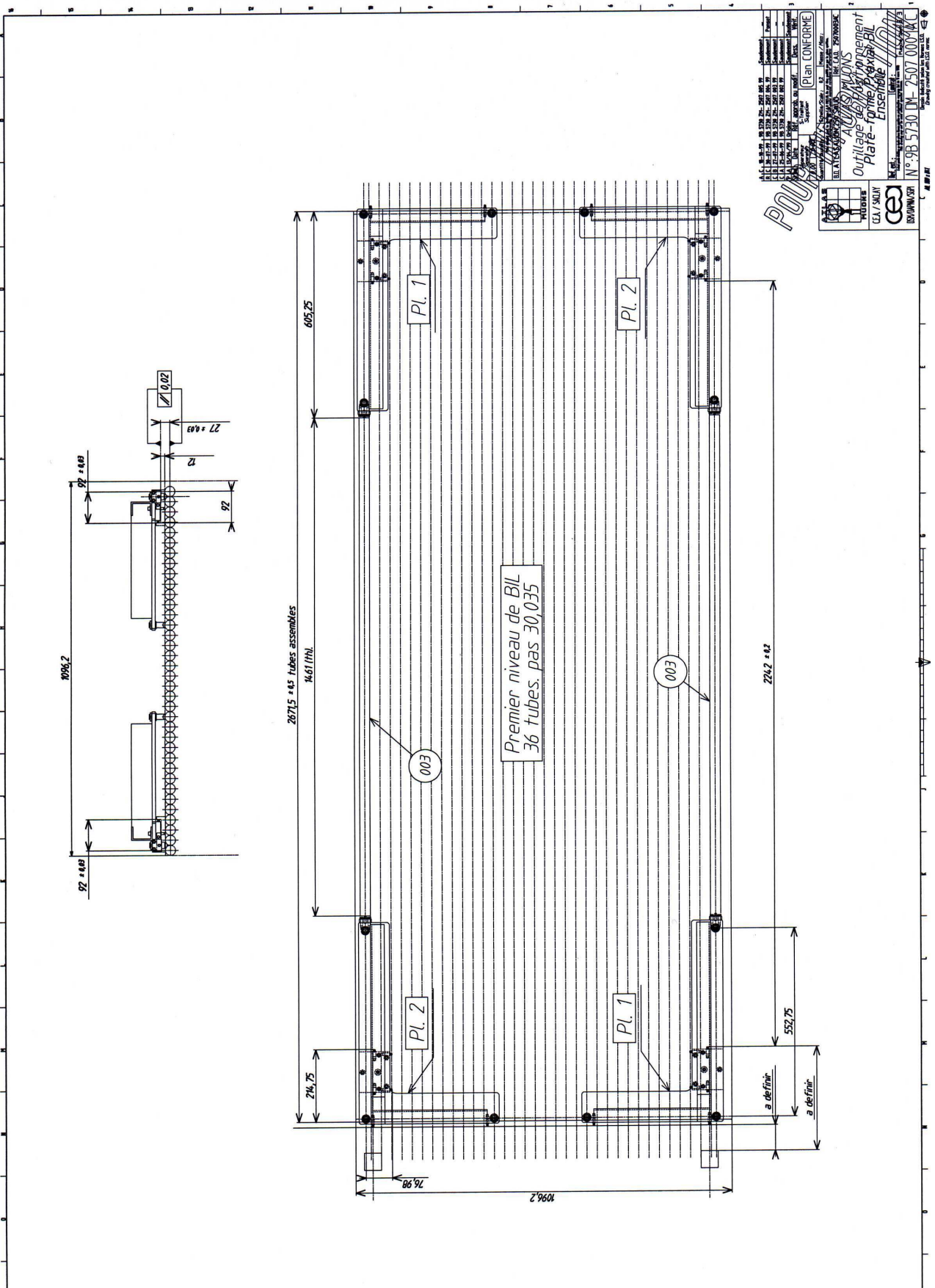


Figure 14: les 4 équerres disposées sur les tubes d'une chambre à muons.

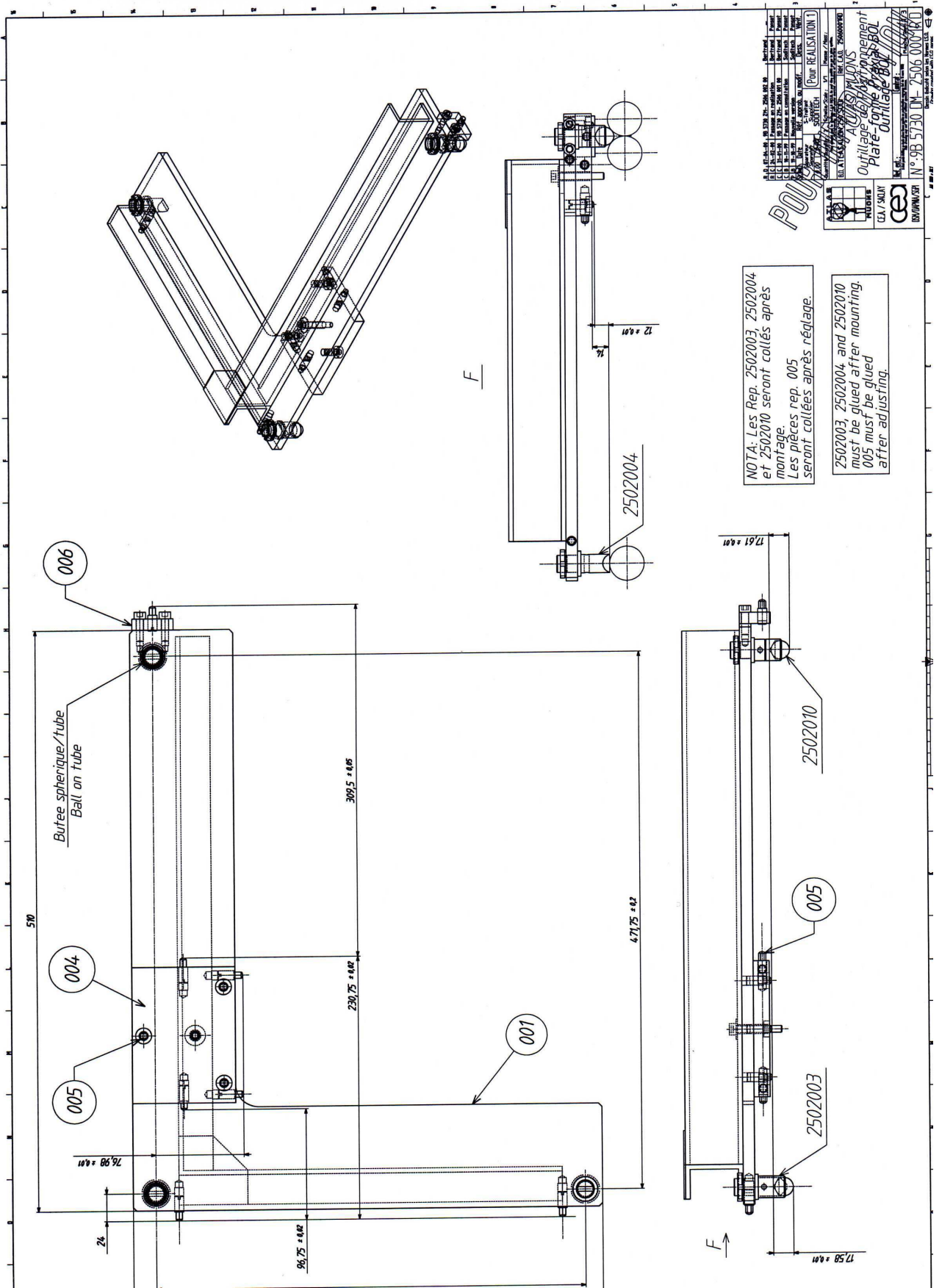


Figure 15: dessin d'une équerre avec les cotes à respecter lors des réglages.

IV-1.2 Essais de réglage.

En se référant au dessin de la Figure 14, nous pouvons nous rendre compte que le positionnement des plates-formes sur une chambre fait intervenir des chaînes de cotes assez longues et dépendantes les unes des autres. Lors de l'étude des équerres, la prise en compte des tolérances de positionnement rendait la fabrication de tels outils onéreuse. Il a donc été décidé de fabriquer les équerres réglables grâce à des appuis ponctuels faits de vis à portée sphérique avec un pas fin. Ces appuis réglables sont appelés des pions. Chaque équerre dispose de 10 pions numérotés de P1 à P10. Le réglage des pions était confié aux industriels qui ont fabriqué les équerres.

Souhaitant vérifier les outils avant de les expédier chez les fabricants de chambres, nous avons procédé à un contrôle en posant les équerres sur un marbre plan et en utilisant des cales d'épaisseur. Ces contrôles auxquels nous accordions une totale confiance montraient que la grande majorité des réglages était hors tolérance. Nous avons donc entrepris de régler les pions aux cotes nominales par la même méthode que celle employée pour le contrôle.

Malheureusement, cette méthode a rapidement prouvé ses limites par l'incertitude de mesure estimée entre 20 et 30 μm pour une valeur souhaitée de 10 μm . Par ailleurs, sa mise en œuvre ne permettait pas de régler aisément tous les pions.

Dans un second temps, nous avons fait appel à des collègues de L'IN2P3 du Centre National de la Recherche Scientifique de Jussieu (IN2P3 : Institut National de Physique des Particules et de Physique Nucléaire) qui disposent d'une machine de mesure tridimensionnelle au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire d'Orsay (LAL). La machine sur laquelle nous avons travaillé est le modèle Saphir, fabriqué par la société Johansson. Elle est équipée d'une tête de mesure de la marque Rénishaw munie d'un palpeur pouvant tourner sur deux axes. Cette machine est placée dans une salle climatisée à (20 ± 1) °C. Elle est pourvue d'un thermomètre pour corriger les mesures en fonction de l'évolution de la température ambiante. Le logiciel d'exploitation fonctionne sous environnement UNIX. Le marbre de mesure a une surface d'environ 1 m² mais le volume utile pour les mesures est approximativement 0,8 m*0,8 m*0,6 m. Dans ce volume, l'incertitude de mesure atteinte est de l'ordre de 10 à 15 microns. Les heures d'utilisation pour nos mesures devaient s'inscrire dans les moments de disponibilité laissés par le projet « propriétaire » de la machine : la mesure des absorbeurs du calorimètre électromagnétique d'ATLAS. Les créneaux horaires limités combinés à la nécessité de faire appel à un opérateur du LAL ne donnaient pas beaucoup de souplesse pour nos mesures. Par ailleurs, la machine étant utilisée pour mesurer les absorbeurs d'ATLAS, son installation est optimisée pour ces objets et comporte un rail de guidage au milieu du marbre de référence. Lors de nos mesures, nous devions brider les équerres sur une plaque métallique, elle-même fixée sur le rail de guidage.

Si l'utilisation d'une machine de mesure tridimensionnelle nous garantissait une meilleure exactitude dans nos mesures, celle-ci était fortement détériorée par le montage mécanique auquel nous devons nous adapter. Le retour d'expérience nous a révélé ces problèmes. En effet, nous avons effectué le réglage de quelques jeux d'équerres dans ces conditions. Lorsque nous avons donné les outils de positionnement aux instituts fabricant les chambres, certains d'entre eux ont pris la précaution de les vérifier sur des outils de contrôle dimensionnel. Le verdict est tombé rapidement : les outils que nous étions supposés régler n'étaient pas aux bonnes cotes.

N'ayant pas déréglé les 32 équerres, nous avons demandé à un service de métrologie du CEA d'effectuer un contrôle sur deux outils de deux types différents.

Nous avons pu assister aux mesures et interagir avec l'opérateur. Nous avons ainsi discuté de la détermination du repère machine et de l'exploitation des résultats. Les mesures sont faites avec une machine de mesure tridimensionnelle ZEISS, dont l'opérateur a contrôlé l'incertitude de mesure à 5 μm . A l'issue de cette journée de mesure, nous avons gardé les deux équerres pour s'en servir de référence et pouvoir les comparer aux autres méthodes utilisées jusqu'à présent.

Parallèlement, nous avons passé un accord avec le personnel de l'IN2P3 au LAL d'Orsay. En échange des heures passées et à venir pour l'utilisation de la machine, nous avons financé l'achat d'une tête optique pour équiper leur machine tridimensionnelle. Par ailleurs, les responsables de la machine ont proposé à l'équipe projet de former une ou deux personnes du CEA à son emploi. Cette proposition nous permettait alors d'être autonomes dans les créneaux horaires disponibles de la machine.

Je me suis porté volontaire pour être l'un des candidats à la formation. Cette démarche m'intéressait pour plusieurs aspects :

- l'élargissement de mes connaissances d'une manière générale,
- l'application en métrologie dimensionnelle, fortement liée au cursus suivi au CNAM
- la formation à l'utilisation d'une machine tridimensionnelle en tant qu'appareil de mesures qui m'était jusqu'à présent inconnu,
- le contact et les échanges avec des personnes du CNRS travaillant sur une autre partie d'ATLAS.

IV-1.3 Réglages définitifs.

C'est avec Patrick Magnier, un technicien du Service d'Instrumentation Générale que j'ai participé à trois journées de formation dispensées par l'un des utilisateurs habituels de la machine. Mécanicien de formation, il a multiplié les expériences au cours de sa carrière. La complémentarité de nos profils a donné une grande efficacité à notre binôme. Mon collègue a suivi avec attention la manipulation de la machine et tous les aspects matériels. Pour ma part, j'ai en plus acquis la programmation de celle-ci afin d'avoir une plus grande liberté quant aux types de mesures que nous aurions à effectuer.

Après cette période de formation, nous avons pu disposer assez fréquemment de la machine pour perfectionner notre apprentissage. Nous avons également pu discuter avec les responsables des mesures d'absorbeurs pour définir des plages horaires régulières pour effectuer nos mesures. Rapidement, nous avons pu disposer de la machine plusieurs demi-journées par semaine.

Nous avons alors repris à notre charge le réglage des outils de positionnement. Nous avons commencé par optimiser la procédure de contrôle. Pour cela, P. Magnier a fabriqué des supports mécaniques rigides permettant de fixer plus directement les équerres au marbre.

J'ai créé un programme de mesure des équerres dans lequel je définis un système d'axes lié à la pièce. Ainsi avec un repère local (différent de celui de la machine), les mesures sont plus facilement exploitables. Les résultats de mesures étant directement inscrits dans les registres du programme source, nous copions ce programme autant de fois qu'il existe d'équerres différentes. Ceci nous permet de conserver en mémoire la forme de chaque outil dès qu'il a été mesuré une fois, au cas où nous aurions à le contrôler ultérieurement. La Figure 16 montre une équerre placée sur le marbre de la machine. Nous pouvons y voir les pieds permettant

d'éviter le rail de guidage utilisé par nos collègues du CNRS et de fixer l'équerre directement au marbre ainsi que la sphère de référence juste à gauche du rail.

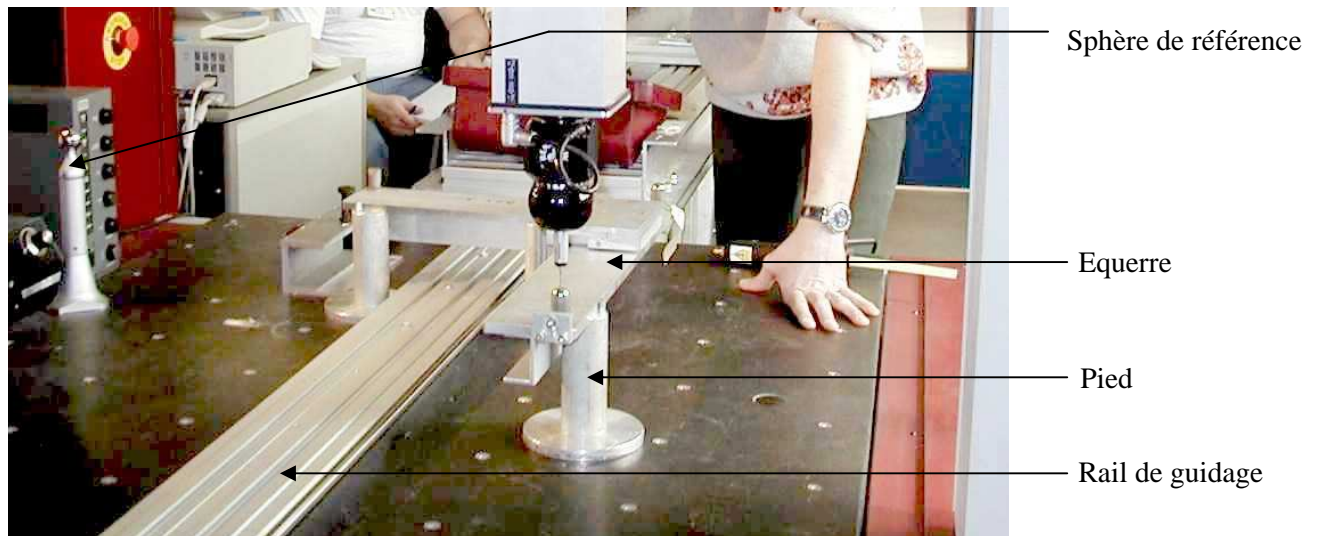


Figure 16 : réglage d'une équerre sur la machine tridimensionnelle du LAL d'Orsay.

A partir du moment où le programme est écrit et l'équerre fixée sur le marbre, le réglage d'un outil passe par les étapes suivantes .

1. Phase de calibrage de la machine. Cette étape consiste à palper une sphère de référence avec toutes les orientations du palpeur utilisées pour la mesure d'une équerre. Le diamètre de la sphère de référence étant connu avec une très faible incertitude ($<1 \mu\text{m}$) et sa position fixe, nous pouvons donc corriger les mesures faites avec chaque orientation du palpeur. Ceci permet de ramener les informations X, Y et Z des règles optiques aux coordonnées de la pointe du palpeur.
2. Phase d'apprentissage. Cette appellation désigne une étape pendant laquelle tous les points à mesurer sont palpés pendant que nous pilotons la machine en mode manuel. Nous renseignons la machine sur les points de mesure mais aussi sur les points intermédiaires qui indiquent le trajet à suivre pour aller d'une mesure à la suivante, en évitant des obstacles. Cet apprentissage commence par les éléments nécessaires à la construction du repère local. Il se poursuit par la mesure des pions P1 à P10 et se termine par une vérification des éléments de base du repère. Ainsi, nous pouvons déterminer si la pièce a bougé pendant la mesure. Cette vérification constitue un critère d'acceptation ou de rejet de la mesure.
3. Phase de mesure automatique. Durant cette phase, la machine répète de façon autonome la séquence de mesure telle que nous lui avons indiqué dans le mode apprentissage. Elle permet de palper tous les points de mesure avec une vitesse d'approche constante. Cette phase correspond à la prise de données. Les coordonnées de tous les points de mesures et des points intermédiaires sont sauvegardés dans les registres du programme exécuté.
4. Edition et analyse du rapport. Le fichier de sauvegarde est traité de manière à imprimer clairement sur un rapport les résultats qui nous intéressent. En comparant le rapport de mesures au plan de fabrication de l'équerre, nous déterminons quels sont les pions à régler.

5. Décollage. Les pions étant par défaut collés, nous devons les décoller avant de pouvoir les ajuster. La nature de l'adhésif nous impose de le chauffer localement pour le brûler et l'extraire. De ce fait, nous devons laisser refroidir la pièce avant tout réglage. Nous profitons de ce temps « mort » pour répéter les étapes 2, 3 et 4 sur une nouvelle pièce.
6. Mesure automatique. Les pions ayant été chauffés pour en défaire la colle, nous devons recommencer une mesure de la pièce pour connaître les valeurs des corrections que nous devons apporter. L'apprentissage ayant déjà été fait, il n'est pas nécessaire de le recommencer.
7. Réglage. Avec le dernier rapport de mesures, nous savons quel pion doit être réglé et la valeur de la correction à faire. Nous plaçons un palpeur numérique sur le pion et vissons ou dévissons jusqu'à obtenir la bonne correction. Nous répétons cette opération pour tous les pions à régler en se donnant une tolérance de $\pm 10 \mu\text{m}$.
8. Mesure automatique. Nous contrôlons l'effet des réglages en effectuant une nouvelle mesure automatique. Si tout est bon, nous passons à l'étape suivante, sinon nous répétons la phase 7.
9. Collage. Maintenant que tous les pions sont à la bonne cote, nous immobilisons les réglages en collant les filetages des pions.
10. Mesure automatique. Nous mesurons une dernière fois l'équerre pour s'assurer que rien n'a bougé (rétreint de la colle, mouvement d'un pion pendant le collage).

Avant d'établir cette procédure, nous avons mesuré les deux équerres qui étaient passées dans le laboratoire de métrologie du CEA-BIII. Nos mesures étaient compatibles à mieux que $10 \mu\text{m}$ avec celles de référence. Pour se conforter encore, nous avons demandé au BNM-LNE (Bureau National de Métrologie, Laboratoire National d'Essais) de faire également un contrôle dimensionnel de ces pièces. Nous nous sommes servis des mesures du LNE comme référence. Celles de BIII et les nôtres étaient compatibles dans une fourchette de $\pm 20 \mu\text{m}$ pic à pic. Il est intéressant de noter que le LNE a procédé à un véritable calcul d'incertitudes et donnait une incertitude de $15 \mu\text{m}$ sur les résultats annoncés. L'opérateur du laboratoire de Bruyères-Le-Châtel annonçait une incertitude de mesure contrôlée de $5 \mu\text{m}$ dans le volume utile de la machine. De notre côté, nous avons confiance en nos mesures avec une incertitude estimée d'environ 15 à $20 \mu\text{m}$.

En tenant compte de la disponibilité de la machine, des temps de refroidissement et de séchage de la colle, nous estimons que le réglage complet d'un jeu de quatre équerres prend quasiment une semaine. Dans la période de mon mémoire, mon collègue et moi avons correctement réglé les huit jeux d'équerres, hormis une erreur due à un cas particulier de cote.

IV-1.4 Contrôle final.

Les équerres de positionnement sont utilisées pour coller les plates-formes des capteurs Praxial sur les tubes des chambres. Pour s'assurer du positionnement correct des plates-formes par rapports aux tubes, nous avons contrôlé quelques chambres avec un tomographe à rayons X [9].

Cet appareil, basé au CERN, à Genève, est utilisé sur le projet ATLAS, pour contrôler les chambres à muons. Il mesure la position des fils à l'intérieur des tubes avec une incertitude de mesure de 10 μm .

Le tomographe utilise deux faisceaux de rayons X contenus dans un plan et formant un angle connu. Ces faisceaux sont émis par deux têtes solidaires d'un même support mobile. Les déplacements des têtes émettrices sont mesurés par le biais de trois interféromètres laser. Sous la chambre, dans l'axe des faisceaux X, deux scintillateurs couplés à deux photo-détecteurs délivrent chacun un signal proportionnel au flux de rayons X reçu. Lorsque les faisceaux parcourent la chambre, le relevé du signal issu des scintillateurs témoigne des matériaux rencontrés. Par le choix d'un niveau d'énergie des rayons X adéquat (entre 30 et 50 keV), l'absorption du matériau des tubes (aluminium) est très inférieure à celle du matériau des fils (tungstène). En corrélant les signaux des scintillateurs avec les déplacements des faisceaux, il est possible de mesurer la position des fils sur une chambre. Cette méthode correspond à une mesure « passive », par opposition à la mesure active. Dans ce dernier cas, les fils sont alimentés en haute tension et lorsqu'un faisceau interagit avec un fil, il apparaît un pic de charge sur celui-ci (fonctionnement nominal d'une chambre). Pour plus de renseignements sur le fonctionnement sur le tomographe, le lecteur est invité à se reporter à la référence bibliographique [9].

Dans notre cas, nous avons fabriqué un outil répondant aux particularités de la mesure par tomographie. Le but de notre contrôle est de connaître la position des plates-formes par rapport à la chambre (aux fils). Pour cela, nous avons réalisé une pièce munie de 4 fils dont le tomographe mesurera la position relative par rapport aux fils de la chambre (voir figure 17). Notre outil est muni de la même interface qu'un capteur Praxial : 6 billes définissant des appuis plan-trait-point.

Par ailleurs, le principe de la mesure, fondé sur des coefficients d'absorption différents entre les matériaux nous a imposé le choix de ceux-ci. La structure de l'outil est composée d'aluminium et de carbone, tandis que les fils sont en tungstène.

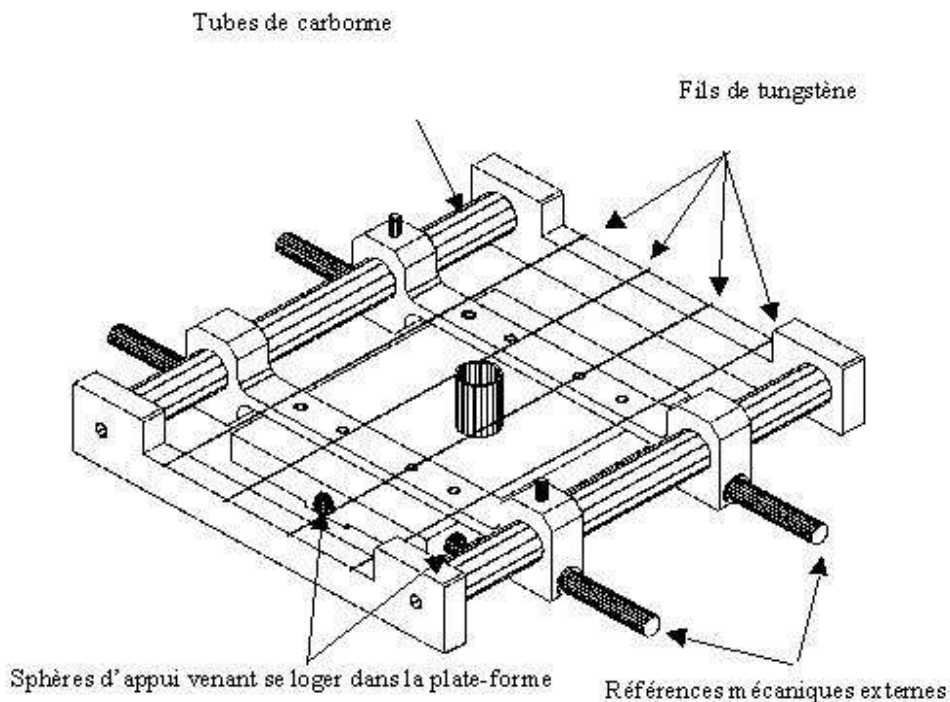


Figure 17: Outil fabriqué pour le contrôle de la position des plates-formes sur les chambres.

Dans un premier temps, nous devons mesurer la géométrie de notre outil. Cette mesure consiste à déterminer la position des fils de l'outil par rapport aux 6 billes d'appui. Nous effectuons cette mesure avec un appareil de mesure tridimensionnelle optique. Cet appareil est constitué d'un microscope à fort grossissement (profondeur de champ de $3\ \mu\text{m}$) et d'une table de déplacement à deux axes (X et Y). La mesure en Z est faite par le réglage de la netteté de l'image sur l'objet visé. Avec cet instrument, il est possible de faire des relevés de cotes avec une incertitude de mesure de $5\ \mu\text{m}$. Nous mesurons alors la position de chaque bille en relevant les coordonnées selon X et Y des points situés sur la périphérie de la bille, et en effectuant une mise au point sur son sommet (coordonnée Z). Nous procédons de la même manière pour les fils : mesure de points sur les cotés des fils et en leur sommet. Ainsi, en prenant au moins sept points de mesure pour les billes et un dizaine pour les fils, nous arrivons à déterminer la géométrie de notre outils avec une incertitude de l'ordre de $10\ \mu\text{m}$.

A l'issue de cette étape, nous fixons l'outil de contrôle sur la plate-forme, elle-même collée sur les tubes. En faisant deux balayages du tomographe (figure 18), nous pouvons mesurer la positions relative des fils de l'outil et de la chambre. Connaissant la géométrie de notre outils, nous pouvons alors contrôler la position de la plate-forme sur les tubes.

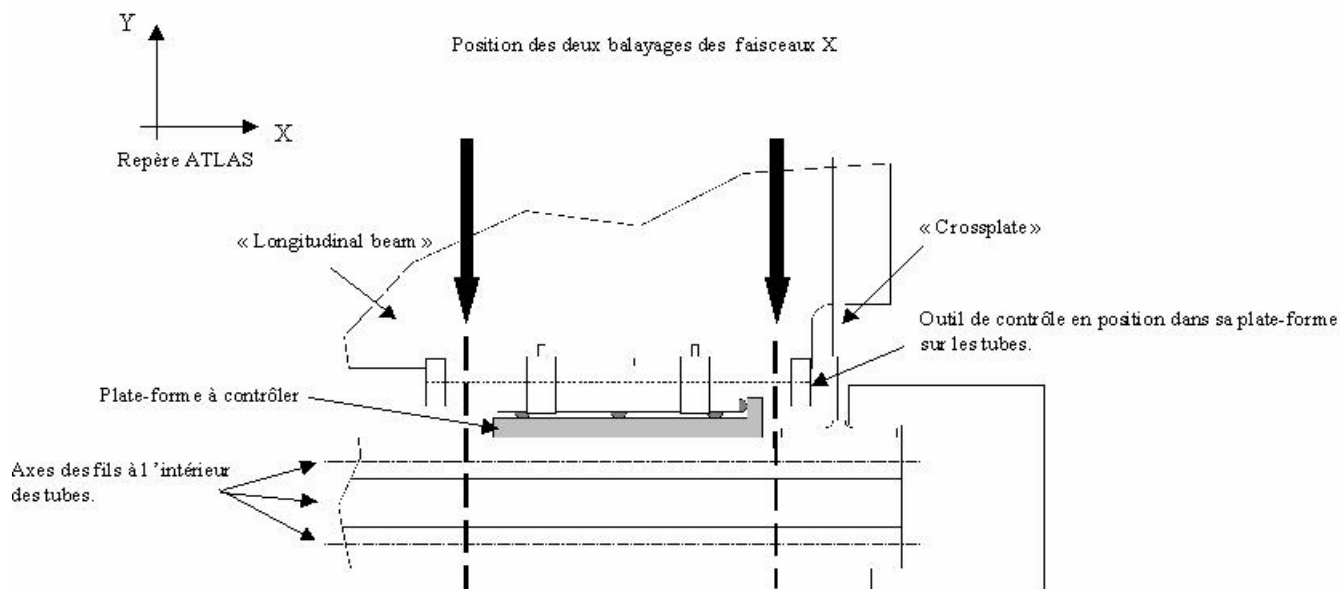


Figure 18: mise en place de l'outil dans la plate-forme.

Cette méthode de mesure a fait l'objet d'une note interne [10].

Ce chapitre vient de décrire l'utilisation et le réglage des outils de positionnement des plates-formes sur les chambres, ainsi que le contrôle de la position des plates-formes. Nous allons maintenant aborder une deuxième étude qui concerne le positionnement des platines dans les plates-formes.

IV-2 Répétabilité de positionnement.

Rappelons qu'une plate-forme désigne le support dans lequel les appuis plan-trait-point de n'importe quel élément viennent se loger. La platine est le nom donné à l'élément mécanique qui supporte les composants optiques d'un Praxial. La platine est munie de 6 billes définissant des appuis plan-trait-point et vient se positionner sur une chambre par l'intermédiaire d'une plate-forme. La Figure 19 montre une plate-forme standard et la plate-forme munie d'inserts en acier.

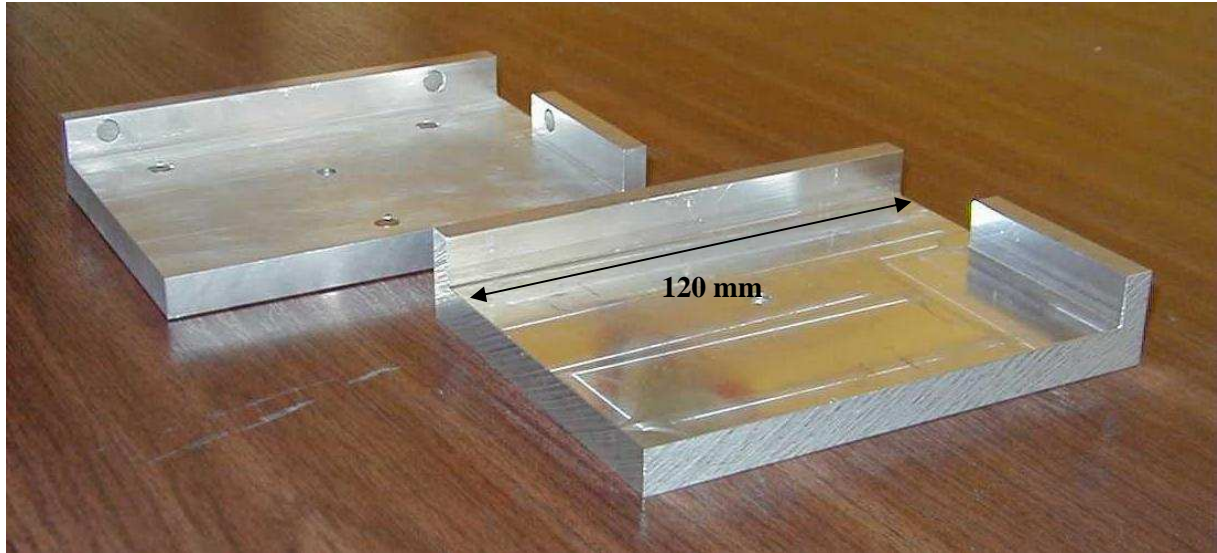


Figure 19 : au premier plan, la plate-forme standard en aluminium et derrière le prototype avec inserts en acier.

Sur l'ensemble des chambres à muons du « tonneau » (qui constitue le corps du détecteur ATLAS), deux mille quatre cents plates-formes seront disposées pour accueillir les capteurs Praxial. De par leur fonction de support, les plates-formes doivent nécessairement être rigides et dures. Par ailleurs, leur emplacement, collé sur les tubes des chambres, leur impose d'utiliser un matériau léger et « transparent » pour la détection des particules. Enfin, comme dans tout projet, l'enveloppe budgétaire pour la fabrication de ces pièces n'était pas infinie. La direction du projet a donc décidé de réaliser ces pièces en aluminium, taillées dans la masse. Probablement à cause d'un problème de spécification ou de communication entre personnes, l'aluminium dans lequel les plates-formes ont été fabriquées n'a pas été optimisé. De ce fait, lorsqu'une platine est placée et fixée dans une plate-forme, il apparaît des empreintes sous les billes définissant l'appui plan (celui qui reprend la contrainte du serrage).

Il nous est donc paru utile d'effectuer des mesures de répétabilité de positionnement des platines dans les plates-formes.

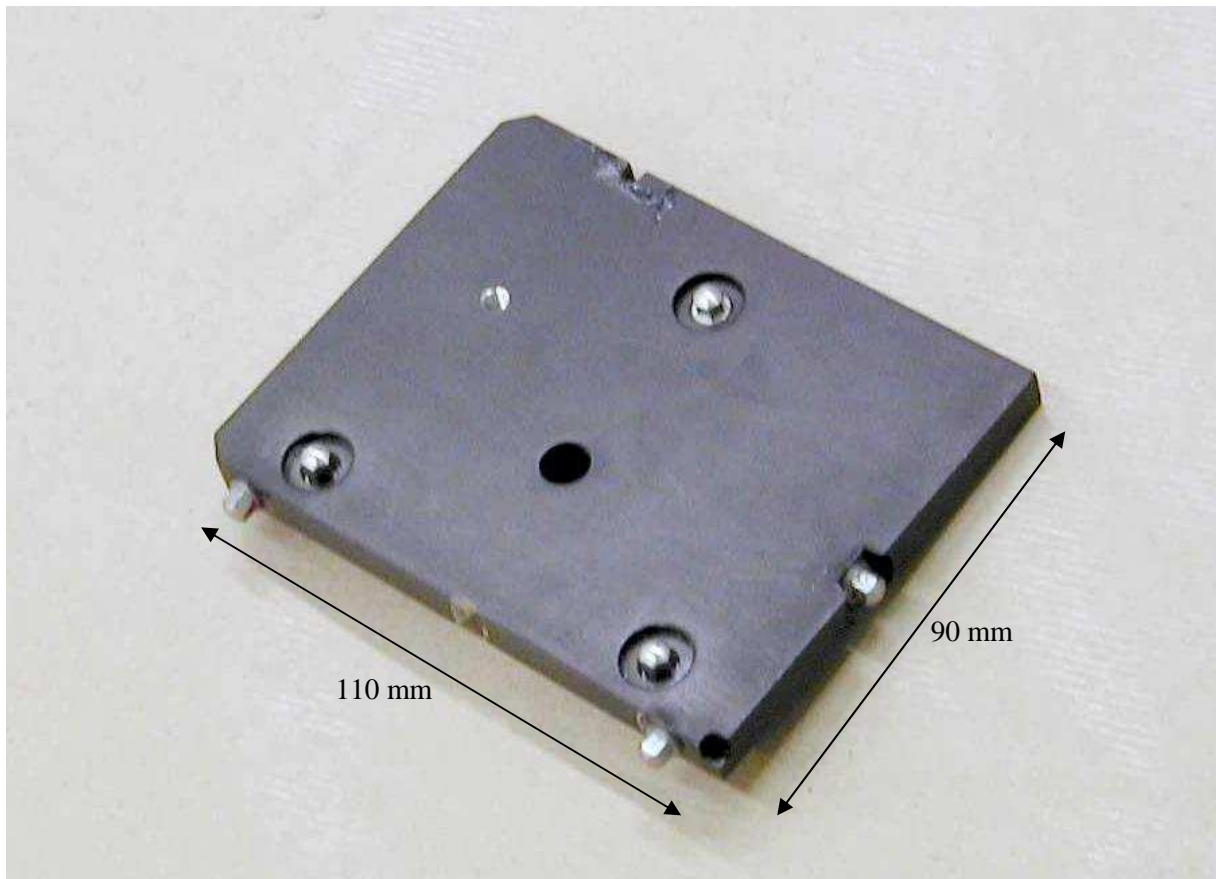


Figure 20: la platine utilisée pour les test de repositionnement. Les pions définissent les appuis plan-trait-point. L'alésage au centre permet de fixer la platine sur la plate-forme avec une seule vis.

Pour cela, nous équipons une platine (Figure 20) avec un masque issu d'un système Rasnik. Nous immobilisons la plate-forme dans un coin cube d'un marbre. En regard du masque, nous plaçons une lentille et une caméra CCD, autres composants de la ligne Rasnik. Avec le logiciel Icaras, nous pouvons mesurer les positions X et Y du masque dans le repère de la CCD. Avec ce montage, nous pouvons contrôler le positionnement de la platine dans son support sur deux axes et en déduire l'enfoncement selon l'appui plan et selon l'appui trait. Le système Rasnik indiquant aussi une mesure le long de son axe optique, nous pouvons également obtenir une information sur l'axe de l'appui point. Mais cette mesure étant imprécise, nous ne la prenons pas en compte. La Figure 21 montre le dispositif expérimental. Nous y voyons au premier plan le capteur CMOS, au milieu la lentille dans son support et dans le coin du marbre, une platine (en noir) équipée d'un masque Rasnik (circuit imprimé vert) et placée dans une plate-forme (couleur aluminium). La Figure 22 quant à elle, représente un gros plan de l'ensemble plate-forme, platine et masque. Nous distinguons sous la platine l'une des trois billes définissant l'appui plan.

Différentes mesures sont menées :

- Avant et après serrage.
- Répétabilité de positionnement pour plusieurs couples de serrages et pour les deux types de plates-formes : tout aluminium et aluminium avec inserts en acier.
- Reproductibilité de positionnement pour un serrage au couple nominal.
- Répétabilité de positionnement sur une pièce artificiellement vieillie.

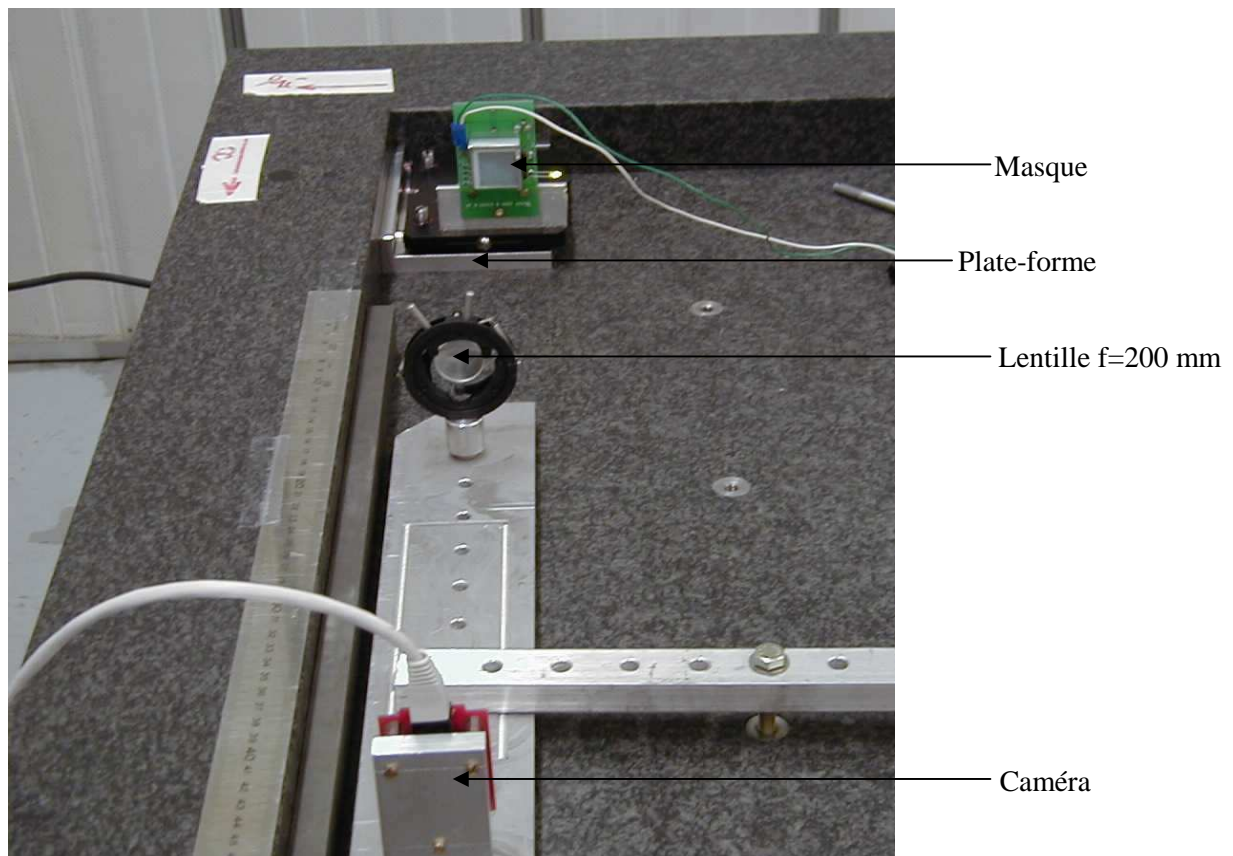


Figure 21: dispositif expérimental pour les mesures de répétabilité.

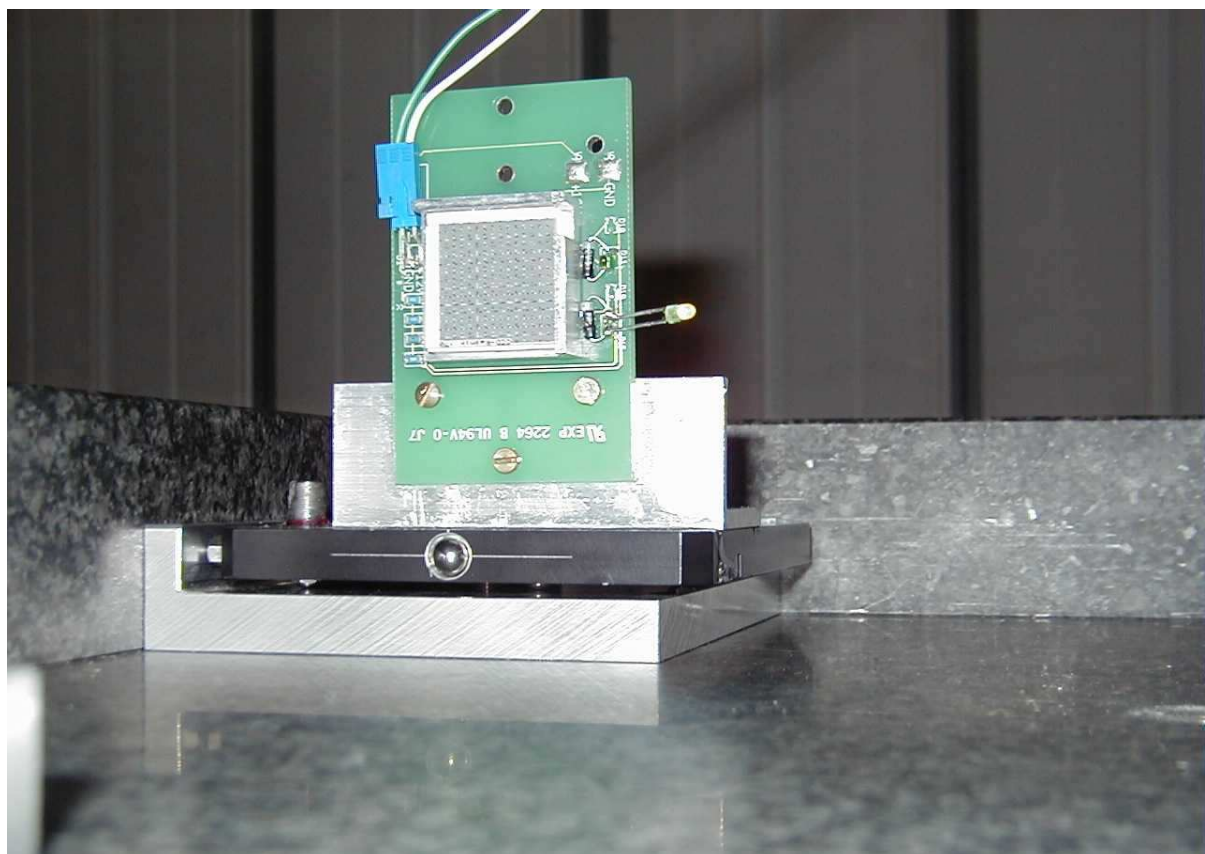


Figure 22: le masque Rasnik fixé sur une platine, elle-même posée sur une plate-forme.

Le premier test est le plus rapide. Il consiste en une mesure initiale lorsque la platine est correctement placée. Ensuite, nous immobilisons la platine en serrant la vis de fixation au couple nominal de 2 N.m. Nous effectuons alors une seconde mesure. Nous recommençons ces mesures plusieurs fois. Nous constatons que la platine se repositionne correctement sur la plate-forme dans l'axe horizontal. Par contre, nous mesurons une variation de 25 μm sur les mesures verticales. Si nous desserrons la vis de fixation, cette variation diminue à 15 μm . Nous pouvons expliquer ce fait par deux effets mécaniques distincts. Dans un premier temps, les billes définissant l'appui plan ne sont en contact avec la plate-forme que sur une très petite surface. En serrant la vis de fixation au couple de 2 N.m, la pression exercée sur chaque bille est très forte. Les billes s'enfoncent dans l'aluminium. A mesure que les billes pénètrent dans la matière, la surface de contact croît très rapidement et par conséquent la pression diminue d'autant. La contrainte exercée par la vis s'équilibre avec la résistance mécanique offerte par la plaque d'aluminium après un enfoncement de 15 μm . L'écart par rapport à la mesure de 25 μm est dû à une déformation élastique du support mécanique. Ceci explique le fait que nous retrouvons un écart de 10 μm lorsque la vis est desserrée. La Figure 23 montre les marques laissées par les billes dans la plate-forme.

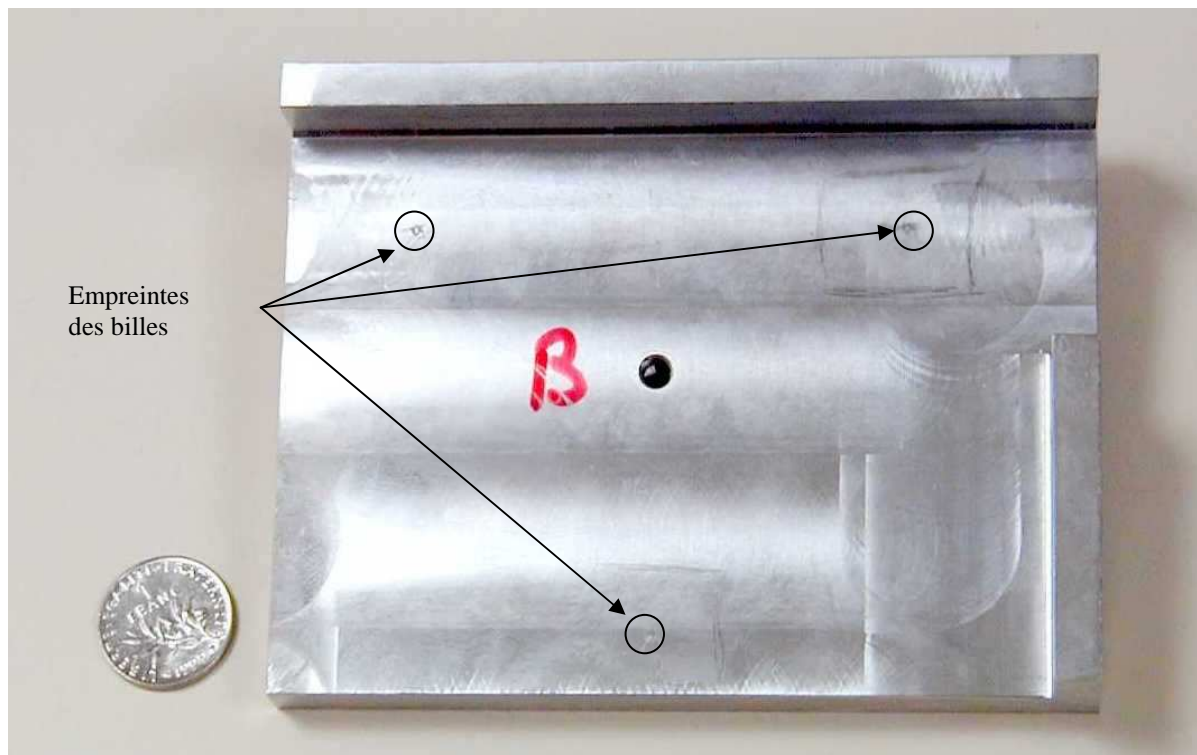


Figure 23: empreintes laissées sur la plate-forme par les billes de l'appui plan.

Le but du second test est de voir l'influence du couple de serrage et de la nature du matériau de la plate-forme. Pour cela, nous disposons d'une seconde plate-forme sur laquelle les zones d'appui des billes sont des inserts en acier (voir Figure 19). Cette fois, les mesures concernent la répétabilité de positionnement. La platine est placée dans la plate-forme et fixée avec la vis serrée à un couple donné. Nous enregistrons les mesures Rasnik, puis desserrons la platine et recommençons ainsi vingt fois de suite avec le même opérateur dans les mêmes conditions. Ensuite, nous augmentons la valeur du couple et refaisons une série de mesures. Ce test est répété pour cinq couples de serrage différents : 0,5, 1, 2, 3 et 4 N.m. Ensuite, nous reprenons l'ensemble des mesures en ayant changé de plate-forme.

La répétabilité de mesure reste de l'ordre de 5 μm pic-à-pic, quel que soit le couple de serrage et quel que soit le matériau de la plate-forme. Par contre, nous relevons des enfoncements dans l'aluminium pouvant atteindre 30 μm lorsque le couple de serrage est le plus fort. Pour l'acier, cet enfoncement ne dépasse pas 9 μm . Entre l'état positionné libre, et positionné fixé avec la vis, les mesures Rasnik sur l'axe vertical varient jusqu'à 40 μm .

Ce test nous permet de conforter le choix du couple de serrage. Pour des valeurs inférieures ou égales à 1 N.m, la platine se repositionne correctement, mais le serrage est insuffisant pour la maintenir dans n'importe quel sens. En effet, il faut garder à l'idée que les Praxial seront installés sur les chambres avant que celles-ci ne soient montées dans le détecteur. Pendant les phases de manutention, nous ne pouvons exclure le fait qu'une chambre subisse de petits chocs. Par ailleurs, les chambres verront la gravité orientée différemment selon leur position sur le spectromètre à muons. En aucun cas, les platines ne doivent bouger lors de ces opérations.

Une valeur de couple supérieure à 2 N.m n'apporte pas un plus au niveau de la répétabilité de positionnement. Par contre, un tel couple de serrage marque sévèrement le support en aluminium, et déforme la platine. Sur la plate-forme en acier, le marquage est moindre mais la déformation élastique reste la même.

Un couple de 2 N.m présente un très bon compromis entre l'efficacité de la fixation, la répétabilité de positionnement et les déformations engendrées sur les pièces. Cette valeur de couple sera adoptée pour la fixation de tous les Praxial dans tous les instituts.

Ayant déterminé la valeur du couple de serrage à appliquer sur la vis de fixation des platines et mesuré la répétabilité de positionnement, il nous reste à présent à mesurer la reproductibilité de positionnement.

La répétabilité s'estime en maintenant constantes les conditions de mesure. L'opérateur effectue toutes les mesures selon la même procédure. La reproductibilité s'évalue en faisant la mesure de la même grandeur, selon un mode opératoire différent. Cela peut être par exemple un changement d'opérateur, ou un changement dans l'ordre des opérations effectuées.

Dans notre cas, nous recommençons un test identique à celui de la mesure de répétabilité pour un couple donné (2 N.m). Un opérateur A effectue une série de mesure. La série est poursuivie par un opérateur B, puis reprise par l'opérateur A, et ainsi de suite. Les mesures du système Rasnik sont contenues dans une enveloppe de 5 μm lorsque l'opérateur A manipule. Par contre, cette même enveloppe atteint 30 μm pour l'opérateur B.

Ce test nous renseigne sur la forte dépendance entre la qualité du repositionnement et la dextérité de l'opérateur. Ne pouvant spécifier un niveau de dextérité pour les opérateurs qui monteront les platines sur les chambres, nous décidons de faire une étude d'accessoires d'aide au montage. Le bureau d'études du DAPNIA a pris à sa charge de faire évoluer le design des plates-formes dans ce sens. Ces accessoires pourraient être des lames élastiques qui viendraient plaquer la platine dans le coin de la plate-forme.

Le dernier test répond à un besoin fonctionnel lié aux différents éléments que doivent supporter les plates-formes. Comme il l'a déjà été écrit précédemment, la mise en place des plates-formes sur les chambres s'effectue à l'aide d'équerres de positionnement. Lors de ce processus, la plate-forme est d'abord fixée à l'équerre par une interface plan-trait-point.

L'équerre se place sur la chambre, et la plate-forme est collée sur les tubes. Ensuite, des outils de contrôle viennent se poser en lieu et place des Praxial. Ils utilisent encore la même interface plan-trait-point. Enfin, lorsque les capteurs Praxial sont mis en place, ils se logent dans la plate-forme au moyen de la même interface plan-trait-point. Si ce processus se déroule parfaitement, une plate-forme voit trois objets différents avec des appuis similaires. Cependant, les tolérances mécaniques liées à la fabrication de ces trois objets imposent que les appuis ne se trouvent pas rigoureusement à la même position. Il importe donc de savoir si les empreintes laissées par un type d'objet n'influencent pas la position des objets suivants.

Le test se déroule de la manière suivante.

- Nous fixons la platine dans la plate-forme et enregistrons les mesures Rasnik.
- Nous desserrons la vis et insérons alors sur les appuis trait et point des cales de 150 μm . Nous fixons à nouveau la platine et effectuons une seconde mesure Rasnik. Ces deux mesures nous servent de référence.
- Nous ôtons les cales de 150 μm que nous remplaçons par des cales d'épaisseur allant de 50 μm à 300 μm . Pour chaque épaisseur et emplacement de cale, nous fixons la platine dans la plate-forme en la serrant au couple nominal. La platine prend alors 18 positions différentes.
- Nous retirons les cales pour refaire deux mesures identiques à celles de référence. Nous comparons les enregistrements du Rasnik pour ces deux mesures et les deux initiales.

Par cette procédure, la platine marque une zone relativement étendue sous chaque bille définissant l'appui plan. Ce marquage intempestif correspond au décalage possible entre les positions des billes des différents outils. Le nombre de positions distinctes est volontairement exagéré de manière à forcer les effets possibles.

Dans les deux mesures, la platine se repositionne à mieux que 5 μm sur l'axe vertical. Dans l'axe horizontal, le repositionnement est différent pour la mesure au bord de la zone abîmée de celle au milieu de cette zone. Nous pensons que le résultat pour l'axe horizontal n'est pas exploitable dans la mesure où il mélange le positionnement réel avec une déformation qui affecte la mesure Rasnik en X.

Un rapport de test a été rédigé avec Yann Reinert [11], un technicien supérieur récemment embauché avec qui j'ai effectué ces tests. Il a servi de base à une présentation de ces résultats faite au CERN en avril 2001 par Claude Guyot, un physicien, devant des membres représentatifs des instituts fabricant les chambres.

IV-3 Mesures d'enfoncement.

Alors que les tests de répétabilité de positionnement avaient été menés et donnaient des résultats satisfaisants, nos collègues de la collaboration d'ATLAS se sont montrés très réticents face aux empreintes laissées par les billes sur les plates-formes.

Bien après les tests de repositionnement, nous avons repris des essais d'enfoncement. La solution avec des inserts rectifiés en acier nous paraissant trop onéreuse (50 F, soit 7,62 euros par pièce pour une série de 2500 pièces), nous avons envisagé des traitements de surface. Pour

cette nouvelle campagne de tests, nous avons comparé les enfoncements mesurés sur quatre types de plates-formes (voir Figure 24):

- standard,
- anodisée (anodisation choisie pour durcir la surface en aluminium),
- recouverte d'une couche de nickel,
- munie d'inserts en acier.

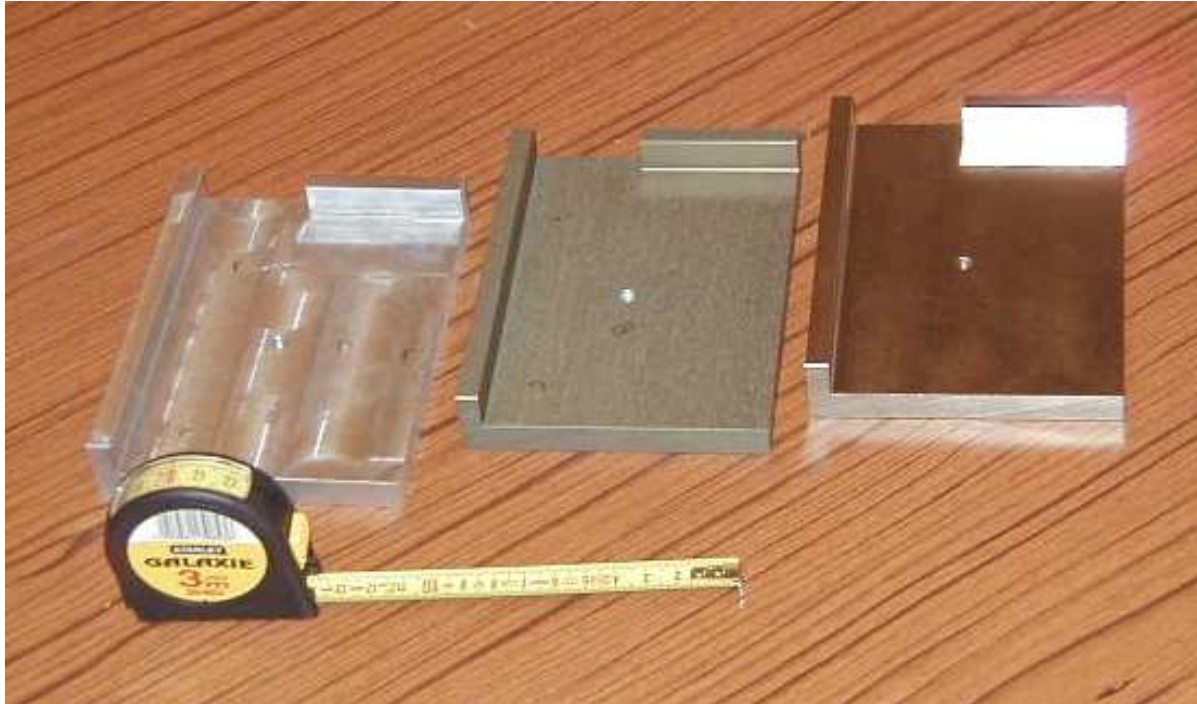


Figure 24: trois types de plate-forme pour les tests d'enfoncement: standard (à gauche), anodisée (au milieu) et nickelée (à droite).

Le processus de test est toujours le même. Nous disposons d'une platine vierge sur laquelle est fixé un masque Rasnik. La lentille et la caméra sont solidaires d'un marbre sur lequel est posée la plate-forme. Nous posons la platine sur la plate-forme sans la serrer et enregistrons la mesure Rasnik. Nous répétons cette opération une vingtaine de fois afin de nous assurer que la mesure de référence est bonne (moyenne des 20 mesures précédentes). A la 21^{ème} itération, nous serrons la platine au couple nominal de 2 N.m. Nous effectuons alors une seconde mesure Rasnik. Enfin, en essayant de ne pas faire bouger la platine, nous desserrons la vis de fixation et enregistrons une troisième mesure Rasnik.

Les mesures étant destructives, nous ne pouvons procéder qu'à un essai pour chaque type de plate-forme.

Quel que soit le type de plate-forme, nous enregistrons une variation de plusieurs micromètres entre la deuxième et la troisième mesure. Cet écart est dû à une déformation élastique, comme nous l'avons vu dans le chapitre IV-2.

Pour contrôler l'enfoncement des billes dans la matière, nous confrontons la mesure Rasnik à une seconde mesure opto-mécanique. Celle-ci utilise un microscope de fort grossissement (x200). Avec un tel instrument, la profondeur de champ est très faible (de l'ordre de 1 ou 2 μm). Nous couplons un palpeur numérique de 1 μm de résolution au déplacement vertical de la table du microscope (mise au point de l'image). Avec le microscope, nous réglons alternativement la mise au point de l'image sur les bords et le fond du « cratère » laissé par la bille. Le déplacement du palpeur entre ces deux positions est un indicateur de la profondeur des marques.

Ce procédé de mesure opto-mécanique semble simple et assez juste, mais sa mise en œuvre prouve ses limites. En effet, l'état de surface des plates-formes est brut d'usinage. Même si les surfaces sont dressées avec une fraiseuse, la planéité de celles-ci n'est guère meilleure que 10 à 15 μm . De ce fait, le réglage de mise au point sur les bords des empreintes est fortement subjectif. Il en est de même pour le fond de l'empreinte. Par ailleurs, si la résolution du palpeur est de 1 μm , son incertitude de mesure est bien plus grande : 5 μm .

La plate-forme anodisée a posé un problème supplémentaire. Le dépôt qui a pour but de durcir la surface est d'une couleur vert sombre légèrement translucide. Cette couche a rendu les mesures encore plus difficiles puisqu'il devenait quasiment impossible de discerner la surface de la couche anodisée de la surface de la plate-forme en aluminium.

C'est avec la plate-forme recouverte de nickel que la mesure est la plus aisée. C'est aussi avec cette plate-forme que les mesures Rasnik et microscopique se rejoignent.

Pour la plate-forme standard, les mesures Rasnik indiquent un enfoncement de 35 μm . Cette mesure est en désaccord avec celle effectuée dans le chapitre IV-2 (15 μm). La mesure avec le microscope indique des enfoncements de 10 à 12 μm . Pourtant, c'est aux mesures Rasnik que nous accordons le plus de crédit.

L'anodisation ne semble pas améliorer les résultats. En effet, selon le système Rasnik, l'enfoncement est de l'ordre de 15 μm . La mesure optique, très difficile à réaliser avec ce matériau, indique des valeurs comprises entre 8 et 23 μm . Par contre, l'examen microscopique décèle des fissures autour des cratères, signe que l'anodisation ne résiste pas à la pression.

Le dépôt de nickel donne de bons résultats. Pour ce matériau, les deux types de mesure sont en accord. Les empreintes des billes sont de 10 μm .

Enfin, la plate-forme munie d'inserts en acier est celle qui est la moins marquée. Cette fois encore, les mesures Rasnik et celles faites avec le microscope sont compatibles et indiquent un enfoncement de l'ordre de 3 à 4 μm . Bien que son coût soit le plus élevé, nous retenons cette solution pour la réalisation des 2500 plates-formes des capteurs Praxial.

Le tableau 1 résume les résultats des mesures.

Nature de la plate-forme	Enfoncement mesuré par le Rasnik	Enfoncement mesuré au microscope
Brute: aluminium fraisé	35 μm	10 μm
Aluminium anodisé	19 et 24 μm	8 à 23 μm
Dépôt de nickel	10 μm	11 μm
Avec inserts en acier	3 μm	4 μm

Tableau 1 : Mesure des empreintes laissées par les billes sur différents types de plate-forme.

IV-4 Conditionnement

Une platine Axial/Praxial, munie de ses composants optiques a un volume de l'ordre de 1 dm^3 . Après l'opération d'étalonnage, les platines seront envoyées dans les instituts fabricant les chambres. Lors de ce voyage, si l'un des composants bouge ou subit un choc, l'étalonnage est à refaire. De ce fait, il a fallu penser à les protéger efficacement.

Très tôt dans l'avancement projet, nous nous sommes penchés sur ce problème. N'ayant aucune connaissance spécifique dans ce domaine, nous avons d'abord pris contact avec Jean-

Claude Gery, l'agent qui assure le transport des marchandises au sein du DAPNIA. Il nous a prêté le catalogue d'une société spécialisée dans l'emballage. Nous avons alors pu prendre connaissance des diverses techniques existantes et cibler plus précisément notre besoin en fonction des possibilités. Nous avons contacté par téléphone plusieurs entreprises. Lors de cette prospection, nous avons eu connaissance d'un salon international de l'emballage qui se tenait quelques jours plus tard. Nous nous sommes rendus à ce salon pour y discuter directement du problème avec les entreprises et en sommes revenus avec une dizaine de contacts.

A la suite de cette visite, un cahier des charges a été rédigé puis envoyé aux personnes rencontrées lors du salon. Après quelques jours, nous avons reçu les commerciaux de sociétés dont les propositions techniques nous séduisaient. Ces sociétés ont réalisé chacune un prototype plus ou moins avancé ou fourni un échantillon d'une solution d'emballage, mais la technique adoptée reste proche.

La solution qui nous semble la plus protectrice est la suivante. La platine est immobilisée par un bloc de mousse découpée au plus juste autour des pièces mécaniques. Un fond et un couvercle également de mousse viennent compléter et fermer la protection. L'ensemble constitue alors un parallélépipède rectangle de mousse qui vient prendre place dans une boîte cartonnée. La qualité de la mousse et sa découpe, l'épaisseur et la forme de la boîte en carton ainsi que les prix différencient les offres. Celles-ci sont résumées dans le tableau 2. La Figure 25 illustre la proposition technique des sociétés **A** et **B**, dont les solutions techniques sont quasiment identiques.

Si la proposition de la société **C** est plus avantageuse financièrement, le niveau de protection apporté reste très inférieur aux autres. En effet, seule la partie basse des platines est tenue dans la mousse. Cette solution doit être finalisée par une protection complémentaire pour la périphérie et le dessus des platines. Cette protection n'est pas comptée dans le prix indiqué. Nous pouvons donc supposer que le coût final rejoindrait celui des sociétés **A** et **B**.

La société **D** propose quant à elle, d'entourer les pièces dans des blocs de mousse expansive. Cette solution offre l'avantage de s'adapter parfaitement à la forme des platines. Par contre, sa mise en œuvre paraît plus complexe que les autres techniques proposées.

Une société **E** ne figurant pas dans le tableau, propose d'utiliser des blocs de mousse prédécoupés. Ces blocs sont des parallélépipèdes rectangles entaillés selon un maillage au pas de 2 cm. Dans ce cas, nous aurions à arracher les morceaux de mousse pour dégager l'espace dans lequel la platine viendrait se loger. Si cette solution est financièrement avantageuse, son mode opératoire est fastidieux. En effet, il est impensable d'employer une personne pour arracher les pavés de mousse des 2500 platines à expédier. De ce fait, cette solution est rejetée.

Société	Prix unitaire (FF)	Technique proposée	Maquette fournie
A	23,9	Mousse découpée+carton	Oui, état fini
B	21,8	Mousse découpée+carton	Oui, état fini
C	16,5	Empreinte mousse+carton	Oui, juste le bloc de mousse
D	24,5	Mousse expansive+carton	Non

Tableau 2 : récapitulatif des propositions techniques et financières pour le conditionnement.



Figure 25: conditionnements du capteur Praxial proposés par les sociétés A (à gauche) et B (à droite)

J'ai montré les conditionnements **A** et **B** aux médecins du projet qui, à cette heure ont approuvé les solutions envisagées. Nous sommes d'accord sur le fait que le coût financier sera un critère important au moment de la commande. En effet, l'écart de prix unitaire sera multiplié par 2500. La commande des boîtes munies de leur mousse ne devrait pas être passée avant le second semestre 2001, voire début 2002 selon la répartition budgétaire.

Nous pensons qu'il serait souhaitable de demander à chaque entreprise de réaliser une maquette finie afin de procéder à un test pour qualifier la protection. Pour cela, nous pourrions prendre une platine étalonnée, et la placer dans l'un des emballages fournis. Nous laisserons volontairement tomber le carton d'une hauteur de 1 m, puis nous effectuerons à nouveau un étalonnage de la platine. Nous comparerons alors les paramètres de l'étalonnage avant et après la chute. En procédant ainsi pour toutes les solutions proposées, nous pourrions comparer les niveaux de protections apportés. Idéalement, la solution adoptée sera celle qui offre la meilleure protection en tenant compte de l'aspect financier.

V : PRINCIPE DE « L'ETALONNAGE ».

Ce mémoire étant présenté dans la spécialité Instrumentation-Mesure, nous nous devons de donner quelques précisions concernant la terminologie employée.

Par abus de langage au sein des physiciens, ingénieurs et technicien travaillant sur le projet, nous utilisons le terme « calibration » pour nommer ce qui serait appelé « étalonnage » par une personne habituée à la métrologie. L'essentiel étant de se comprendre, je n'ai pas attaché trop d'importance à ces amalgames. Bien que j'ai essayé d'y prêter attention, il est possible que ce mémoire contienne des traces de ce langage commun. La définition de l'étalonnage a été rappelée dans le paragraphe III-3. Cependant, dans le cas précis du banc Caliprax, le terme d'étalonnage ne correspond pas à la réalité de l'opération effectuée. Les personnes ont donc pris l'habitude de nommer ce processus « calibration », traduction anglaise d'« étalonnage ».

Rappelons qu'un capteur Praxial est constitué de deux systèmes Rasnik croisés (voir figure 12) donnant chacun 4 mesures : X, Y, Θ et G, le grandissement. Après une mesure de référence, une mesure des variations de ces grandeurs doit permettre de déterminer le mouvement dans l'espace d'une chambre par rapport à la chambre suivante. Ce mouvement se décrit par 6 paramètres : 3 translations et 3 rotations. Le but de l'étalonnage est de passer des 8 mesures au calcul des 6 inconnues. Nous allons à présent voir les deux choix possibles pour faire un étalonnage : le calcul linéaire et la reconstruction géométrique.

V-1 Calcul linéaire.

La première méthode pour effectuer un étalonnage fait appel à du calcul matriciel. La détermination des 6 paramètres associés au déplacement d'une platine dans l'espace est écrite sous forme d'une matrice colonne de 6 éléments. La matrice « mesures » est également une matrice colonne de 8 paramètres. Nous pouvons alors écrire la matrice « mesures » sous forme d'un produit d'une matrice de transfert et de la matrice « déplacement ». Ce principe est illustré par l'équation (6).

$$\begin{pmatrix} \Delta X1 \\ \Delta Y1 \\ \Delta \Theta1 \\ \Delta G1 \\ \Delta X2 \\ \Delta Y2 \\ \Delta \Theta2 \\ \Delta G2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{31} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{41} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{51} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{61} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{71} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{81} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & p_{88} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \Delta \Theta_x \\ \Delta \Theta_y \\ \Delta \Theta_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

La matrice de transfert est alors une matrice rectangulaire à 48 paramètres. Le calcul de l'un des éléments de la matrice de déplacement s'obtient alors par une combinaison linéaire semblable à l'équation (7), résultat du calcul pour $\Delta Y1$.

$$\Delta Y = p_{21} \cdot \Delta X + p_{22} \cdot \Delta Y + p_{23} \cdot \Delta Z + p_{24} \cdot \Delta \Theta_x + p_{25} \cdot \Delta \Theta_y + p_{26} \cdot \Delta \Theta_z \quad (7)$$

Le résultat global s'écrit selon un système de 8 équations ayant chacune 6 inconnues. Il est donc nécessaire de faire au minimum 6 mesures pour contraindre le système.

Si cette méthode est simple dans son principe, elle est cependant approximative. En effet, chacun des paramètres de déplacement est calculé par une combinaison linéaire de coefficients. Or, les rotations induisent des calculs de sinus et cosinus dont l'approximation linéaire est biaisée par des termes du second ordre (pour le cosinus). Au niveau d'exactitude recherché, cette approximation est préjudiciable. En effet, l'approximation linéaire d'un cosinus pour un angle de 10 mrad appliqué à une distance de 10 cm est entachée d'une erreur de 10 μm par rapport à la valeur vraie. Compte tenu de l'incertitude de mesure recherchée pour le capteur Praxial, ce moyen d'étalonnage ne peut être retenu.

Par ailleurs, l'interprétation physique des termes p_{ij} est complexe et de ce fait difficilement vérifiable. C'est pourquoi ce principe a été mis à l'écart au profit d'une seconde méthode, la reconstruction géométrique, développée dans le paragraphe suivant.

V-2 Reconstruction géométrique.

Un autre moyen de déduire des mesures Rasnik le déplacement d'une chambre est de connaître la position exacte des éléments optiques sur les chambres. Cette méthode d'étalonnage s'appuie donc sur une reconstruction géométrique des capteurs Praxial. Les positions des éléments optiques constituant le capteur ne pouvant pas être calculées directement, nous utilisons une méthode de minimisation. Cette méthode se déroule en trois étapes. Elle passe par l'élaboration d'un modèle du capteur Praxial. Ensuite, avec ce modèle, nous calculons des « mesures théoriques », simulations des mesures que donnerait notre modèle avec ses éléments placés aux positions théoriques. Nous effectuons ensuite des mesures réelles du capteur que nous souhaitons étalonner. Enfin, nous appliquons une loi du χ^2 avec les mesures simulées et les mesures réelles. En minimisant ce χ^2 , nous obtenons des approximations des positions réelles des éléments optiques sur les platines. Nous allons à présent détailler cette démarche en commençant par décrire le modèle utilisé pour chaque élément optique d'un Praxial.

V-2.1 Modélisation.

Rappelons qu'un capteur Praxial est constitué de deux systèmes Rasnik ayant chacun un masque, une lentille et une caméra CCD (voir figure 12). Ces éléments optiques sont montés sur deux platines séparées. Chacune d'elles est fixée sur une chambre au travers d'une plateforme dans laquelle elle se loge. La qualité du repositionnement est assurée par les appuis plan-trait-point définis par 6 billes équipant la platine du capteur. Dans notre modèle, il est supposé que l'une des platines est fixe (n°1) et l'autre subit les mouvements (n°2). La platine 1 supporte le masque M_1 , la lentille L_1 et la caméra C_1 ; la platine 2 supporte les éléments M_2 , L_2 et C_2 .

- Ces 6 billes répartissent les appuis de la manière suivante : trois billes pour définir un plan, deux billes pour une droite et enfin une pour un appui ponctuel. Le plan (3 billes) peut être représenté par un vecteur unitaire normal à sa surface. Le vecteur porté par la droite (2 billes) est alors perpendiculaire à ce premier vecteur. Un troisième vecteur est

construit de manière à former un repère direct lorsqu'il est associé aux deux autres. Nous définissons ainsi un repère unique pour les deux platines d'un capteur Praxial (repère associé aux 6 billes de la platine fixe). Dans ce repère, nous décrivons les 6 éléments optiques constituant le capteur Praxial : deux masques M_1 et M_2 , deux lentilles L_1 et L_2 et deux caméras C_1 et C_2 .

- Chaque masque est une plaque de verre sur laquelle un damier est photolithographié (dépôt local de chrome). En plus des carrés opaques et transparents à intervalles réguliers se trouvent des marques permettant de coder la zone géographique du masque. Ceci peut se comparer à une règle d'écolier sur laquelle se trouvent non seulement des graduations indiquant centimètres et millimètres, mais aussi des valeurs numériques précisant le nombre de centimètres séparant le point mesuré de l'origine. Les masques possèdent un système d'axes lié aux deux directions des marques. Ils peuvent alors chacun être modélisés par leur centre M et l'orientation de leur axe horizontal par rapport au repère défini par les billes : α_M . Cela fait alors 4 paramètres à déterminer pour chaque masque : les trois coordonnées (M_X, M_Y, M_Z) du centre du masque et une orientation α_M .
- La caméra CCD obéit aux mêmes principes. Elle est constituée de pixels rectangulaires disposés en lignes et en colonnes de manière à former un plan tronqué de détection. La caméra CCD est alors modélisée par son centre, et l'orientation de ses lignes par rapport au repère des billes, soient 4 paramètres : C_X, C_Y, C_Z et α_C .
- La lentille est assimilée à un trou infiniment petit par lequel passent les rayons lumineux. Sa modélisation est simplement un point dont les coordonnées (L_X, L_Y, L_Z) sont à déterminer.

Cette description d'un système Rasnik fait appel à 11 paramètres. Le capteur Praxial étant constitué de deux systèmes Rasnik, cela fait en tout 22 paramètres à déterminer. Les positions des éléments optiques telles qu'elles ont été décrites ci-dessus se réfèrent au repère global. Lorsque la platine mobile se déplace, les coordonnées des éléments de cette platine subissent ce déplacement de manière identique, les autres éléments appartenant à l'autre platine étant fixes. La modélisation du capteur Praxial doit être complétée par 6 paramètres de changement de repère appliqués aux éléments M_2, C_2 et L_2 . Ces 6 paramètres se répartissent en 3 paramètres de translation $\delta X, \delta Y$ et δZ ainsi que 3 paramètres de rotation $\delta\theta_X, \delta\theta_Y$ et $\delta\theta_Z$.

Finalement, la modélisation complète d'un Rasnik se résume au calcul de 28 paramètres.

Après avoir modélisé complètement le capteur Rasnik, nous allons maintenant en simuler le fonctionnement.

V-2.2 Simulation.

Pour simuler le fonctionnement du Rasnik nous utilisons le modèle décrit précédemment. Le masque et caractérisé par son centre M et ses axes sont matérialisés par deux vecteurs unitaires $\overrightarrow{X_M}$ et $\overrightarrow{Y_M}$. Dans notre simulation, nous supposons que les coordonnées du point M dans le repère local du masque ($M, \overrightarrow{X_M}, \overrightarrow{Y_M}$) sont (0 ;0).

De même, le point C et deux vecteurs unitaires $\overrightarrow{X_C}$ et $\overrightarrow{Y_C}$ caractérisent la caméra. La lentille est définie par un seul point L, son orientation étant neutre dans notre modèle.

En optique géométrique, une lentille forme une image ponctuelle d'un point source. Cette relation bijective est appliquée à notre modèle. Le point I est défini comme étant le point du masque vu par le centre C de la caméra CCD au travers de la lentille L. De même, nous introduisons le point I' associé au point C', défini de manière à ce que le vecteur $\overrightarrow{CC'}$ soit égal au vecteur $\overrightarrow{X_C}$ (vecteur unitaire). L'introduction de ce point C', et de son « antécédant » I' sont justifiés par le calcul du grandissement optique, comme nous allons le voir par la suite. La Figure 26 montre une représentation graphique de ces éléments.

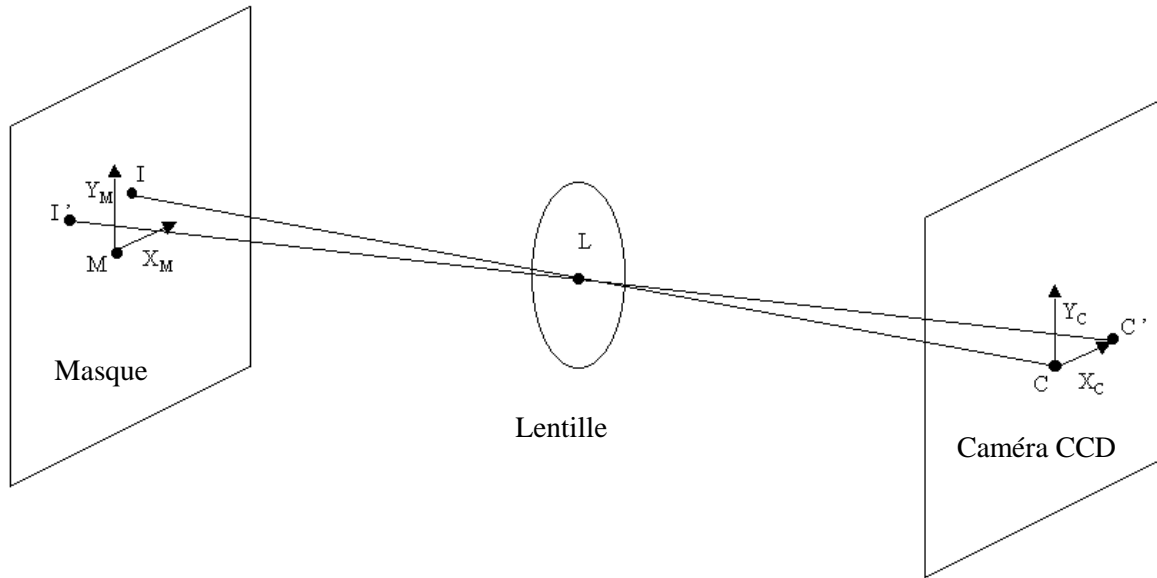


Figure 26: représentation graphique du modèle Praxial. Le masque et la caméra sont repérés par leur centre et sont pourvus d'un repère local. La lentille est assimilée à un point.

Le but de la simulation est de calculer les résultats théoriques du Rasnik (X_I, Y_I, Θ, G) en supposant connue la géométrie du modèle : ($M, L, C, \overrightarrow{X_M}, \overrightarrow{Y_M}, \overrightarrow{X_C}$ et $\overrightarrow{Y_C}$). Ce calcul s'appuie sur des relations géométriques assez simples que nous allons à présent détailler.

Les points C, I et L sont alignés et les vecteurs $\overrightarrow{MI}, \overrightarrow{X_M}$ et $\overrightarrow{Y_M}$ sont coplanaires. Ces deux relations géométriques s'écrivent selon les équations (8) et (9).

$$\overrightarrow{CI} = k\overrightarrow{CL} \quad (8)$$

$$\overrightarrow{MI} \bullet (\overrightarrow{X_M} \wedge \overrightarrow{Y_M}) = 0 \quad (9)$$

En introduisant le point C par la relation de Chasles appliquée à \overrightarrow{MI} et en utilisant l'équation (8), nous aboutissons à l'équation (10) permettant de déterminer k.

$$k = \frac{\overrightarrow{MC} \bullet (\overrightarrow{X_M} \wedge \overrightarrow{Y_M})}{\overrightarrow{LC} \bullet (\overrightarrow{X_M} \wedge \overrightarrow{Y_M})} \quad (10)$$

Connaissant k , nous pouvons alors déterminer les paramètres du Rasnik X_I , Y_I , Θ et G en appliquant les équations (11) à (14).

$$X_I = \overrightarrow{MC} \bullet \overrightarrow{X_M} + k \overrightarrow{CL} \bullet \overrightarrow{X_M} \quad (11)$$

$$Y_I = \overrightarrow{MC} \bullet \overrightarrow{Y_M} + k \overrightarrow{CL} \bullet \overrightarrow{Y_M} \quad (12)$$

$$\sin(\Theta) = \frac{\overrightarrow{II'} \bullet \overrightarrow{Y_M}}{\|\overrightarrow{II'}\|} \quad (13)$$

$$G = \frac{\|\overrightarrow{CC'}\|}{\|\overrightarrow{II'}\|} \quad (14)$$

Ces quelques équations permettent de calculer les résultats théoriques donnés par un système Rasnik lorsque sa géométrie est connue. Pour simuler un capteur Praxial constitué de deux systèmes Rasnik, il faut appliquer les équations (11) à (14) à chacun des systèmes. Nous allons à présent détailler une partie de ces calculs.

V-2.3 Mise en évidence des paramètres.

Dans les équations (11) à (14), la géométrie du système Rasnik intervient au travers des points caractéristiques du modèle : M , L , C , C' et des vecteurs associés : $\overrightarrow{X_M}$, $\overrightarrow{Y_M}$, $\overrightarrow{X_C}$ et $\overrightarrow{Y_C}$. Cependant, pour voir apparaître clairement les paramètres évoqués dans la description du modèle, nous devons détailler ces équations. Pour cela, nous allons nous référer à la figure 27, schéma du capteur Praxial en vue de dessus, avec ses éléments modélisés. Nous limiterons l'étude au système Rasnik constitué des éléments C_2 , L_2 et M_1 .

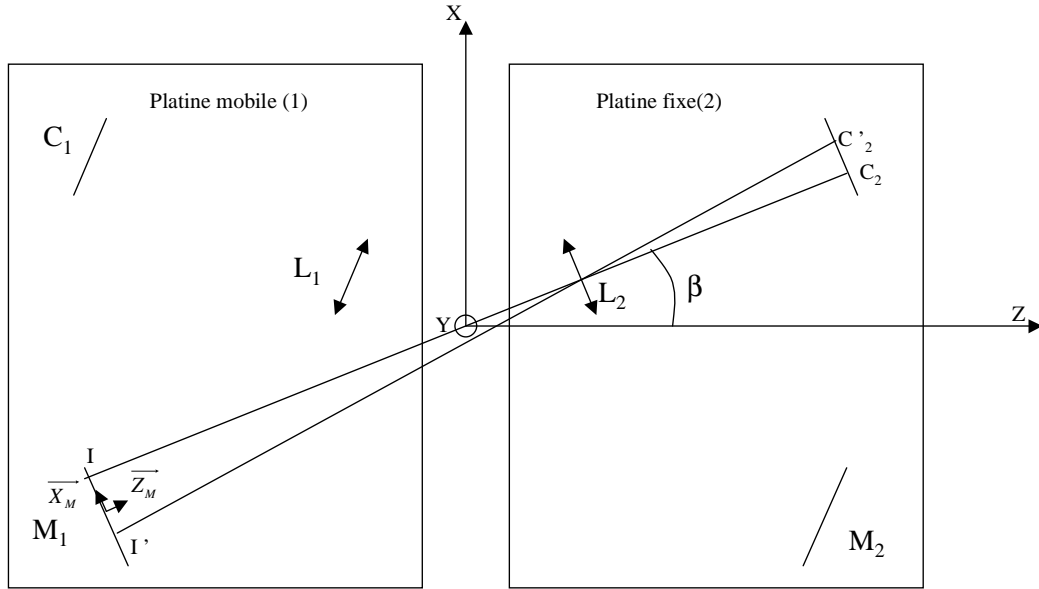


Figure 27: Modèle complet du capteur Praxial avec 2 systèmes Rasnik composés de 2 caméras (C_1 et C_2), de 2 lentilles (L_1 et L_2) et de 2 masques (M_1 et M_2).

Dans un premier temps, il nous faut écrire les équations (11) à (14), en les appliquant aux dénominations utilisées sur la figure 25. Elles deviennent alors les équations (15) à (18).

$$X_I = \overrightarrow{M_1 C_2} \cdot \overrightarrow{X_M} + k \overrightarrow{C_2 L_2} \cdot \overrightarrow{X_M} \quad (15)$$

$$Y_I = \overrightarrow{M_1 C_2} \cdot \overrightarrow{Y_M} + k \overrightarrow{C_2 L_2} \cdot \overrightarrow{Y_M} \quad (16)$$

$$k = \frac{\overrightarrow{M_1 C_2} \cdot \overrightarrow{Z_M}}{\overrightarrow{L_2 C_2} \cdot \overrightarrow{Z_M}} \quad (17)$$

$$G = \frac{\|\overrightarrow{C_2 C'_2}\|}{\|\overrightarrow{II'}\|} = \frac{1}{\|\overrightarrow{II'}\|} \quad (18)$$

$$\sin \Theta = \frac{\overrightarrow{II'} \cdot \overrightarrow{Y_M}}{\|\overrightarrow{II'}\|} \quad (19)$$

Nous écrivons ensuite les coordonnées de chaque point dans le repère global, ainsi que celles des vecteurs $\overrightarrow{X_M}$, $\overrightarrow{Y_M}$ et $\overrightarrow{Z_M}$. Ces dernières s'obtiennent en appliquant des matrices de rotations autour des axes Z puis Y aux coordonnées des vecteurs unitaires exprimées dans le repère (X, Y, Z):

$$C_2 \begin{pmatrix} C_{2x} \\ C_{2y} \\ C_{2z} \end{pmatrix} \quad L_2 \begin{pmatrix} L_{2x} \\ L_{2y} \\ L_{2z} \end{pmatrix} \quad M_1 \begin{pmatrix} M_{1x} \\ M_{1y} \\ M_{1z} \end{pmatrix}$$

$$\overrightarrow{X_M} \begin{pmatrix} \cos \alpha_{M1} \cdot \cos \beta \\ \sin \alpha_{M1} \\ -\cos \alpha_{M1} \cdot \sin \beta \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{Y_M} \begin{pmatrix} -\sin \alpha_{M1} \cdot \cos \beta \\ \cos \alpha_{M1} \\ \sin \alpha_{M1} \cdot \sin \beta \end{pmatrix} \quad \overrightarrow{Z_M} \begin{pmatrix} \sin \beta \\ 0 \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$

Avec toutes ces coordonnées, le premier élément à calculer est le facteur k décrit par l'équation (10). L'expression complète de ce facteur apparaît dans l'équation (20).

$$k = \frac{\overrightarrow{M_1 C_2} \cdot \overrightarrow{Z_M}}{L_2 C_2 \cdot \overrightarrow{Z_M}} = \frac{(C_{2X} - M_{1X}) \cdot \sin \beta + (C_{2Z} - M_{1Z}) \cdot \cos \beta}{(C_{2X} - L_{2X}) \cdot \sin \beta + (C_{2Z} - L_{2Z}) \cdot \cos \beta} = \frac{(C_{2X} - M_{1X}) \cdot \tan \beta + (C_{2Z} - M_{1Z})}{(C_{2X} - L_{2X}) \cdot \tan \beta + (C_{2Z} - L_{2Z})} \quad (20)$$

$$\text{avec } \tan \beta = \frac{C_{2X} - L_{2X}}{C_{2Z} - L_{2Z}}. \quad (21)$$

Disposant maintenant de l'expression de k, nous pouvons alors écrire les équations complètes de X_I et Y_I , respectivement (22) et (23).

$$X_I = (C_{2X} - M_{1X}) \cos \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - M_{1Y}) \sin \alpha_{M1} - (C_{2Z} - M_{1Z}) \cos \alpha_{M1} \cdot \sin \beta \\ \dots\dots\dots - k[(C_{2X} - L_{2X}) \cos \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - L_{2Y}) \sin \alpha_{M1} - (C_{2Z} - L_{2Z}) \cos \alpha_{M1} \cdot \sin \beta] \quad (22)$$

$$Y_I = -(C_{2X} - M_{1X}) \sin \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - M_{1Y}) \cos \alpha_{M1} - (C_{2Z} - M_{1Z}) \sin \alpha_{M1} \cdot \sin \beta \\ \dots\dots\dots - k[-(C_{2X} - L_{2X}) \sin \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - L_{2Y}) \cos \alpha_{M1} - (C_{2Z} - L_{2Z}) \sin \alpha_{M1} \cdot \sin \beta] \quad (23)$$

Le calcul de l'angle Θ fait intervenir le point I' , point du masque vu par le point C'_2 de la caméra. Nous devons alors exprimer le vecteur $\overrightarrow{C_2 C'_2}$, en déduire les coordonnées de C'_2 pour les introduire dans les équations (15) et (16). Notons que le paramètre k', calculé avec C'_2 , est égal à k (théorème de Thalès). Nous aboutissons alors aux coordonnées $X_{I'}$ et $Y_{I'}$ données par les équations (24) et (25).

$$\overrightarrow{C_2 C'_2} = X_{C_2} \begin{pmatrix} \cos \alpha_{C2} \cdot \cos \beta \\ \sin \alpha_{C2} \\ -\cos \alpha_{C2} \cdot \sin \beta \end{pmatrix}$$

$$X_{I'} = (C_{2X} - M_{1X}) \cos \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - M_{1Y}) \sin \alpha_{M1} - (C_{2Z} - M_{1Z}) \cos \alpha_{M1} \cdot \sin \beta \\ \dots\dots\dots + \cos \alpha_{C2} \cdot \cos \alpha_{M1} + \sin \alpha_{C2} \cdot \sin \alpha_{M1} \\ \dots\dots\dots - k[(C_{2X} - L_{2X}) \cos \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - L_{2Y}) \sin \alpha_{M1} - (C_{2Z} - L_{2Z}) \cos \alpha_{M1} \cdot \sin \beta] \\ \dots\dots\dots - k[\cos \alpha_{C2} \cdot \cos \alpha_{M1} + \sin \alpha_{C2} \cdot \sin \alpha_{M1}] \quad (24)$$

$$Y_{I'} = -(C_{2X} - M_{1X}) \sin \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - M_{1Y}) \cos \alpha_{M1} + (C_{2Z} - M_{1Z}) \sin \alpha_{M1} \cdot \sin \beta \\ \dots\dots\dots - \cos \alpha_{C2} \cdot \sin \alpha_{M1} + \sin \alpha_{C2} \cdot \cos \alpha_{M1} \\ \dots\dots\dots - k[-(C_{2X} - L_{2X}) \sin \alpha_{M1} \cdot \cos \beta + (C_{2Y} - L_{2Y}) \cos \alpha_{M1} - (C_{2Z} - L_{2Z}) \sin \alpha_{M1} \cdot \sin \beta] \\ \dots\dots\dots - k[-\cos \alpha_{C2} \cdot \sin \alpha_{M1} + \sin \alpha_{C2} \cdot \cos \alpha_{M1}] \quad (25)$$

Ces équations se simplifient si elles sont exprimées en fonction de X_I et Y_I . Nous pouvons alors les écrire sous la forme des équations (26) et (27).

$$X_{I'} = X_I + (1-k) \cdot \cos(\alpha_{C2} - \alpha_{M1}) \quad (26)$$

$$Y_{I'} = Y_I + (1-k) \cdot \sin(\alpha_{C2} - \alpha_{M1}) \quad (27)$$

Nous pouvons alors poursuivre les calculs et exprimer les deux dernières mesures données par le système Rasnik avec les équations (28) et (29).

$$G = \frac{1}{\|\vec{\Pi}'\|} = \frac{1}{\sqrt{(1-k)^2 \cdot \cos^2(\alpha_{C2} - \alpha_{M1}) + (1-k)^2 \cdot \sin^2(\alpha_{C2} - \alpha_{M1})}} = \frac{1}{|1-k|} \quad (28)$$

$$\sin \Theta = \frac{Y_{I'} - Y_I}{\|\vec{\Pi}'\|} = \frac{(1-k) \sin(\alpha_{C2} - \alpha_{M1})}{|1-k|}$$

$$\text{avec } k > 1, \Theta = \alpha_{M1} - \alpha_{C2} \quad (29)$$

Les équations (20), (22), (23), (28) et (29) nous indiquent les résultats calculés des mesures Rasnik pour des positions données des éléments optiques. Lors d'un mouvement de la platine mobile, les éléments de cette platine vont tous subir ce mouvement. Pour calculer les nouvelles mesures théoriques du système Rasnik, il faut appliquer la matrice qui décrit le mouvement aux éléments C_2 et L_2 .

Nous pouvons également étudier le comportement du système Rasnik en calculant les différentielles totales des équations (22), (23), (28) et (29). A titre d'exemple, ce calcul est mené pour l'équation (28). Il aboutit à la forme différentielle décrite par l'équation (30).

$$\begin{aligned} dG = & (dC_{2X} - dL_{2X}) \frac{\{2(C_{2X} - L_{2X})(M_{1X} - L_{2X})(C_{2X} - L_{2X}) + (M_{1Z} - L_{2Z})(C_{2Z} - L_{2Z})\} - (M_{1X} - L_{2X})\{(C_{2X} - L_{2X})^2 + (C_{2Z} - L_{2Z})^2\}}{[(M_{1X} - L_{2X})(C_{2X} - L_{2X}) + (M_{1Z} - L_{2Z})(C_{2Z} - L_{2Z})]^2} \\ & \dots \dots (dC_{2Z} + dL_{2Z}) \frac{\{2(C_{2Z} - L_{2Z})(M_{1X} - L_{2X})(C_{2X} - L_{2X}) + (M_{1Z} - L_{2Z})(C_{2Z} - L_{2Z})\} - (M_{1Z} - L_{2Z})\{(C_{2X} - L_{2X})^2 + (C_{2Z} - L_{2Z})^2\}}{[(M_{1X} - L_{2X})(C_{2X} - L_{2X}) + (M_{1Z} - L_{2Z})(C_{2Z} - L_{2Z})]^2} \quad (29) \\ & \dots \dots \dots dM_{1X} \frac{(C_{2X} - L_{2X})}{[(M_{1X} - L_{2X})(C_{2X} - L_{2X}) + (M_{1Z} - L_{2Z})(C_{2Z} - L_{2Z})]^2} \\ & \dots \dots \dots dM_{1Z} \frac{(C_{2Z} - L_{2Z})}{[(M_{1X} - L_{2X})(C_{2X} - L_{2X}) + (M_{1Z} - L_{2Z})(C_{2Z} - L_{2Z})]^2} \end{aligned}$$

Avec les 8 expressions différentielles correspondant aux 8 mesures fournies par un capteur Praxial, nous pourrions alors résoudre le système d'équation donnant les positions réelles des éléments optiques sur les platines. Ce système d'équations serait constitué des variations des mesures des systèmes Rasnik exprimées en fonction des variations des positions des éléments optiques de la platine mobile (mouvements de la platine). L'écriture et la résolution d'un tel système sont relativement complexes et soumis à l'erreur humaine. Par ailleurs, le système n'étant pas linéaire, il ne possède pas forcément de solution réelle. Enfin, chaque mesure étant entachée d'une incertitude, la solution du système (si elle existe) n'est pas unique. Pour cela,

nous préférons utiliser une méthode de détermination de paramètres basée sur une minimisation d'un χ^2 qui fait appel à une routine existante dont nous maîtrisons déjà l'utilisation. Cette méthode est expliquée dans le chapitre suivant.

Ne possédant pas la maîtrise de logiciels de calculs mathématiques, j'ai effectué la totalité de ces calculs à la main. Les expressions obtenues montrent que ces calculs nécessitent une grande rigueur. Certains indices indiquent que les résultats obtenus sont corrects (le calcul de k' aboutit à la même expression que celui de k et $\Theta = \alpha_{C2} - \alpha_{M1}$).

V-2.4 Minimisation.

Le but de la méthode d'étalonnage décrite dans le paragraphe V-2 est une reconstruction géométrique de la position réelle des éléments actifs du Praxial. Le principe mathématique utilisé pour calculer ces paramètres utilise les résultats des chapitres précédents.

Lorsqu'une platine d'un capteur Praxial est posée sur le banc d'étalonnage, la position des éléments optiques peut être estimée à quelques millimètres près. Ces estimations de position permettent de fixer une valeur initiale aux 28 paramètres P_i nécessaires à la connaissance de la géométrie du capteur.

Ces valeurs initiales des P_i , permettent de déterminer des valeurs $M_k(P_i)$, valeurs théoriques calculées pour les systèmes Rasnik, en utilisant les équations (22), (23), (28) et (29). Le paramètre k prend 8 valeurs différentes pour les 8 mesures données par un capteur Praxial : X, Y, Θ et G pour chaque système Rasnik.

Lors de l'étalonnage, les huit mesures Rasnik sont enregistrées à chaque itération (mouvement de la platine mobile par rapport à la platine fixe). Ces valeurs m_k sont des mesures réelles qui doivent être comparées aux $M_k(P_i)$, valeurs résultant de la simulation et recalculées à chaque déplacement de la platine mobile.

La suite de l'étalonnage consiste alors à minimiser une grandeur étant définie comme l'écart quadratique entre la mesure m_k et la prédiction $M_k(P_i)$. Cette valeur est calculée selon une loi du χ^2 (équation 31) dans laquelle e_k^n désigne l'erreur acceptée pour la grandeur associée à k et n est le numéro de l'itération, variant de 1 au nombre total de mesures N . La minimisation de χ^2 se base sur des calculs de dérivées partielles. Cette méthode est en fait un calcul de moindres carrés, appliqué dans un espace scalaire de dimension 28.

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^8 \left[\frac{m_k^n - M_k(P_i)}{e_k^n} \right]^2 \quad (30).$$

Les valeurs typiques de e_k sont :

- $e_x = e_y = 1 \mu\text{m}$,
- $e_\theta = 100$ à $200 \mu\text{rad}$,
- $e_g = 5.10^{-4}$.

Ce calcul de minimisation est effectué par MINUIT, une routine couramment utilisée pour ce genre d'applications par les physiciens du Service de Physique des Particules (SPP), et les scientifiques du CERN.

En résumé, l'étalonnage d'un capteur Praxial consiste à faire bouger l'une des platines du capteur par rapport à l'autre selon des déplacements très bien connus. A chaque déplacement, les 8 mesures fournies par les Rasnik sont enregistrées. A partir des positions grossières de chaque élément, la routine de minimisation utilise les résultats de chaque mesure pour faire évoluer les valeurs des paramètres P_i . Après N itérations, ces valeurs P_i convergent vers les valeurs « vraies ». Les positions des éléments optiques sont alors connues, ainsi que les paramètres de changement de repère. Le processus d'étalonnage est terminé.

Par la suite, dans son utilisation nominale (sur les chambres), le capteur Praxial fournit 8 mesures pour déterminer seulement les 6 paramètres du mouvement. Le système est contraint.

Après avoir expliqué le principe de l'étalonnage des palpeurs, nous allons aborder les aspects relatifs à sa réalisation technique.

VI : CONTROLE DES MOUVEMENTS

Le principe de l'étalonnage nous impose de connaître la valeur des déplacements de la platine mobile avec une incertitude de mesure de l'ordre du micromètre. Pour cela, nous disposons de capteurs de type LVDT numériques (Linear Variable Differential Transformer) que nous avons utilisé dans une expérience précédente. Un autre choix possible est d'employer des capteurs Rasnik pour effectuer cette mesure.

VI-1 Etalonnage des palpeurs LVDT.

Les palpeurs dont nous disposons ont une étendue de mesure de 10 mm. Ils sont vendus pour avoir une incertitude de mesure de $\pm(2+L/1000) \mu\text{m}$, où L désigne la mesure en μm , soit $\pm 12 \mu\text{m}$ d'incertitude de mesure pour un enfoncement maximal. Utilisant la technologie LVDT, ils possèdent en plus un conditionneur qui corrige les erreurs propres à cette technologie. Ce conditionneur offre de plus une sortie numérique des données codées sur 14 bits via un port RS 485. Ainsi avec un PC muni d'une carte appropriée, nous pouvons lire jusqu'à 128 palpeurs. Au total, nous avons 24 palpeurs achetés en deux lots : 18 au début de l'année 1996 et 6 au cours de l'année 1999. Le fournisseur ne communique pas les courbes d'étalonnage des palpeurs mais indique seulement la formule d'incertitude de mesure citée ci-dessus.

Les palpeurs LVDT sont construits autour de deux bobines, l'une excitatrice, l'autre réceptrice. La tige mobile du palpeur est munie d'un cylindre de fer doux. Lorsque la tige se déplace, le couplage entre les bobines varie avec la position du noyau. Ainsi, la tension lue sur la bobine réceptrice est dépendante de la position de la tige. La Figure 28 illustre ce principe. Cette technologie offre une bonne sensibilité de mesure autour du point zéro, position où le noyau de fer est au milieu des bobines. La caractéristique d'exactitude en fonction de la position du noyau s'écarte franchement du zéro à mesure que le couplage diminue, c'est-à-dire que le cylindre de fer s'écarte du point milieu.

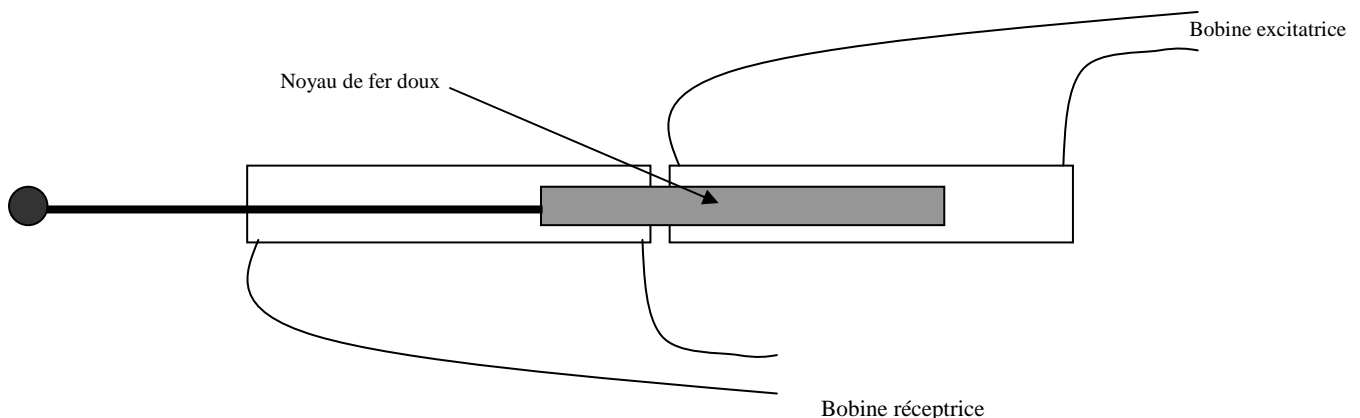


Figure 28 : schéma fonctionnel d'un capteur LVDT.

Dans les palpeurs achetés, le boîtier de conditionnement a pour rôle de corriger cette erreur et de linéariser la caractéristique initiale. Ainsi la sortie est un nombre compris entre 0 et 16383, proportionnel à l'enfoncement de la tige à l'intérieur de l'étendue de mesure.

Avant d'utiliser ces palpeurs pour mesurer les déplacements de la platine du Caliprax, nous avons souhaité en étalonner quelques uns. Pour cela, nous avons utilisé plusieurs modes opératoires différents.

Dans un premier temps, le palpeur est fixé le long d'une arête d'une équerre de métrologie. Sa position est telle qu'au repos, la valeur indiquée est proche de zéro (tige complètement sortie). Ensuite, nous insérons des cales d'épaisseur entre la tige du palpeur et l'autre arête de l'équerre. En procédant de la sorte, nous nous assurons de la perpendicularité du palpeur avec les plans des faces des cales. L'ensemble du montage est placé sur un marbre de classe 00 (planéité inférieure à $5 \mu\text{m/m}$) se situant dans un local climatisé à $(20 \pm 0,3)^\circ\text{C}$. La Figure 29 illustre le montage du palpeur sur l'équerre.

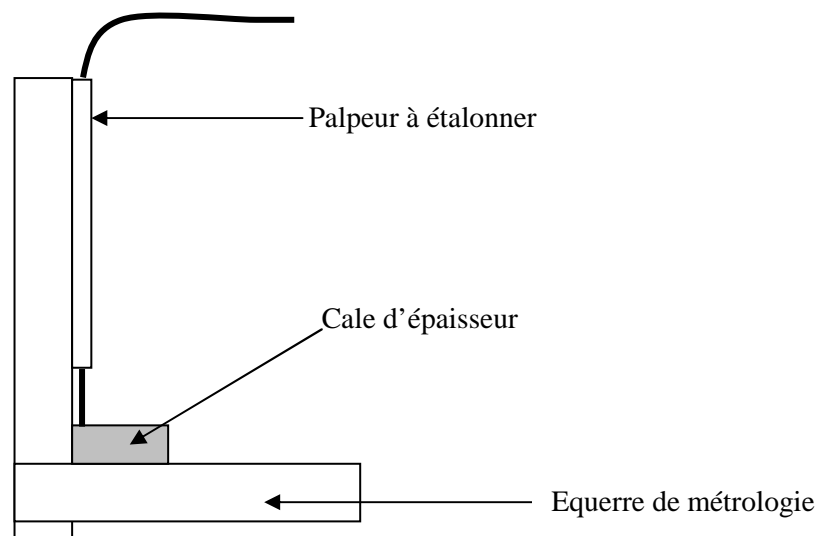


Figure 29: schéma du premier mode opératoire de l'étalonnage

Avec ce mode opératoire, nous constatons des erreurs pouvant atteindre $18 \mu\text{m}$. Par ailleurs, les courbes d'étalonnages ne sont pas reproductibles. En effet, plusieurs séries de mesures ne donnent pas la même allure de courbe.

Nous constatons que cette méthode est très sensible à la manière dont les cales sont placées. Dans nos conditions de manipulation (hall d'expérience climatisé), il est difficile de ne pas coincer de poussières entre la cale et l'équerre. Celles-ci faussent irrémédiablement les mesures. Par ailleurs, la tenue du palpeur le long de l'équerre est également problématique. Si le serrage est trop fort, le corps du palpeur est déformé entraînant un biais sur les mesures. Si le serrage est insuffisant, le ressort de rappel de la tige mobile tend à déplacer le palpeur le long de l'arête. Le compromis entre ces deux situations est difficile à trouver. Ces remarques nous conduisent à considérer une deuxième méthode.

Celle-ci s'appuie sur un principe assez différent. Le palpeur est maintenu sur une table de déplacement micrométrique motorisée et s'appuie sur une butée externe. Sachant que ces tables ne réalisent jamais des translations parfaites à cause des mouvements parasites dus aux effets de lacet, tangage et roulis, nous installons un capteur Rasnik pour en mesurer les déplacements. A l'aide des tables, nous effectuons des déplacements par pas constants sur

toute l'étendue de mesure. A chaque mouvement, un PC enregistre simultanément la position de la table donnée par son contrôleur, la mesure du palpeur et la mesure du Rasnik. La Figure 30 illustre ce montage.

Si cette méthode est séduisante par son aspect automatique et indépendant de la dextérité d'un opérateur, elle présente néanmoins un inconvénient. En effet, la tenue du palpeur pose les mêmes problèmes que pour la méthode précédente et le parallélisme entre l'axe du palpeur, celui de la mesure Rasnik et celui du déplacement est très difficile à contrôler. De ce fait, il est possible que sur les courbes d'étalonnage s'ajoute une dérive linéaire due à un effet d'angle. L'enregistrement de la Figure 31 montre l'écart entre la valeur du palpeur et celle mesurée par le Rasnik. Nous constatons que cet écart atteint $17\ \mu\text{m}$. Cet enregistrement fait apparaître plusieurs séries de mesures, permettant d'évaluer la reproductibilité des courbes d'étalonnage. Nous pouvons voir que ces courbes sont compatibles les unes par rapport aux autres dans une enveloppe de 3 à $4\ \mu\text{m}$. Nous relevons cependant quelques points pour lesquels cette enveloppe est supérieure. Nous pouvons penser qu'il s'agit « d'erreurs » de mesures, bien qu'aucun opérateur n'intervienne pendant cette phase.

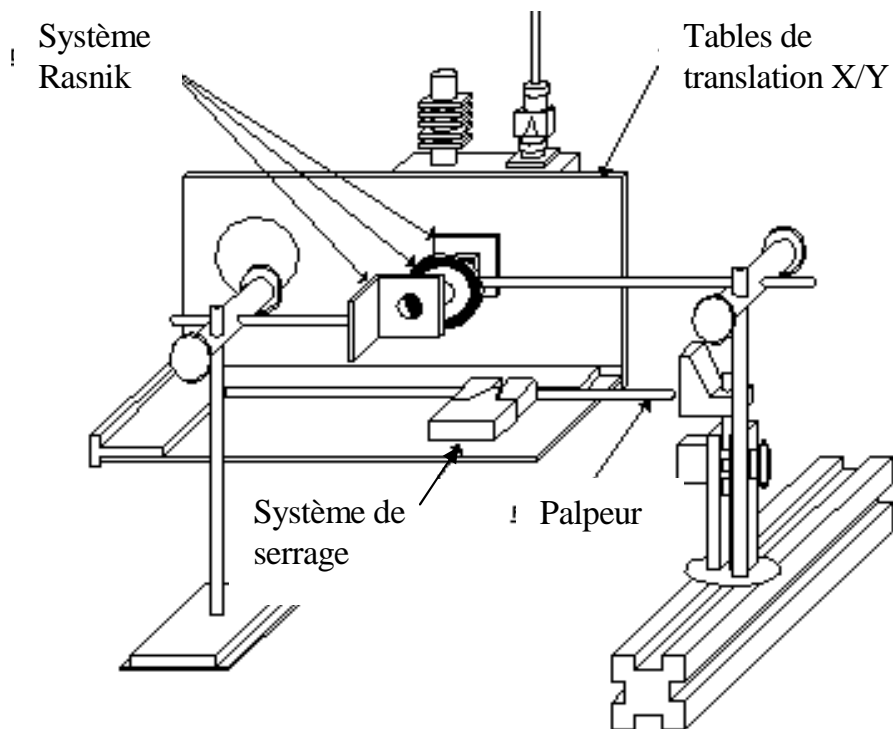


Figure 30: second dispositif expérimental utilisé pour l'étalonnage des palpeurs.

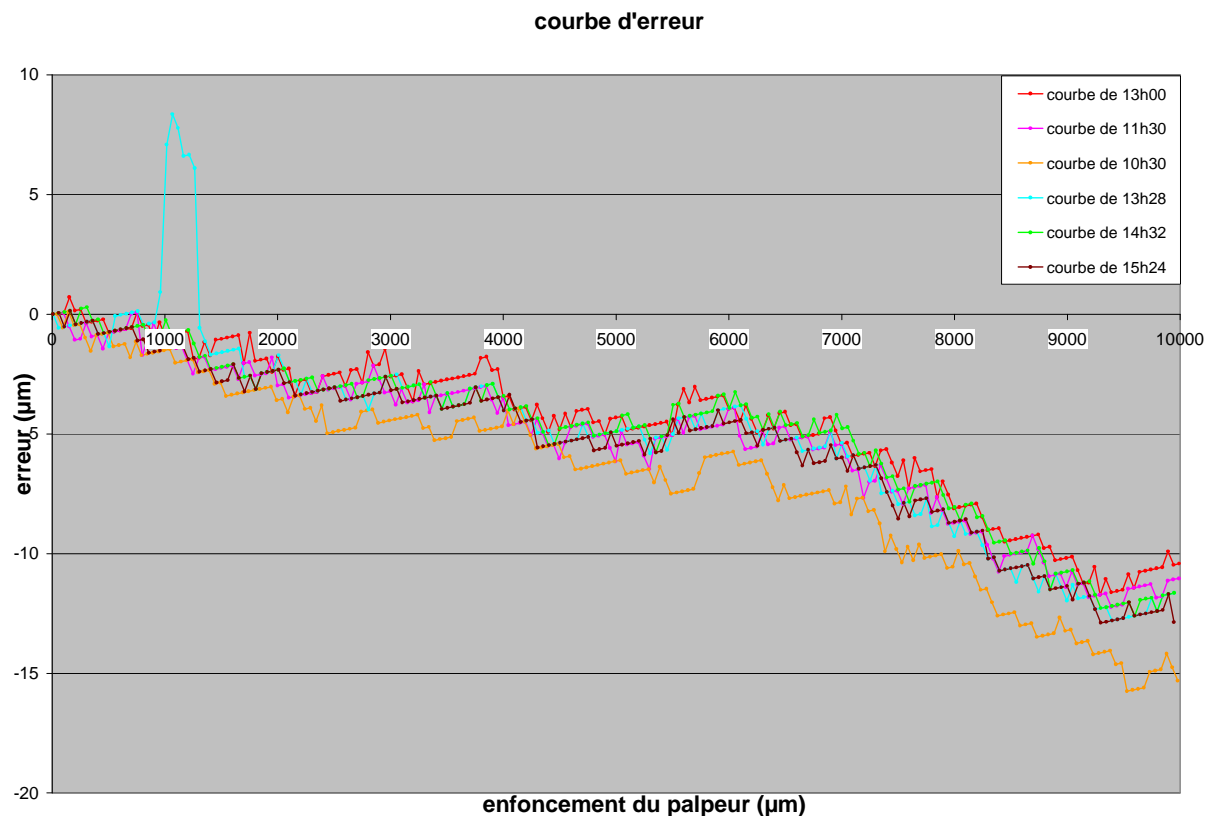


Figure 31: courbes d'erreur obtenues avec le second montage.

Pour remédier à ces problèmes, nous avons mis au point un troisième mode opératoire combinant les avantages des deux précédents. Le palpeur est maintenu par une pièce effectuant un serrage sur sa périphérie. Ainsi, nous pouvons assurer un bon maintien du palpeur sans le déformer. Par construction mécanique, l'axe du palpeur est parallèle à l'une des faces du support mécanique. Cette face s'appuie sur un marbre plan muni d'une règle. Nous appuyons le corps du palpeur (cylindre en acier inoxydable diamètre 8 mm, tolérance h6) sur deux cales d'égale épaisseur elles-mêmes posées contre la règle. Ainsi, l'axe du palpeur est parallèle à la droite définie par l'intersection du plan d'appui et du plan de la règle. Une platine équipée d'un masque Rasnik glisse en appui sur le marbre et le long de la règle. Cette platine actionne le palpeur. La caméra CCD et la lentille sont fixées également sur le marbre et mesurent les déplacements de la platine via le masque. La Figure 32 montre le dispositif expérimental.

Avec ce dispositif, nous avons obtenu des mesures très répétables. Nous avons reproduit les étalonnages de deux palpeurs sur une période de trois mois. Ainsi, nous avons pu quantifier la reproductibilité de ces étalonnages.

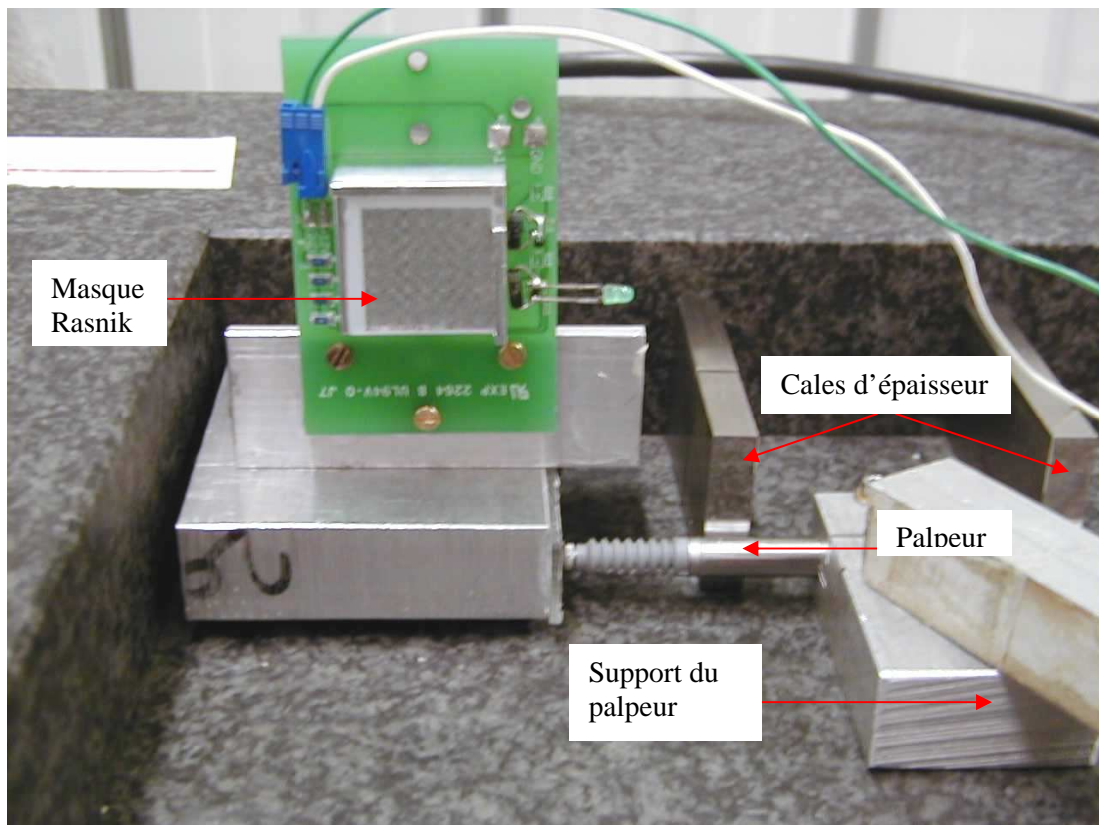


Figure 32: montage mécanique utilisé pour l'étalonnage des palpeurs

La figure 33 montre une représentation graphique issue de ces étalonnages. L'axe des abscisses correspond aux mesures du palpeur en μm . En ordonnée figure l'erreur en μm , définie comme la différence entre les mesures du palpeur et celles données par le système Rasnik.

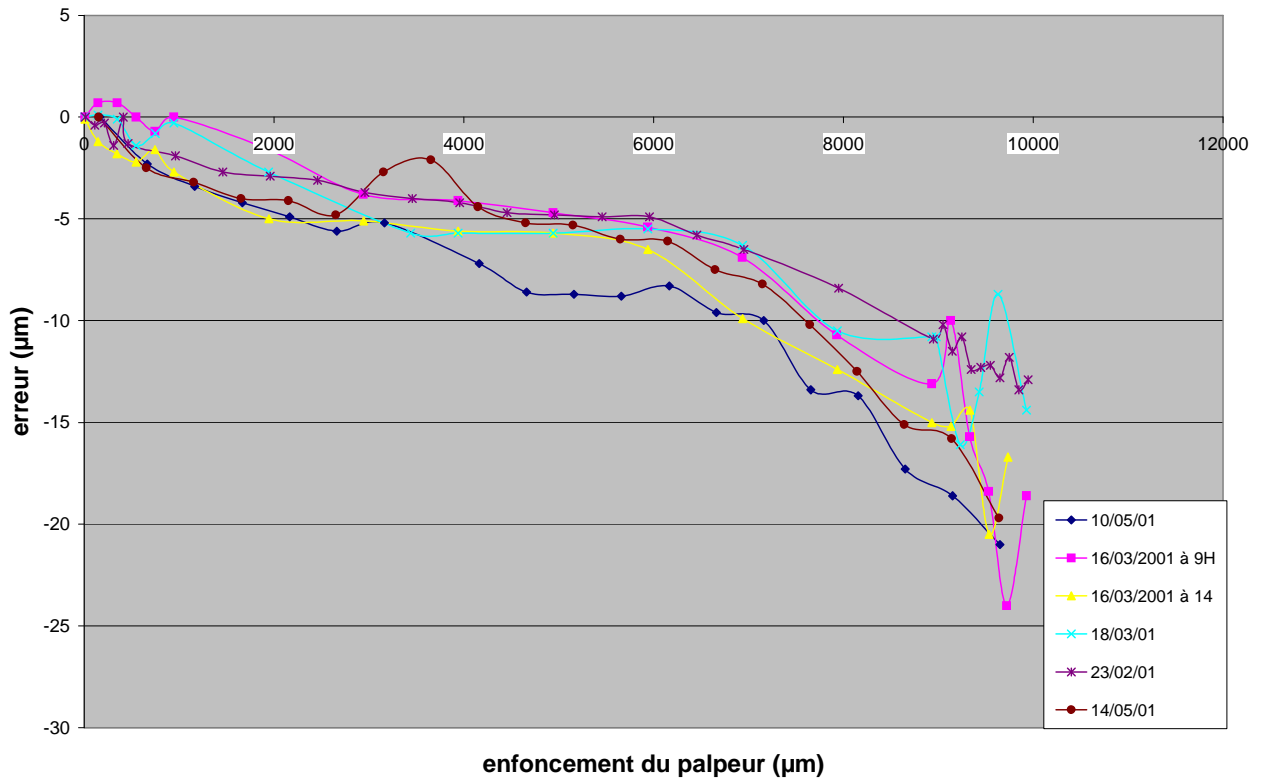


Figure 33: courbes d'erreur d'un palpeur LVDT mesurées sur une période de 3 mois.

Nous pouvons voir sur ce graphique que les courbes d'étalonnage sont contenues dans une enveloppe de 5 μm de largeur pour des enfoncements compris entre 0 et 8 mm. Au-delà, dans les deux derniers millimètres de course, l'erreur croît et la reproductibilité se dégrade. Ces résultats, obtenus pour un palpeur, se répètent pour le second testé. Cela a deux conséquences pour notre banc Caliprax.

- L'étendue de mesure exploitable n'est que de 8 mm, sur les 10 mm de course que possèdent les palpeurs.
- Même si nous corrigeons l'erreur « moyenne » en appliquant une régression (un polynôme d'ordre 3 donne de très bons résultats), il subsiste une incertitude de mesure liée à la reproductibilité des étalonnages. Cette erreur est de l'ordre de $\pm 2 \mu\text{m}$.

Toutefois, nous procédons à l'étalonnage de 12 palpeurs, dont 9 pourraient être utilisés sur le banc Caliprax. Parmi les 12 palpeurs étalonnés, 6 sont de 1996 et 6 autres de 1999.

Suite à l'achat en 1996, nous avons procédé à un étalonnage des 18 capteurs. La méthode utilisée pour cet étalonnage était de comparer les mesures des palpeurs aux déplacements de tables motorisées. A l'époque, nous accordions une totale confiance aux tables, sans tenir compte des effets de lacet, tangage et roulis évoqués précédemment. Nous pouvons donc remettre en cause la validité de ces enregistrements. Pour les 6 palpeurs issus de cette commande, les courbes d'étalonnage obtenues en 1996 et celles obtenues en 2001 sont très différentes. Si nous pouvons douter de l'étalonnage fait en 1996, il est également possible de mettre en cause la stabilité dans le temps des caractéristiques des palpeurs. Interrogé sur le sujet, le fournisseur n'a pas pu nous fournir de réponse précise. En effet, il n'a fait, pour l'instant, ce genre de test que sur une période d'un an.

VI-2 Vérification du système Rasnik.

Un autre moyen de mesurer les mouvements de la plate-forme mobile du banc Caliprax est d'utiliser des systèmes Rasnik. La justesse de ces capteurs a déjà été prouvée dans le cadre des alignements « in-plane » et « projectif ». Cependant, l'utilisation de systèmes Rasnik pour le Caliprax diffère des deux cas précédents. En effet, pour ces deux alignements, les distances focales utilisées sont relativement longues, entre 0,5 et 3 m. Dans le cas du Caliprax, la présence d'éléments mécaniques, et l'espace alloué pour les capteurs de déplacement nous oblige à utiliser des distances focales bien plus courtes (inférieures à 25 mm). Outre les aberrations géométriques liées aux courtes focales, nous devons faire face à un autre problème : pour certains mouvements du banc, les systèmes Rasnik vont être fortement défocalisés. Par ailleurs, nous allons également effectuer des rotations autour des axes pour lesquels le système Rasnik ne donne pas de mesure. Il est donc nécessaire de vérifier si l'incertitude de mesure est conservée pour cet emploi particulier du système Rasnik.

Le premier test consiste à vérifier l'exactitude du système pour plusieurs mises au point. Pour cela, nous avons utilisé un montage similaire à celui illustré par la Figure 21. Le support du masque est pourvu de 6 billes dont trois prennent appui sur la face plane du marbre. Les deux billes définissant l'appui trait coulisent le long d'une règle également en marbre. La bille de l'appui ponctuel sert à fixer la position le long de l'axe optique du Rasnik. Nous appellerons cet objet le « support masque » dans la suite du paragraphe. La lentille et la caméra CCD sont solidaires d'un autre support, lui-même fixé au marbre. Pour cela, ce support sera appelé « support fixe » par la suite. La position du masque le long de l'axe optique est déterminée de manière à rechercher l'optimum de mise au point. Ensuite, le masque est translaté perpendiculairement à l'axe optique, selon des valeurs connues (cales d'épaisseur). L'épaisseur de la cale est alors comparée au déplacement mesuré par le système Rasnik. Les essais sont faits dans une pièce climatisée à 20 °C.

Nous répétons cette procédure pour d'autres positions du masque le long de l'axe optique, dans une étendue de 12 mm.

Quelle que soit la mise au point, le système conserve une erreur (différence entre l'épaisseur de la cale et la translation mesurée par le système Rasnik) inférieure à 2 μm . Ce résultat est parfaitement en adéquation avec l'exactitude recherchée pour le contrôle des mouvements des tables motorisées.

Nous devons à présent vérifier l'influence de la rotation du masque autour d'un axe contenu dans son plan. Pour cela, le montage mécanique est adapté. Une pièce munie d'un alésage de diamètre inférieur à celui des billes est insérée entre l'une des billes de l'appui trait et la règle du marbre. Des cales d'épaisseur sont placées entre la seconde bille de l'appui trait et la règle. Ceci permet de maîtriser la position du centre de rotation et la valeur de l'angle. La Figure 34 : montage pour mesurer l'influence d'une rotation du masque montre ce principe.

VUE DE DESSUS

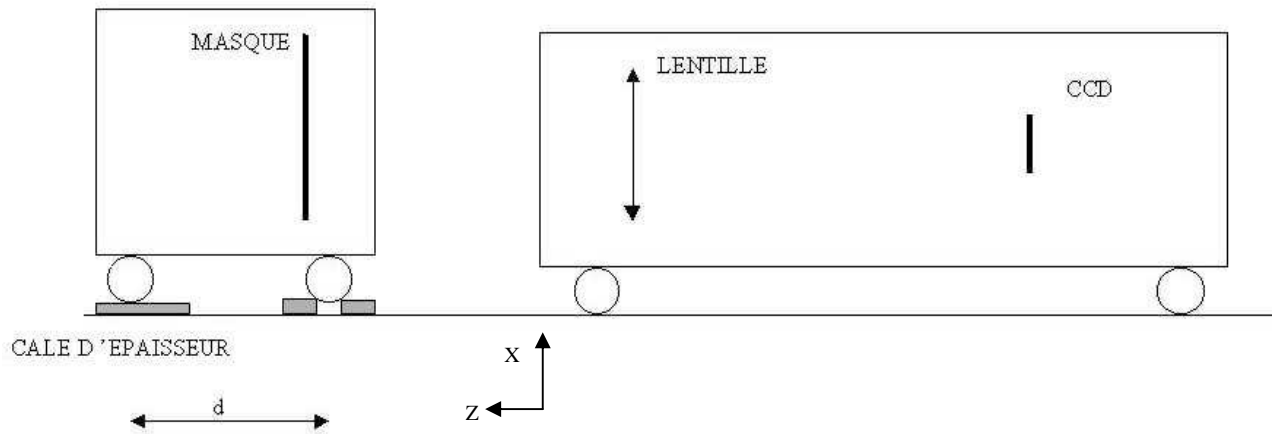


Figure 34 : montage pour mesurer l'influence d'une rotation du masque.

Comme nous pouvons le voir sur le dessin de la figure 34, le plan du masque ne passe pas forcément par le centre de rotation. De ce fait, l'application d'un angle connu sur le support masque se traduit pour le système Rasnik par un déplacement sur les mesures X et Z. Le principe de la mesure est alors de comparer le déplacement mesuré à un déplacement prédit.

Cette prédiction ne peut être faite que si la géométrie du support masque est bien connue. Nous mesurons alors cet élément avec la machine à mesurer tridimensionnelle évoquée au chapitre IV-2.

A l'aide de ces mesures, et avec quelques équations relevant de géométrie simple, le déplacement du masque peut être calculé. La rotation agit au premier ordre sur la position du masque selon la coordonnée Z, et affecte le grandissement du système Rasnik. Au second ordre, cette rotation agit également sur la mesure selon l'axe X. C'est ce second résultat que nous comparons à la variation de la grandeur X donnée par le logiciel d'analyse.

Si le système Rasnik était utilisé pour contrôler le mouvement des tables, ces mouvements angulaires seraient de l'ordre de ± 5 mrad. Nous avons donc fait ce test pour trois valeurs d'angle : 3,75 mrad, 7,5 mrad et 12,5 mrad. Ainsi, en exagérant ces angles, nous espérons en mettre en évidence les effets.

Pour les deux premières valeurs d'angle, l'écart entre la variation de la mesure et le déplacement prédit est inférieur à $0,3 \mu\text{m}$. Pour l'angle de 12,5 mrad, cet écart croît et atteint $1,4 \mu\text{m}$. Nous pouvons donc conclure qu'une rotation du masque autour d'un axe contenu dans son plan n'est pas préjudiciable pour les mesures X et Y données par le logiciel Icaras, dans la mesure où l'angle de rotation reste inférieur à 10 mrad.

La dernière série de tests que nous avons faits consiste à déplacer le masque dans le sens de l'axe optique et de voir l'effet sur les mesures en X et Y. Si ce test ressemble quelque peu au premier décrit, il n'en reste pas moins complémentaire. En effet, le premier essai mesurait l'influence de la défocalisation sur la mesure d'un déplacement (mesure relative). Ce dernier test, quant à lui, vérifie cet effet sur la mesure absolue donnée par Icaras.

Pour cela, nous avons utilisé un montage schématisé sur la Figure 35 (en vue de dessus). Le support de l'ensemble lentille et caméra CCD est fixé sur le marbre, le long d'une règle. Le support du masque est déplacé le long de la même règle par pas réguliers. A chaque position en Z du masque, nous relevons les mesures X et Y données par Icaras.

L'analyse des résultats est faite par le tracé sur un graphique de la mesure X (et/ou Y) en fonction de la position Z du masque.

VUE DE DESSUS

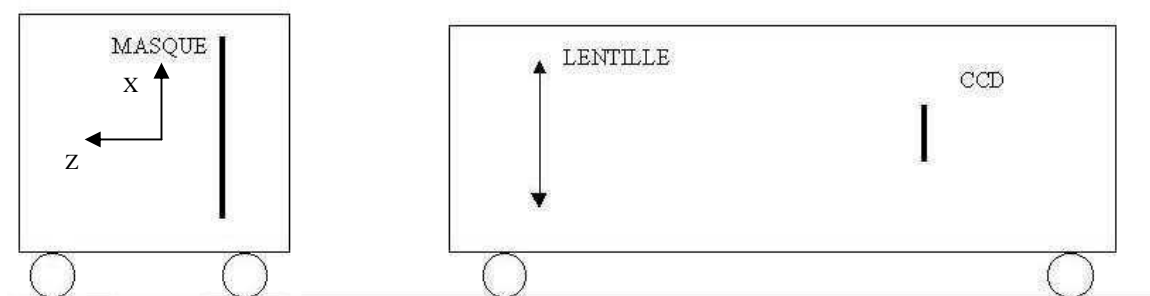


Figure 35: schéma du montage pour les mesures le long de l'axe Z.

En traçant la courbe décrite ci-dessus, nous observons une dérive linéaire des mesures X en fonction de la position Z du masque. Cette variation linéaire trouve une explication rationnelle dans le fait que l'axe « optique » joignant le centre de la caméra CCD au centre de la lentille n'a aucune raison d'être parallèle à l'axe mécanique le long duquel est faite la translation du masque. L'écart calculé entre les mesures expérimentales et des points obtenus par une régression linéaire de ces mesures reste inférieur à $2 \mu\text{m}$.

Pour valider ce test, il reste à prouver que l'hypothèse selon laquelle la dérive linéaire due au non-parallélisme des axes optique et mécanique est vraie. Nous pouvons le vérifier avec la procédure suivante :

- Effectuer une première série de mesures.
- Bouger le support camera et lentille d'un angle connu.
- Refaire une série de mesures.

Si notre hypothèse est juste, alors l'arctangente de l'écart entre les pentes obtenues pour les deux séries de mesures doit être égale à l'angle dont le support fixe a bougé. Selon ce principe et les résultats obtenus, nous recommençons plusieurs essais :

- A notre première tentative, nous tournons le support fixe d'un angle de $7,69 \text{ mrad}$. La différence entre les pentes des deux séries de mesures indique un angle de $6,94 \text{ mrad}$, soit un écart de $0,75 \text{ mrad}$ par rapport à l'angle réel (environ 10 % en valeur relative). L'incertitude sur le calcul des pentes est de l'ordre de $0,1 \text{ mrad}$. Cette valeur a été calculée en prenant l'incertitude sur les mesures Rasnik constante et égale à $1 \mu\text{m}$. L'incertitude sur les déplacements est négligée.

Ce résultat, loin d'être satisfaisant, peut être expliqué par le fait que la valeur absolue des pentes (qui nous renseigne sur le parallélisme des axes) est de l'ordre de $-0,035$. Ceci peut être interprété comme un désalignement d'environ 2° entre l'axe optique et l'axe mécanique (voir figure 36). Cette valeur peut être considérée comme « grande » et nous décidons d'améliorer notre montage.

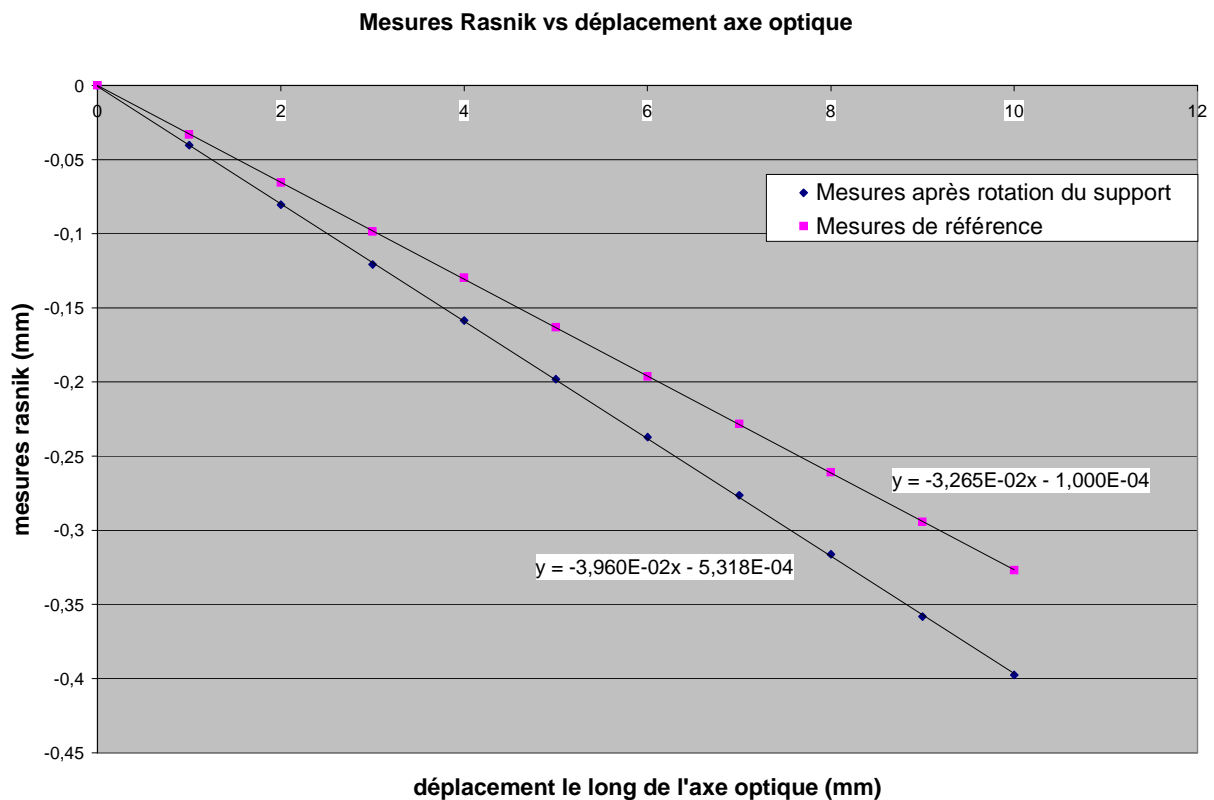


Figure 36: tracés des mesures Rasnik pour un déplacement du masque le long de l'axe optique ; première série.

- La valeur absolue des pentes étant un bon indicateur du parallélisme entre les axes mécanique et optique, nous réglons le support fixe de manière à ce que les mesures Rasnik X restent à peu près constantes lorsque le support masque se déplace. Ainsi, nous définissons un axe « neutre » qui semble être parallèle à l'axe mécanique. Cet axe nous sert de référence. Rien n'est fait pour l'axe Y.

Nous recommençons alors une série de mesures identique à la précédente. Cette fois, les résultats sont bien meilleurs, puisque l'angle calculé avec les pentes ne diffère plus que de 0,13 mrad avec l'angle réel. Compte tenu des incertitudes sur les calculs de pente, nous pouvons conclure que ce test fonctionne. Nous recommençons une série de mesures pour confirmer cet essai. Là-encore, les valeurs des angles calculés et réels sont compatibles aux incertitudes de mesures près. Un troisième essai est fait avec une valeur d'angle plus grande (de l'ordre de 20 mrad). Cette fois, l'erreur est à nouveau de l'ordre de 0,3 mrad.

- Satisfaits par le test précédent, nous décidons de procéder de même pour l'axe Y du Rasnik. A l'aide de feuilles calibrées, nous réglons l'orientation du support fixe de manière à trouver un axe neutre pour les mesures Rasnik X et Y. Nous recommençons alors des séries de mesures pour des angles de 7,7 et 35,5 mrad (la rotation n'affecte que les mesures en X).

Les résultats de ces essais sèment le trouble dans notre esprit. En effet, la valeur de l'angle calculée pour la rotation de 7,7 mrad est 6,63 mrad tandis que celle pour l'angle de 35,5 mrad est 35,53 mrad.

N'ayant pas réussi à montrer que le système Rasnik utilisé avec des distances focales courtes donne satisfaction pour le contrôle des mouvements, nous décidons d'effectuer ces

mesures par des palpeurs. Les capteurs LVDT numériques à notre disposition n'étant pas suffisamment précis et reproductibles, nous portons notre choix sur des palpeurs à codeur optique linéaire. L'incertitude de mesure annoncée par le fabricant est de $\pm 0,5 \mu\text{m}$, avec une résolution de $0,05 \mu\text{m}$ sur une étendue de mesure de 25 mm. Nous obtenons le prêt de l'un de ces codeurs optiques linéaires ce qui nous permet de vérifier ces chiffres. Par la même occasion, nous profitons de ce capteur très précis pour refaire l'étalonnage d'un capteur LVDT que nous possédons (cf section VI-1). Nous relevons une courbe tout à fait comparable à celle obtenue avec notre méthode.

Cependant, nous poursuivons les tests sur le système Rasnik afin de trouver la cause de ce fonctionnement hérétique. Outre l'aspect scientifique qui nous pousse à savoir pourquoi nous n'observons pas des résultats reproductibles, cette démarche est rendue quasiment obligatoire par le fait que le fonctionnement intrinsèque du capteur Praxial est remis en cause. L'ensemble de ces tests a fait l'objet d'une note interne [12].

VII TEST DU SYSTEME RASNIK.

Rappelons que dans la majorité des cas sur le détecteur ATLAS, les systèmes Rasnik utilisent des lentilles dont les distances focales sont supérieures à 500 mm et peuvent atteindre 1,5 m. L'institut NIKHEF d'Amsterdam a développé le système Rasnik pour ces configurations. L'incertitude de mesure obtenue pour des mouvements transverses à l'axe optique est de $1\ \mu\text{m}$, l'incertitude de mesure relative sur le grandissement est de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$ et celle sur la mesure de rotation est de $150\ \mu\text{rad}$. Ces incertitudes de mesures sont atteintes lorsque la mise au point est correcte.

Dans le cas du capteur Praxial, les distances focales utilisées sont comprises entre 40 mm et 100 mm. Le capteur doit mesurer des translations avec une incertitude de mesure souhaitée inférieure à $5\ \mu\text{m}$, y compris pour des déplacements le long de l'axe optique. Lors de ces déplacements, la netteté de l'image va évoluer mais ne doit pas influencer sur l'incertitude des mesures.

Nous avons vu dans le chapitre VI-2 des tests menés sur un système Rasnik avec une lentille de distance focale 20 mm, de 25 mm de diamètre (et par conséquent, très épaisse). Ces essais nous ont montré que la netteté de l'image du masque vue par la caméra CCD n'affecte pas l'exactitude des mesures pour les déplacements transverses à l'axe optique. De même, une rotation du masque inférieure à 10 mrad autour de ses axes principaux ne provoque pas d'erreur dommageable. Par contre, nous n'avons pas prouvé que l'hypothèse selon laquelle la variation linéaire des mesures X et Y avec un déplacement en Z est vraie.

Les tests que nous effectuons consistent à :

- déplacer le masque le long de l'axe optique et rechercher une orientation du support (lentille + CCD) de manière à trouver des mesures X stables,
- tourner le support d'un angle connu,
- relever la grandeur X mesurée par Icaras, en fonction de la position Z du masque,
- comparer l'angle calculé par la pente de la droite $X=f(Z)$ à celui dont le support a tourné.

Jusqu'à présent, nous avons effectué trois séries de mesures donnant des résultats contradictoires. Globalement, nous sommes tentés de dire que le calcul des angles fonctionne bien pour des valeurs inférieures à 10 mrad, mais le dernier test est en désaccord avec ce postulat. Rappelons que l'incertitude associée au calcul d'angle est de 0,1 mrad. Cette incertitude est directement liée à celle avec laquelle les mesures Rasnik sont faites. Ainsi, nous vérifions qu'une variation de $1\ \mu\text{m}$ sur l'une des mesures peut faire varier la pente calculée de 0,07 mrad.

Nous changeons la lentille au profit d'un modèle typique du capteur Praxial : une lentille plan-convexe de diamètre 12 mm, avec une distance focale de 47 mm. L'épaisseur de la lentille étant considérablement réduite et sa longueur focale augmentée, nous espérons uniformiser les résultats. En effet, ces changements améliorent les aberrations géométriques apportées par la lentille.

Nous tournons le support caméra par pas de 5 mrad entre $-20\ \text{mrad}$ et $+10\ \text{mrad}$ autour de l'axe neutre, après avoir réglé celui-ci parallèle à la règle du marbre (à l'aide de cales d'épaisseur). Les résultats de cet essai prouvent que quelque chose nous échappe. En effet, l'erreur entre l'angle calculé et l'angle réel est de l'ordre de 0,15 mrad pour les angles de -20 , -15 et $-10\ \text{mrad}$, alors qu'elle est de 0,35 mrad pour les autres valeurs. Les valeurs calculées les plus proches des angles réels sont celles des grands angles (en valeur absolue).

Nous décidons de modifier le montage afin de mieux contrôler nos mesures. Nous ajoutons au dispositif précédent un second système Rasnik (voir Figure 37). Cet ensemble, fixé au marbre, nous sert de référence et donne un critère de validité pour nos mesures. En effet, les positions prises par le masque sont identiques pour chaque angle du support caméra. Avec ce deuxième système Rasnik, nous pouvons contrôler que le support masque se replace bien à l'endroit souhaité, et qu'aucune poussière ou erreur de manipulation ne va perturber les mesures. Avec ce nouveau montage, nous pouvons faire tourner le système d'étude d'angles compris entre -5 et $+15$ mrad.

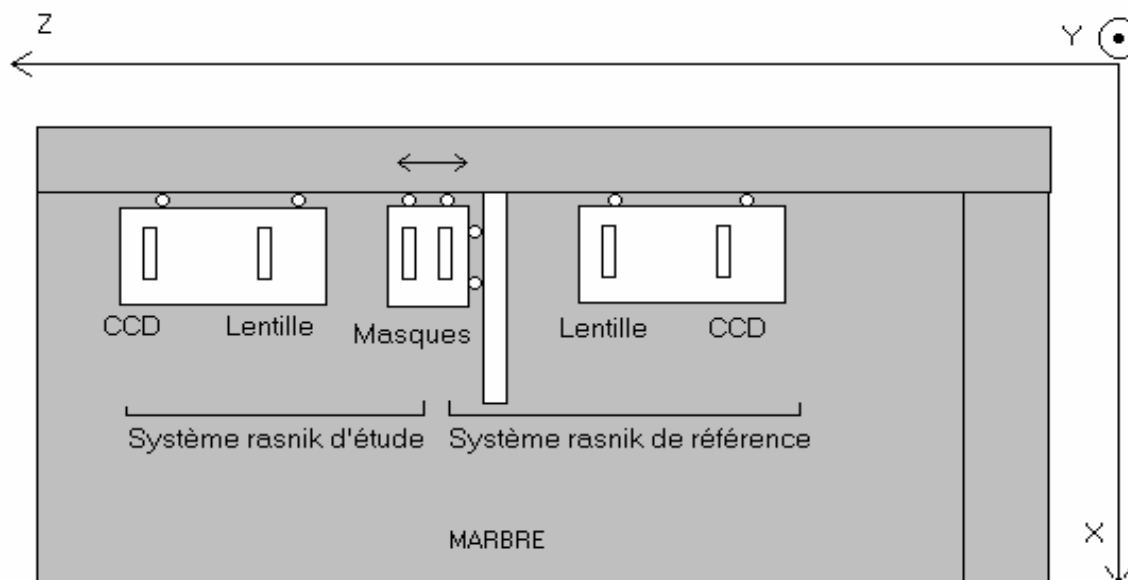


Figure 37: schéma du montage avec système de référence (vue de dessus).

Les valeurs calculées des angles sont compatibles avec les angles réels pour -5 et $+5$ mrad. Par contre, pour les angles de 10 et 15 mrad, l'erreur atteint 0,5 mrad. Ces résultats semblent confirmer la tendance observée lors des premiers essais. Lors de ce test, les mesures faites par le système de référence sont très reproductibles. Cependant, le système de référence ne voit pas une variation linéaire de la grandeur X mesurée par Icaras en fonction de Z. La figure 38 montre les variations de la grandeur X_{Rasnik} du système de référence en fonction de la position selon Z du masque. Puisque cette position est réglée par des cales d'épaisseur, l'axe des abscisses porte la mention « cales(mm) ». Les différentes séries correspondent aux orientations prises par le système Rasnik d'étude. En observant la figure 38, nous pouvons constater que la caractéristique $X_{\text{Rasnik}}=f(\text{cales})$ est linéaire pour des épaisseurs de cale comprises entre 1 et 4,5 mm puis entre 10 et 15 mm avec une pente semblable. Cette droite est brisée pour des épaisseurs de cales comprises entre 5 et 10 mm. La reproductibilité des mesures nous incite à penser que la forme observée est due à un défaut local du marbre.

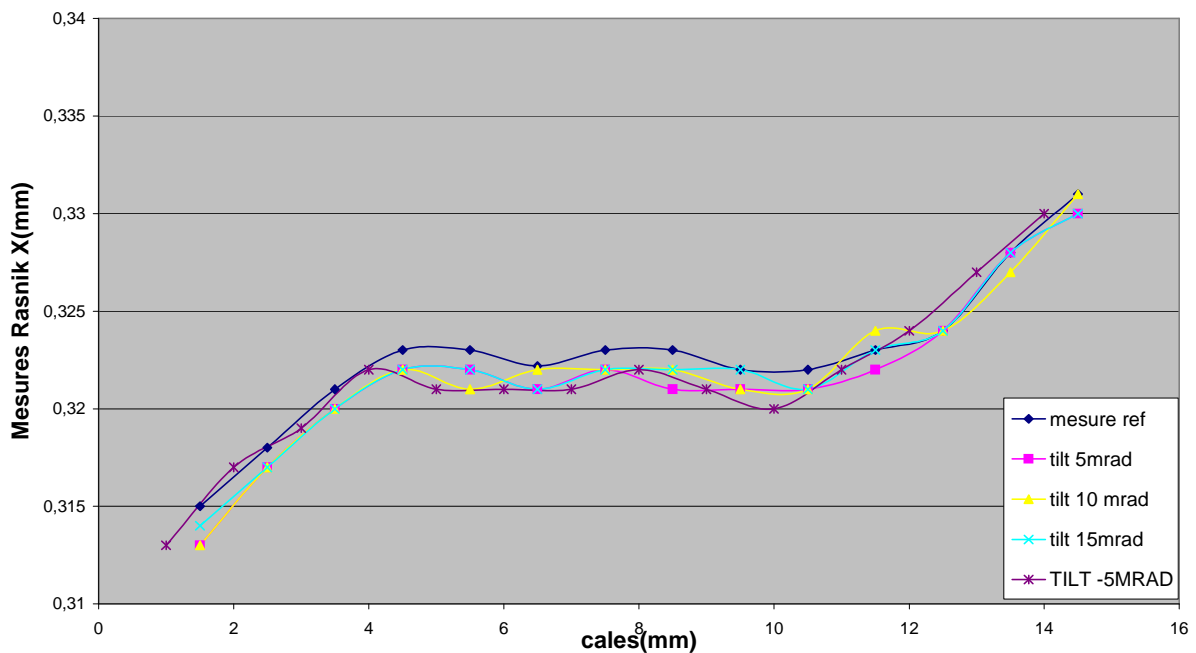


Figure 38: mesures du système Rasnik de référence.

Pour confirmer cette allégation, nous avons complètement nettoyé la surface du marbre, puis reproduit cet essai à un endroit différent.

Cette fois, les mesures du système de référence ont bien des variations linéaires avec le déplacement en Z. Là-encore, ces mesures sont très reproductibles. L'analyse des résultats du système Rasnik d'étude montre que les angles calculés sont compatibles avec les angles réels jusqu'à 10 mrad (erreur $\pm 0,07$ mrad). Au-delà, l'erreur croît pour atteindre 0,4 mrad pour un angle de 16 mrad.

Sur l'ensemble des tests que nous avons menés, nous obtenons parfois des résultats contradictoires. Cependant, au cours des essais, nous avons apporté de plus en plus de rigueur à nos manipulations de manière à éliminer les sources d'incertitude. Ainsi, nous faisons plus confiance aux deux derniers essais qu'aux premiers. De ce fait, nous nous accordons à dire que notre hypothèse de départ est vérifiée : la dérive linéaire des mesures X et Y d'Icaras lors d'un mouvement du masque dans le sens de l'axe optique est due au non-parallélisme des axes optique et du déplacement. Ce résultat nous reconforte pour l'utilisation de systèmes Rasnik avec des distances focales courtes pour le capteur Praxial.

VIII ETUDES MECANIQUES.

VIII-1 Gestion de projet, planning.

Dans l'organigramme du projet, les études, dessins, consultations, appels d'offre et réceptions de pièces mécaniques incombent au Service de la Gestion de Projets et Ingénierie (SGPI). Ce découpage des tâches est commun à tous les projets dans lesquels le DAPNIA est impliqué. Cela signifie que la charge de travail supportée par le SGPI est énorme. De ce fait, l'affectation des ressources aux projets, arbitrée par la hiérarchie du service, est une composition complexe de différents paramètres : les besoins exprimés par les chefs de projets, les ressources déjà affectées, les ressources disponibles, l'activité du projet à un instant donné, les priorités imposées par une hiérarchie supérieure et parfois des motivations personnelles.

Dans ce contexte, le projet ATLAS a souffert d'un manque d'effectifs en études mécaniques. Alors que le besoin exprimé par l'équipe projet en dessinateurs était de trois personnes à temps plein, coordonnées par un ingénieur d'études, nous n'avons pu bénéficier à certaines périodes que d'un dessinateur avec Patrick Ponsot, l'ingénieur d'études. Si cette situation est restée temporaire (plusieurs mois quand-même), nous avons toujours été en sous-effectif compte tenu de la quantité d'études différentes à mener en parallèle. Ainsi, l'équipe projet a dû établir des priorités sur les activités propres à son projet, de manière à satisfaire au mieux nos partenaires dans la collaboration internationale qu'est ATLAS.

Une des conséquences de ces arbitrages est que les études concernant le banc Caliprax et la platine Praxial sont arrivées tard par rapport au planning prévu au début du projet décrit dans ce mémoire.

Avec un défaut de personnes disponibles pour une charge de travail donnée, la hiérarchie du SGPI soustraite certains dossiers. Dans ce cas, elle fait appel à une société choisie dans une liste d'entreprises agréées, avec qui le SGPI travaille régulièrement.

Les études du Caliprax et de la platine Praxial ont fait partie de ce lot et ont été sous-traitées par une société que nous appellerons **S**.

La société **S** a déjà travaillé à plusieurs occasions avec le SGPI et a fourni des travaux de qualité. Cependant, au moment où le dossier leur est parvenu, **S** avait une activité débordante. Dans ces périodes intenses, l'entreprise emploie des intérimaires pour répondre à toutes les demandes, plutôt que de refuser des contrats. Le hasard a fait que notre dossier a été pris en charge par une personne ayant peu d'expérience dans le domaine. Bien que l'ingénieur du SGPI ait suivi de très près cette étude, sa collaboration avec la société **S** était bridée par le contrat de sous-traitance. En effet, dans le cadre d'une sous-traitance, il n'est pas possible à l'ingénieur d'études du CEA de travailler en contact direct et en temps réel avec le dessinateur. Ce n'est qu'après avoir terminé l'avant-projet que le dessinateur le soumet à son interlocuteur au CEA.

Après deux mois et trois versions d'avant projet refusées, nous avons cessé notre collaboration avec l'entreprise **S**. Dans sa dernière version, l'avant projet proposé par **S** correspond à peu près au cahier des charges fonctionnel (bien que quelques erreurs de conception subsistent) mais sa réalisation entraîne un coût exorbitant. En effet, les dessins des

éléments du banc et de la platine font appel à des usinages complexes nécessitant beaucoup de main d'œuvre.

Le SGPI a donc repris en charge ces dossiers. Bien que des pré-études aient été menées par S, le travail était quasiment à recommencer puisque c'est la conception même du banc et de la platine qu'il fallait revoir afin de les simplifier et d'en réduire le coût de fabrication.

C'est au début du mois d'avril 2001 que Patrick Graffin, un dessinateur du SGPI a travaillé sur ce dossier. Après un peu plus d'un mois de travail, il a établi un dossier qui a été soumis à des entreprises de fabrications mécaniques pour un appel d'offres. Après avoir recueilli les différentes propositions financières, nous avons traité la commande au début du mois de juin.

VIII-2 Le banc Caliprax.

Le banc Caliprax, dans sa version finale, est représenté sur la Figure 39. Il s'articule autour de deux éléments principaux : une table motorisée 6 axes, achetée chez Micro-Contrôle (réalisation spéciale) et une table statique, fruit du travail de monsieur Graffin.

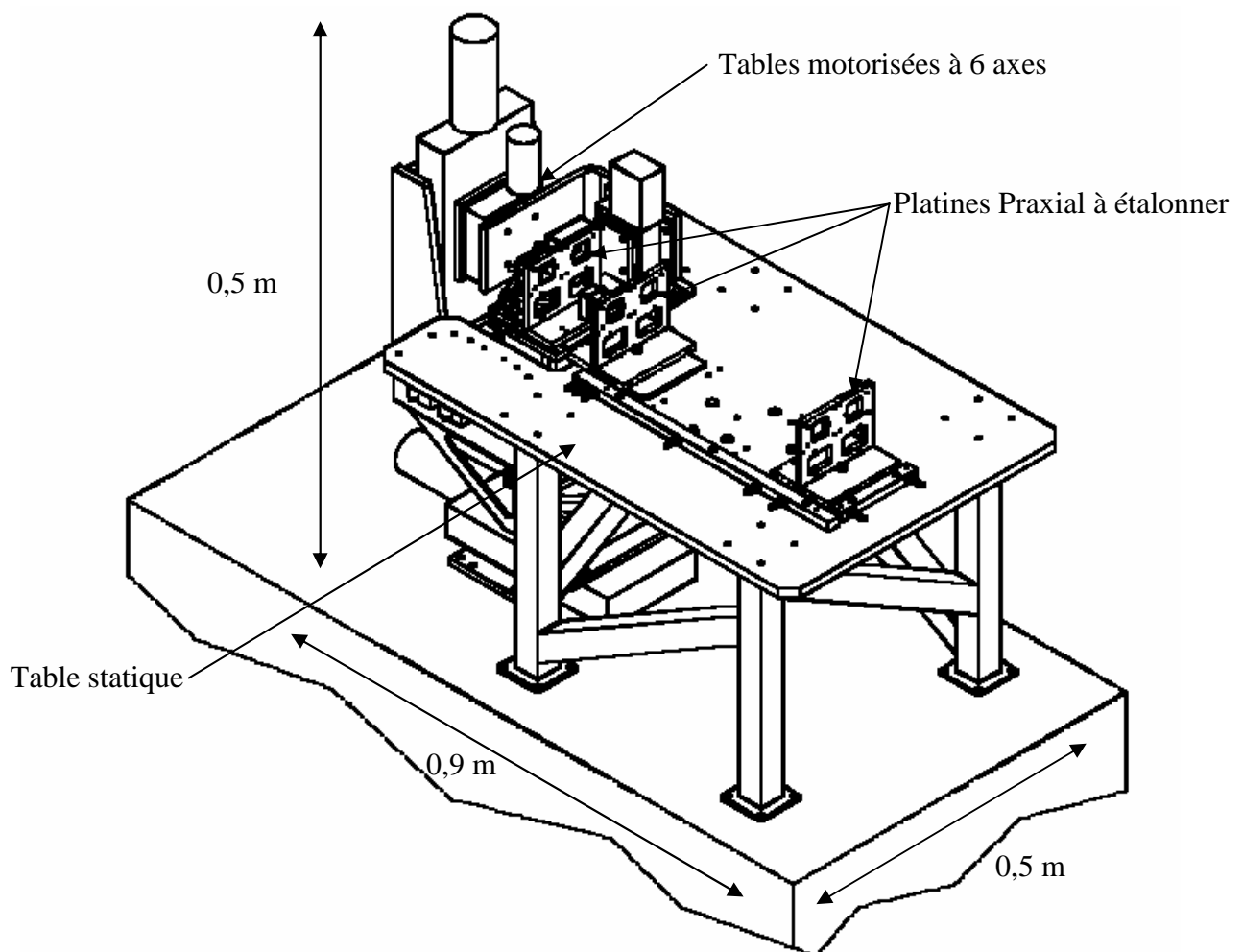


Figure 39: le banc Caliprax dans sa version finale.

La table 6 axes est constituée d'un empilement de platines de translation et de plateaux tournants standards. La charge à entraîner, la position et la course souhaitée ont conditionné le choix des éléments motorisés. Finalement, nous disposons d'un ensemble capable de déplacer une charge utile de 2 kg sur ± 50 mm pour les trois translations et $\pm 5^\circ$ pour les trois rotations. Cette table 6 axes est livrée avec son unité de pilotage. Dans l'utilisation nominale, l'une des platines du capteur Praxial sera fixée à cette table, tandis que la seconde platine sera fixée à la table statique que nous allons à présent détailler.

La table statique est un plateau d'aluminium épais fixé sur un ensemble de pieds rigides. Sa fonctionnalité est double.

- D'une part, elle permet de placer de façon reproductible les platines Praxial aux différents écartements rencontrés dans le détecteur ATLAS. Ainsi, les capteurs Praxial seront étalonnés dans une configuration proche de leur utilisation définitive. Pour cela, des inserts en acier rectifiés sont placés en regard de chaque bille équipant les platines Praxial. Le choix de la matière de ces inserts a été inspiré par les tests d'enfoncement que nous avons menés sur les plates-formes (voir section IV-2). La rectification trouve sa justification dans la nécessité d'avoir des appuis plans. Dans le but de ne pas trop compliquer la réalisation mécanique du banc, la position des ces inserts n'est pas affectée d'une tolérance serrée. Nous effectuerons ce réglage fin nous-mêmes.
- D'autre part, elle sert de support statique aux palpeurs utilisés pour mesurer précisément les déplacements de la table mobile. Afin d'obtenir de la redondance sur ces mesures, 9 palpeurs sont implantés (6 palpeurs sont nécessaires et suffisants). Ces 9 palpeurs mesurent la plate-forme mobile et sont répartis comme suit : 4 palpeurs en dessous, 3 le long de son grand coté et 2 le long de son petit coté. La Figure 40 illustre l'implantation des palpeurs autour de la plate-forme mobile. Afin de garantir la stabilité des mesures dans le temps, les zones d'appui des palpeurs sur la plate-forme sont également pourvues d'inserts en acier rectifiés. Les palpeurs disposent de pointes de touche sphériques en rubis de 7 mm de diamètre (pointes de touche standard : bille en carbure de tungstène de 3 mm de diamètre).

Initialement estimée entre 50 et 100 kF, la réalisation de cet ensemble mécanique ne coûte que 30 kF. Cet écart peut être attribué au travail de simplification qu'a fait Patrick Graffin, et probablement à la volonté d'une entreprise d'obtenir un contrat avec le CEA. D'autres sociétés ont chiffré cette réalisation à 40 kF.

Sur la figure 40, les palpeurs sont représentés en turquoise. La plate-forme mobile en gris, supporte la platine Praxial en ocre. La platine figurant sur cette vue est celle dessinée par la société S. Les supports des palpeurs horizontaux apparaissent en rouge, tandis que le support des 4 palpeurs verticaux est représenté en mauve. Nous pouvons voir les inserts en acier sur lesquels s'appuient les palpeurs (pastilles violettes sous la plate-forme).

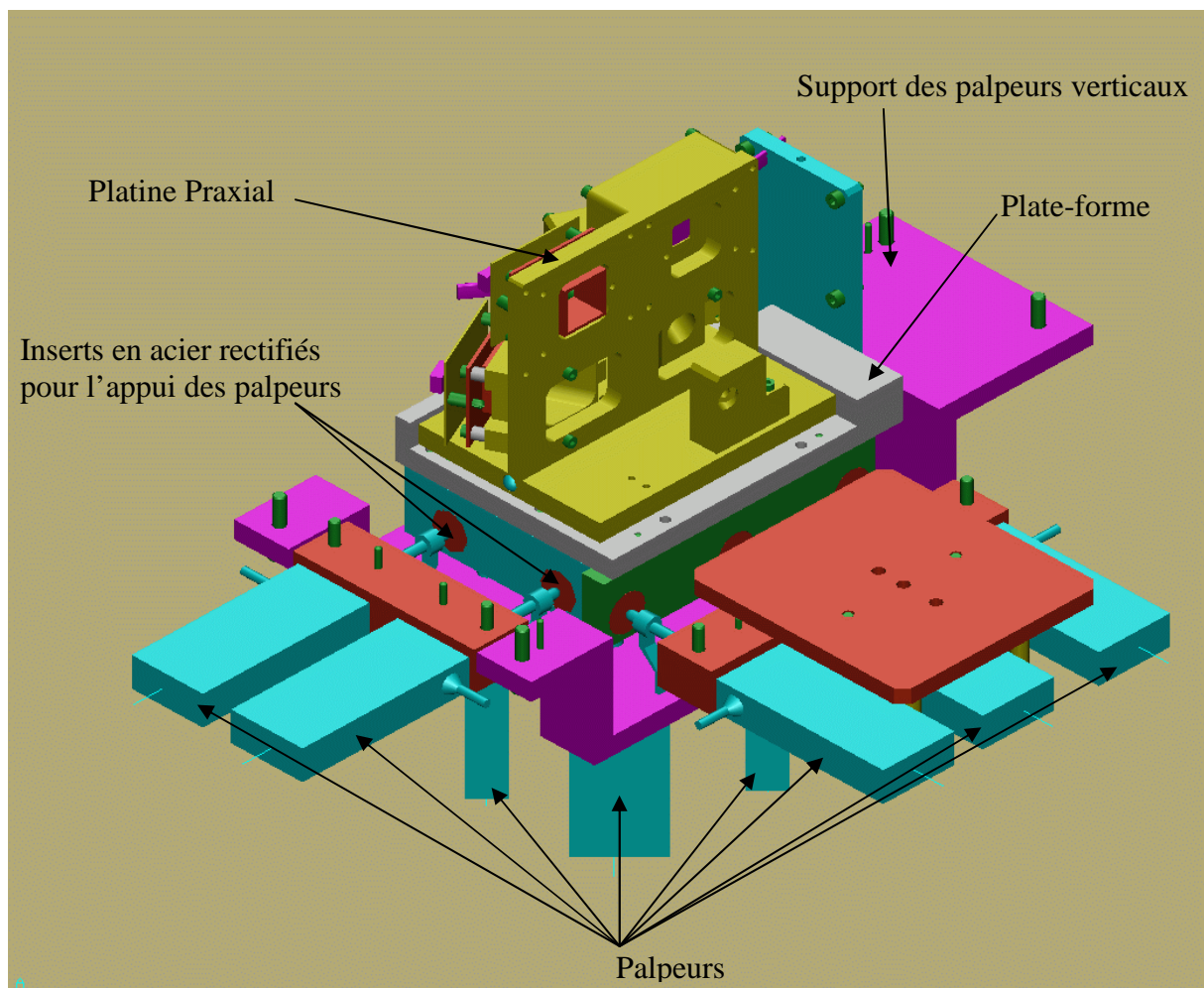


Figure 40: vue 3D de l'implantation des palpeurs.

VIII-3 Les platines Praxial.

Suite aux problèmes rencontrés avec la société **S**, évoqués au paragraphe VIII-1, l'étude des platines Praxial a été reprise par Patrick Girardot, un dessinateur du SGPI. Un mois après son affectation sur ATLAS, alors même qu'il acquérait une bonne vue d'ensemble du projet, il a dû abandonner ses travaux pour répondre à une demande urgente d'un autre projet. N'ayant pas d'autres dessinateurs disponibles, la hiérarchie du SGPI a également confié cette étude à Patrick Graffin. Ce n'est donc qu'après avoir terminé le dossier Caliprax qu'il a pu se consacrer à celui des platines.

Les platines, telles qu'elles étaient conçues par **S**, apparaissent sur la figure 40 en ocre. Bien qu'il soit difficile d'en juger sur cette vue, cette conception fait intervenir des pièces complexes, avec des usinages obliques, des alésages de section carrée... La complexité de ces pièces en rend la réalisation délicate. Lors d'une fabrication de pièces chez un sous-traitant, le montant du devis est proportionnel au temps d'usinage. Dans le cas de l'étude livrée par **S**, la réalisation de l'ensemble mécanique était estimée à 1200 F par platine, pour une série de 2500 unités.

A la fin de l'étude sur le Caliprax, Patrick Graffin a repris les travaux de son collègue. Il a créé deux versions de platines différentes. Le but de chacune d'elle étant de simplifier le plus possible la réalisation, elles s'appuient sur des composants standards adaptés.

Nous ne présentons qu'une des deux versions car les différences échapperont à un lecteur non familiarisé avec le dessin industriel. Dans cette solution, les supports de caméra et de lentille sont des tubes emmanchés l'un dans l'autre. Une entretoise permet de fixer la caméra sur le tube. Pour faciliter le positionnement dans les plates-formes, les platines sont désormais équipées de lames élastiques. Celles-ci ont pour rôle de plaquer la platine dans l'angle de la plate-forme.

La figure 41 montre un résultat de cette étude. Les faisceaux rouges représentent les trajets optiques des systèmes Rasnik. Avec ces modifications, le coût estimé pour la réalisation de ces pièces est tombé à environ 700 F.

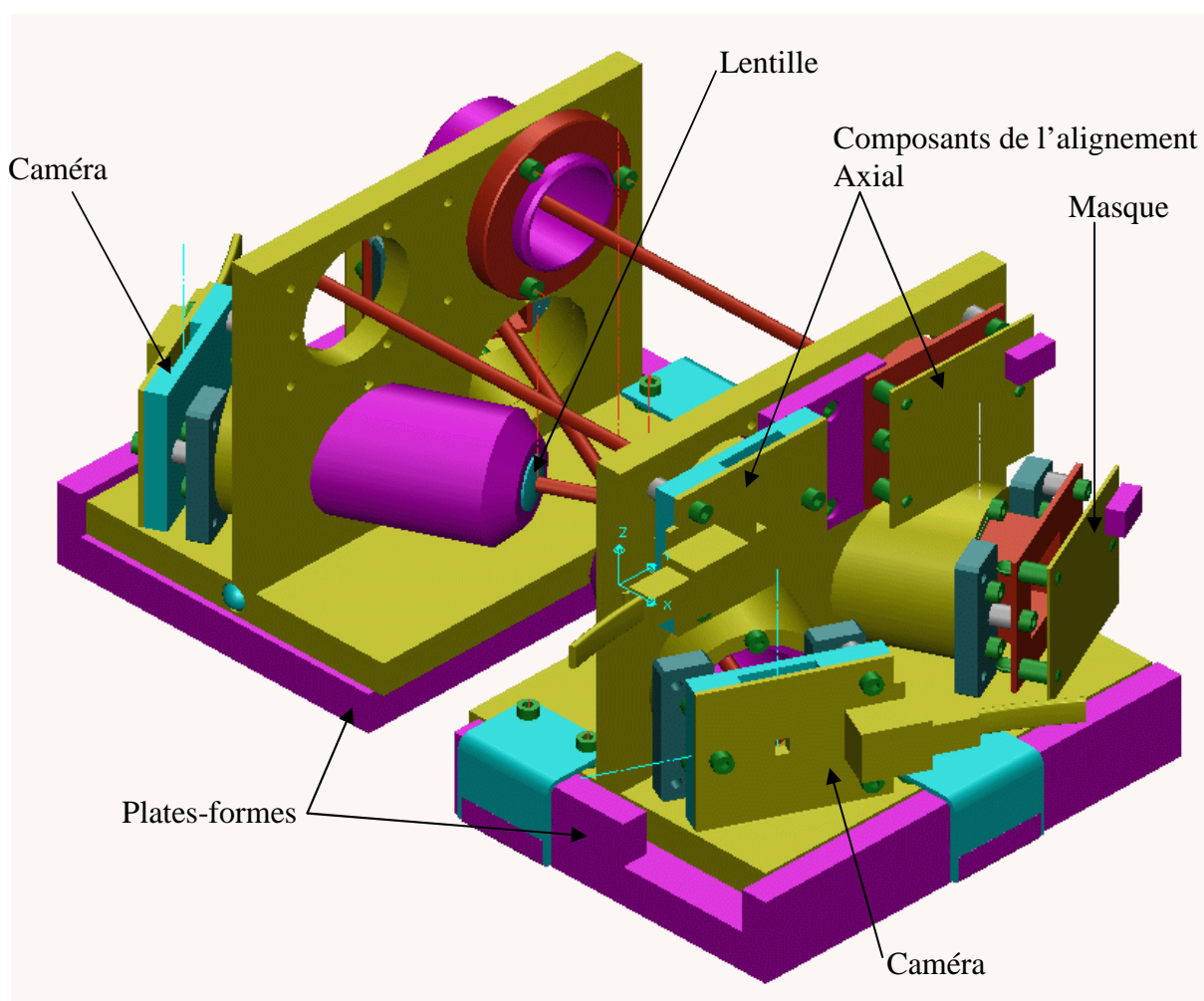


Figure 41: les platines Praxial après étude au SGPI.

IX INFORMATIQUE.

Abordons à présent la partie informatique de contrôle/commande. Bien qu'elle ne fasse pas partie des travaux que j'ai directement menés, il est justifié d'y consacrer un paragraphe. En effet, ce rapport présente l'ensemble des travaux qui ont contribué à l'aboutissement du banc Caliprax et cette partie y contribue.

Au sein du Service d'Instrumentation Générale, 5 groupes travaillent ensemble. Pour les projets ATLAS, les groupes « mesures et systèmes », « informatique » et « génie électrique » collaborent chacun dans son domaine de compétence. Ainsi, Valérie Gautard, du groupe informatique, a la charge d'écrire le programme associé au banc Caliprax.

Diplômée d'un doctorat en mathématiques appliquées, elle a fait sa thèse en collaboration avec l'Aérospatiale et l'Onéra sur l'optimisation de formes appliquée à l'aérodynamique. Ses compétences la prédestinaient à l'écriture du programme de l'étalonnage. Par extension, les autres fonctionnalisés du programme lui ont été attribués.

Pour le projet ATLAS Alignements, nous avons décidé de développer les programmes de contrôle et de commande des différents bancs en langage Visual C++, sous environnement Microsoft Windows 98. N'étant disponible pour le projet qu'à partir de février 2001, Valérie Gautard a débuté son travail par le programme d'analyse. Le principe de l'étalonnage est détaillé dans le paragraphe V-2. A l'issue de cette première phase, le banc Caliprax n'était pas disponible. Nous n'avons pas pu lui fournir des données de manière à tester son programme. De ce fait, elle a poursuivi ses travaux sur les autres pôles du programme général. Vers la fin du mémoire, nous avons acquis des mesures qui nous ont permis de tester le modèle du capteur Praxial.

Sa manière de programmer est de créer indépendamment des programmes qui permettent de remplir une tâche. Lorsque le programme fonctionne correctement, il est intégré dans un programme plus général qui réunit toutes les fonctions de base.

Dans un premier temps, elle a écrit la partie concernant les capteurs LVDT numériques (à l'époque, le choix définitif du moyen de mesure des mouvements des tables n'était pas fait). Cette première partie s'est inspirée d'un programme réalisé par Olivier Cloué pour une expérience antérieure.

Suite à la visite d'un commercial de la société vendant les palpeurs LVDT, nous avons bénéficié d'un prêt d'un capteur à codeur optique linéaire (SOLARTRON, modèle LE25S). De ce fait, le programme de lecture des palpeurs LVDT a été modifié pour être compatible avec les deux types de palpeurs.

Après ce premier pas, la lecture des sondes de température a été implémentée au programme général. Bien que ce type d'application ait déjà été développé auparavant, la programmatrice a dû recréer un programme de manière à l'adapter aux évolutions technologiques. Cette phase lui a également donné une parfaite maîtrise des fonctions utilisées. Ainsi, pour une phase ultérieure de maintenance, son travail en est facilité.

Par la suite, en collaboration avec Olivier Cloué, elle a écrit la partie concernant la lecture, l'analyse et la sauvegarde des données relatives aux systèmes Rasnik du capteur Praxial. Cette partie de programme doit s'interfacer avec Icaras, le logiciel de traitement des données Rasnik. Icaras permet d'effectuer la saisie d'une image Rasnik, de l'analyser pour en calculer

les paramètres (X, Y, grandissement et angle masque/caméra), et d'enregistrer ces résultats dans un fichier de sauvegarde. Le travail à faire consistait à pouvoir configurer puis déclencher Icaras depuis un autre programme, et de récupérer les quatre mesures intéressantes parmi toutes celles sauvegardées.

Parallèlement, Olivier Cloué a travaillé avec les tables motorisées. Il a écrit un module permettant de les piloter au travers d'un port série RS 232.

A l'issue de ces différentes tâches, période qui correspond à la fin de la rédaction de mon mémoire, chaque fonction que doit remplir le Caliprax est pourvue d'un programme informatique adapté. Le travail qui reste à accomplir est cependant important. Il consiste à réunir ces sous-programmes au sein du programme final d'étalonnage. Celui-ci aura pour fonction de synchroniser l'appel des routines citées précédemment pour mener l'opération d'étalonnage. Dans un second temps, avec toutes les données recueillies, ce programme exécutera le calcul de minimisation pour aboutir à la détermination de la position des éléments optiques sur les platines. Enfin, ces résultats seront enregistrés dans une base de données.

X QUALITE.

La culture « qualité » n'est pas encore complètement ancrée dans les projets du CEA. En dehors de quelques laboratoires qui travaillent pour des sociétés extérieures, la majorité des services n'est pas habituée à mettre en œuvre les consignes de l'assurance de la qualité. Cela ne doit pas être interprété au sens où les travaux réalisés au CEA ne sont pas de bonne qualité. Par contre, la règle « on fait ce qui est écrit, et on écrit ce qui est fait », n'est pas toujours appliquée.

Dans le projet ATLAS, et plus particulièrement sur la partie qui nous concerne, l'équipe projet a tenu à instaurer des procédures pour la qualité. Michel Fontaine a été nommé responsable de la qualité et avec lui, l'ensemble des membres de l'équipe a travaillé pour mettre en place ces procédures.

Le point de départ de cette réflexion est une séance de réflexion durant laquelle nous avons découpé l'activité de l'étalonnage des capteurs Axial/Praxial en pôles. De là, nous avons établi un document qui a évolué au cours du déroulement du projet.

Rappelons que sur les platines cohabitent les capteurs de l'alignement Praxial et de l'alignement Axial. L'étalonnage des capteurs inclut le montage, l'étalonnage de la partie Praxial, l'étalonnage de la partie Axial et l'assemblage fonctionnel des deux parties.

Nous établissons l'organigramme du plus haut niveau qui regroupe 6 tâches principales (Figure 42).

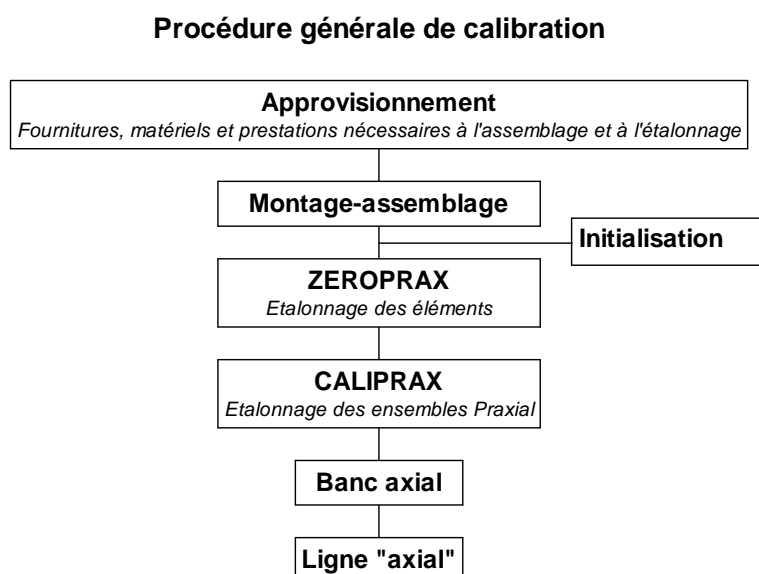


Figure 42: organigramme général de l'étalonnage d'un capteur Axial/Praxial.

L'approvisionnement est une tâche globale à tous les capteurs. Ils s'agit de l'achat, la réception le tri et le stockage de tous les composants nécessaires au montage d'une platine équipée. Cette tâche est un point d'entrée nécessaire pour la tâche suivante.

Le montage-assemblage, comme son nom l'indique, correspond à l'opération qui consiste à sélectionner les composants adéquats pour un type de platine (sélection de la focale des lentilles pour le Praxial et choix d'un composant parmi un masque, une lentille ou une caméra

pour l'Axial). Ensuite, l'opérateur monte ces éléments sur la platine et les fixe de façon définitive (vissage+collage).

Avant de démarrer les bancs d'étalonnage, nous envisageons d'effectuer une procédure d'initialisation. Celle-ci permet de s'assurer que tous les éléments des bancs fonctionnent correctement. A cette heure, cette procédure n'est pas définie.

Le premier banc sur lequel les platines passent se nomme « Zéroprax ». Il correspond à une position particulière des deux platines en vis-à-vis. Les platines sont situées dans le même plan, à un écartement correspondant à la cote nominale entre les chambres du détecteur. Ce banc offre en plus l'avantage de vérifier si les composants optoélectroniques fonctionnent. Sur le Zéroprax, nous enregistrons une mesure des deux Rasnik du capteur Praxial. Cette mesure sert de référence.

Par la suite, les platines sont démontées du Zéroprax pour être remontées sur le Caliprax. La procédure d'étalonnage décrite dans le paragraphe V-2 débute. A la fin de cette opération, les 28 paramètres propres aux deux platines étalonnées sont enregistrés dans une base de données. Les platines sont démontées et stockées dans l'attente de passer sur le banc Axial.

L'étalonnage sur le banc Axial immédiatement successive à celle sur le banc Caliprax. En effet, en se reportant à la figure 11, nous constatons que chaque composant optique d'un système Rasnik de l'Axial (masque, lentille ou caméra) est porté par une platine distincte. Cela signifie que pour étalonner un capteur Axial, il faut réunir trois platines. Notons au passage que ces trois platines ne sont pas nécessairement passées sur le banc Caliprax avant. Ces deux opérations sont indépendantes et n'ont pas d'ordre dans leur exécution.

Pour finir, lorsque 12 platines sont passées sur les banc Axial et Caliprax, nous les testons ensemble dans leur configuration finale. Ce test sert à valider le principe même des alignements Axial et Praxial, au sens où les mesures Praxial complètent les mesures Axial.

La suite de l'analyse consiste à détailler chaque tâche de ce premier organigramme pour établir des organigrammes de niveau 2. Pour cela, nous avons appliqué un modèle de découpage de tâche illustré sur la Figure 43.

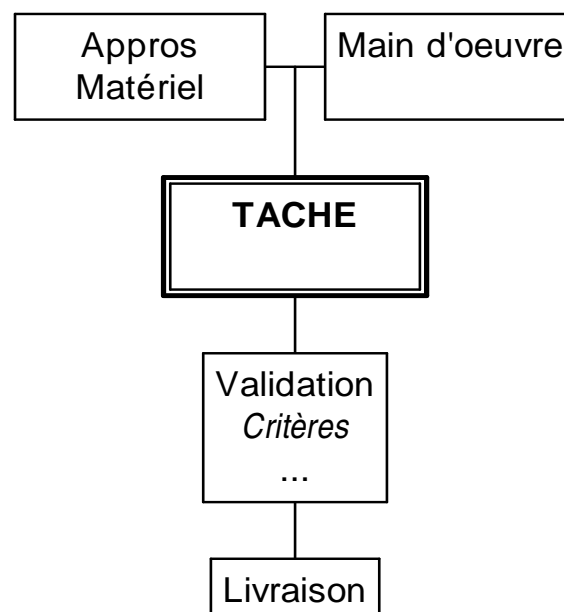


Figure 43: modèle d'analyse d'une tâche.

Selon ce modèle, chaque tâche est subordonnée à des approvisionnements matériels et de la main d'œuvre. La tâche est alors décrite. A l'issue de son exécution, des critères de validation permettent de décider si la tâche est correctement accomplie. Dans ce cas, le produit et la valeur ajoutée par la tâche sont livrés, c'est à dire qu'ils peuvent constituer un approvisionnement matériel pour une tâche successive.

Avec ce principe, nous avons détaillé toutes les tâches de l'organigramme de la Figure 42. Les organigrammes résultant de cette analyse sont illustrés sur figures 44 à 50.

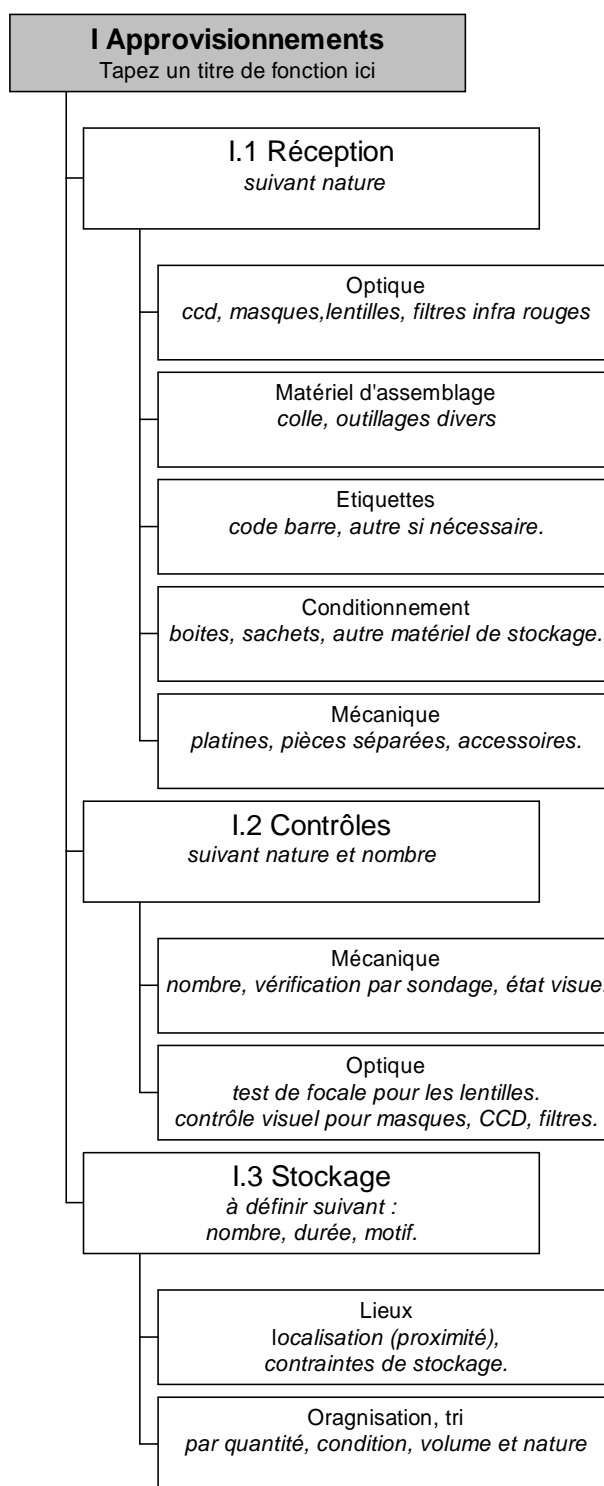


Figure 44: organigramme de niveau 2 pour les approvisionnements

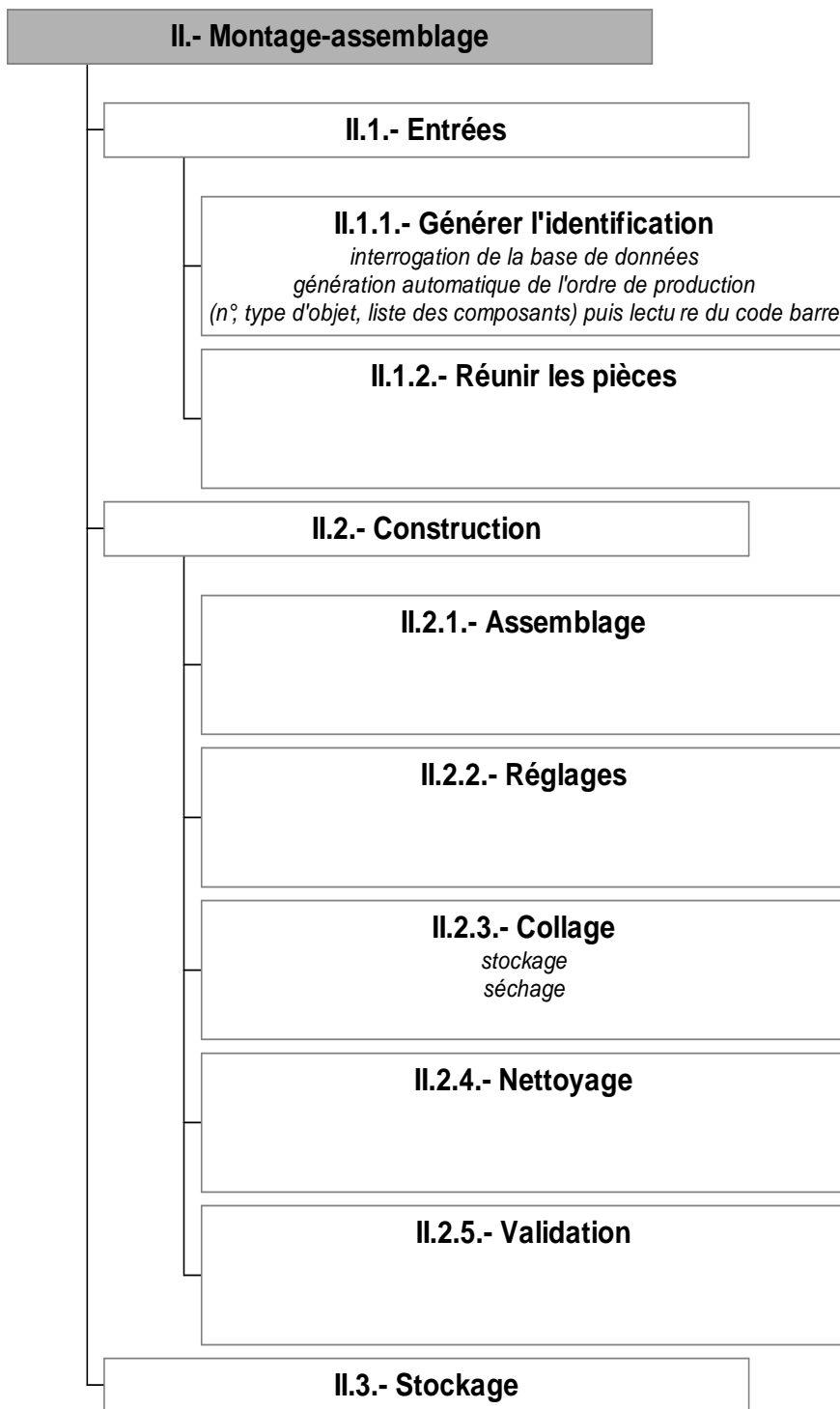


Figure 45: organigramme de niveau 2 pour le montage.

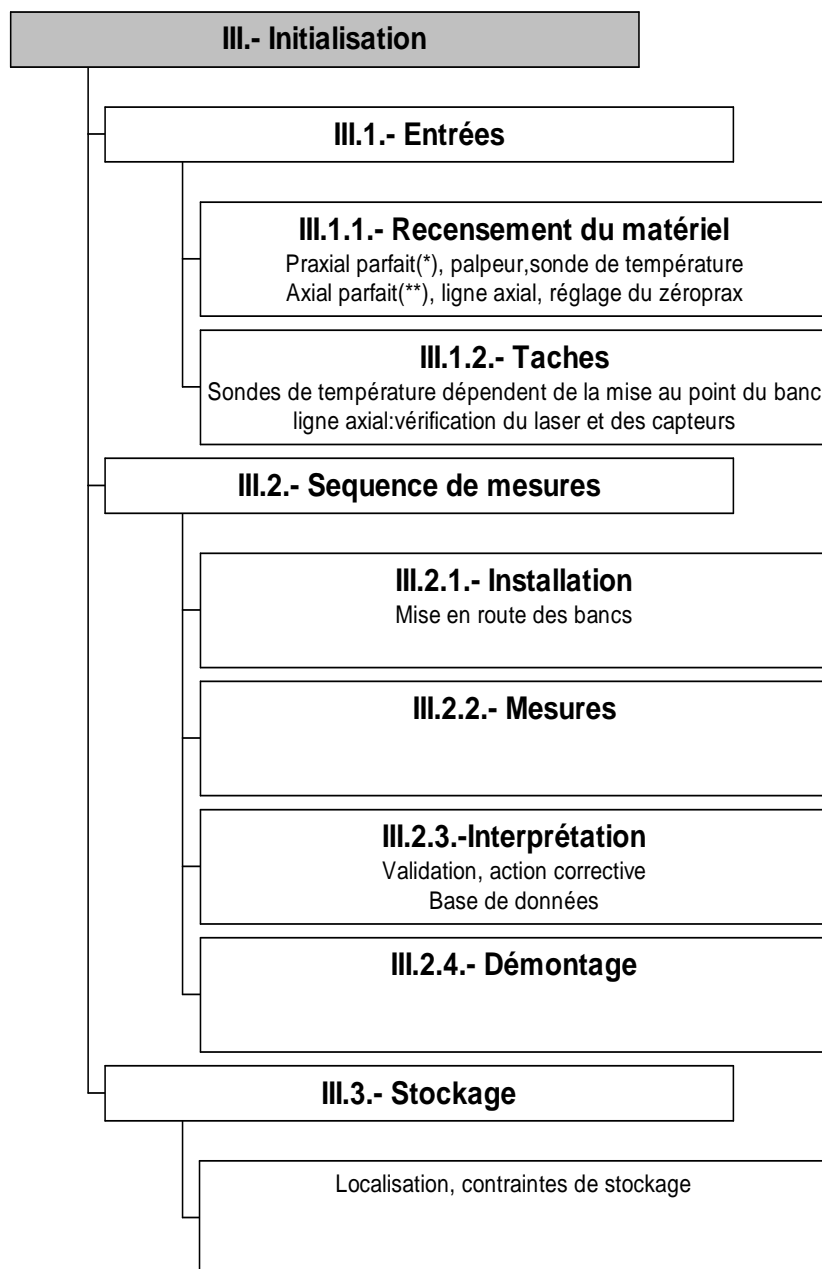


Figure 46: organigramme de niveau 2 pour l'initialisation.

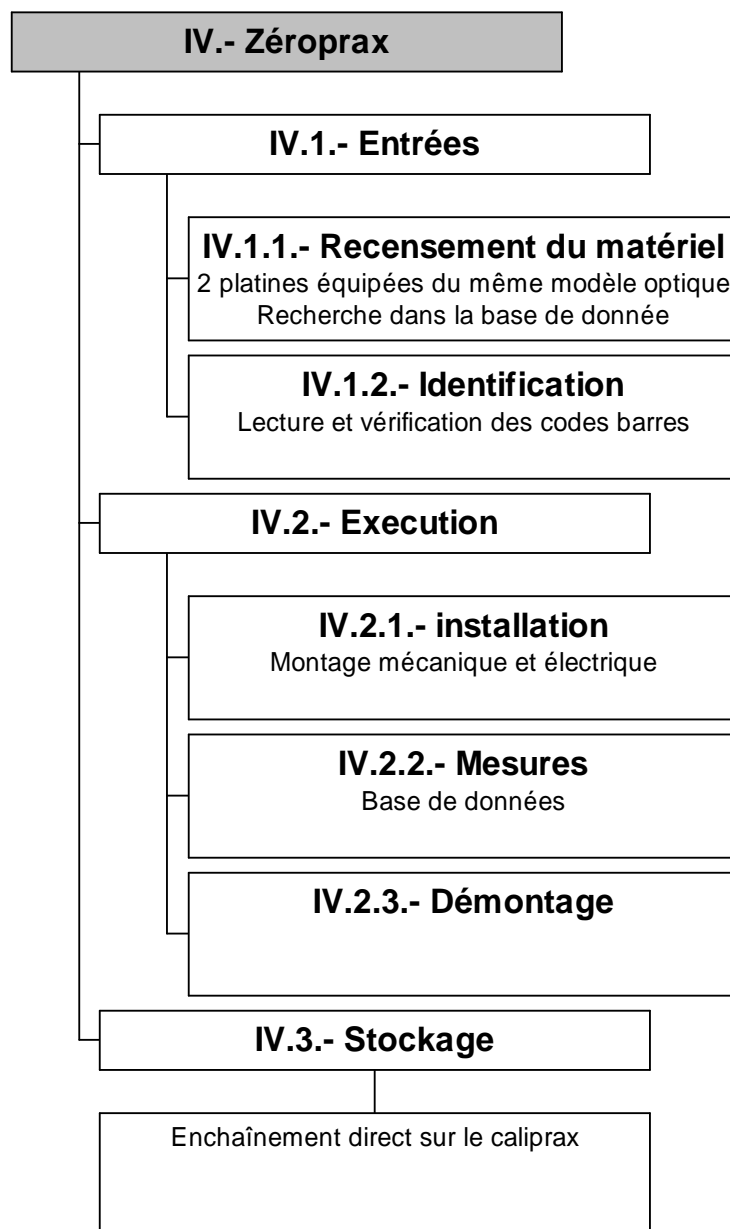


Figure 47: organigramme de niveau 2 pour le Zéroprax.

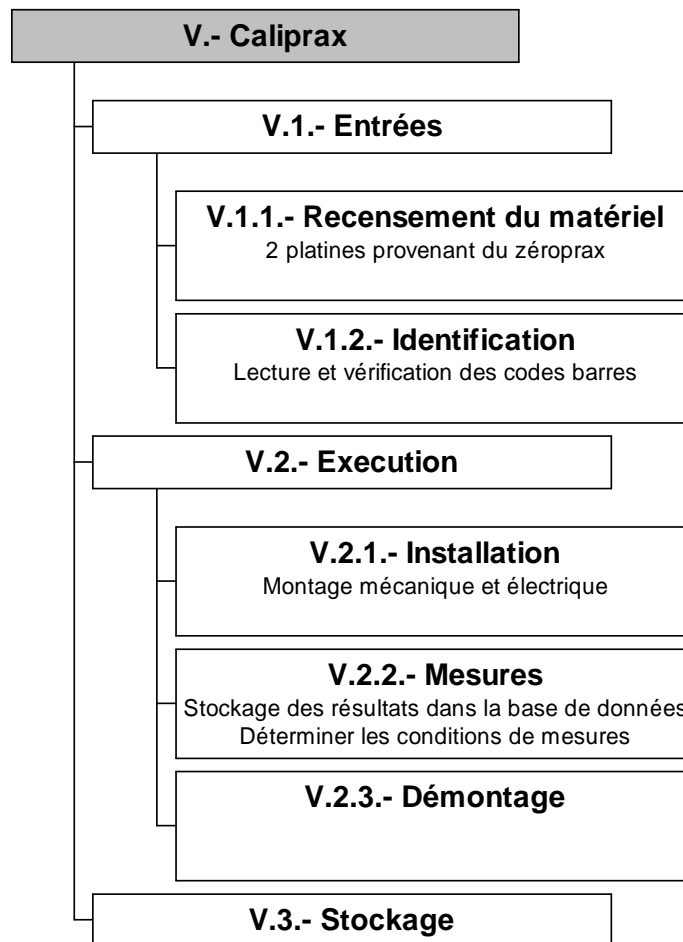


Figure 48: organigramme de niveau 2 pour le Caliprax.

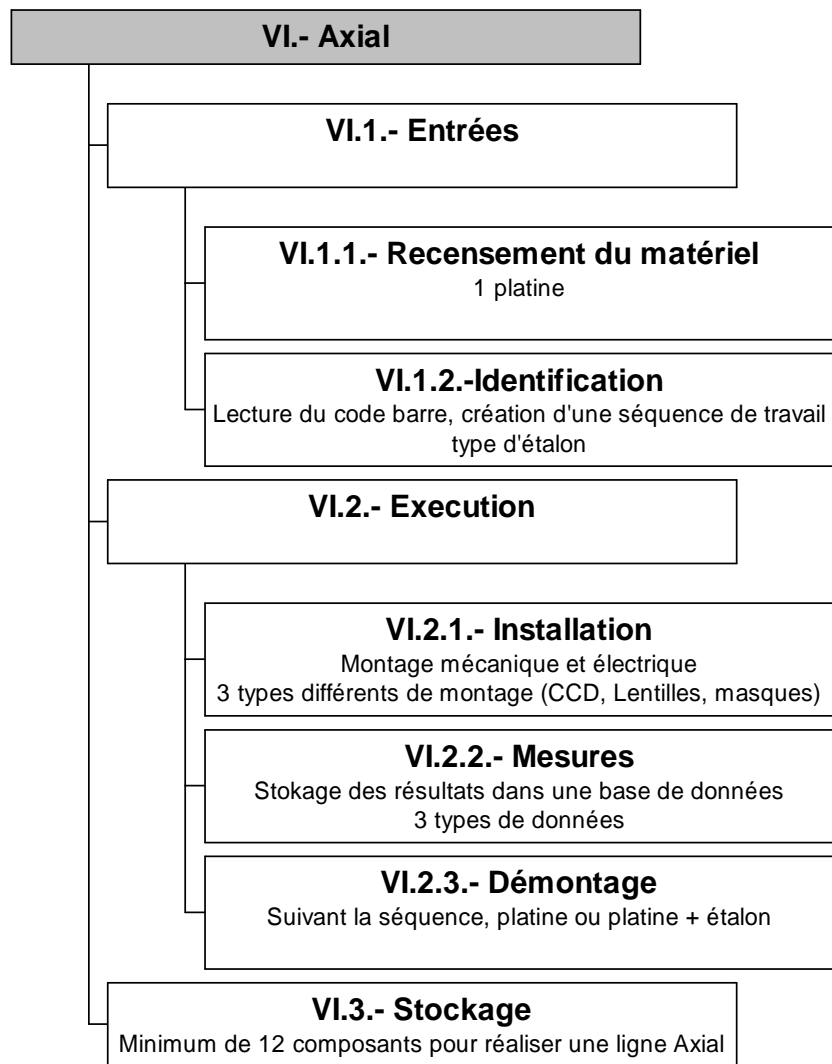


Figure 49: organigramme de niveau 2 pour l'étalonnage Axial.

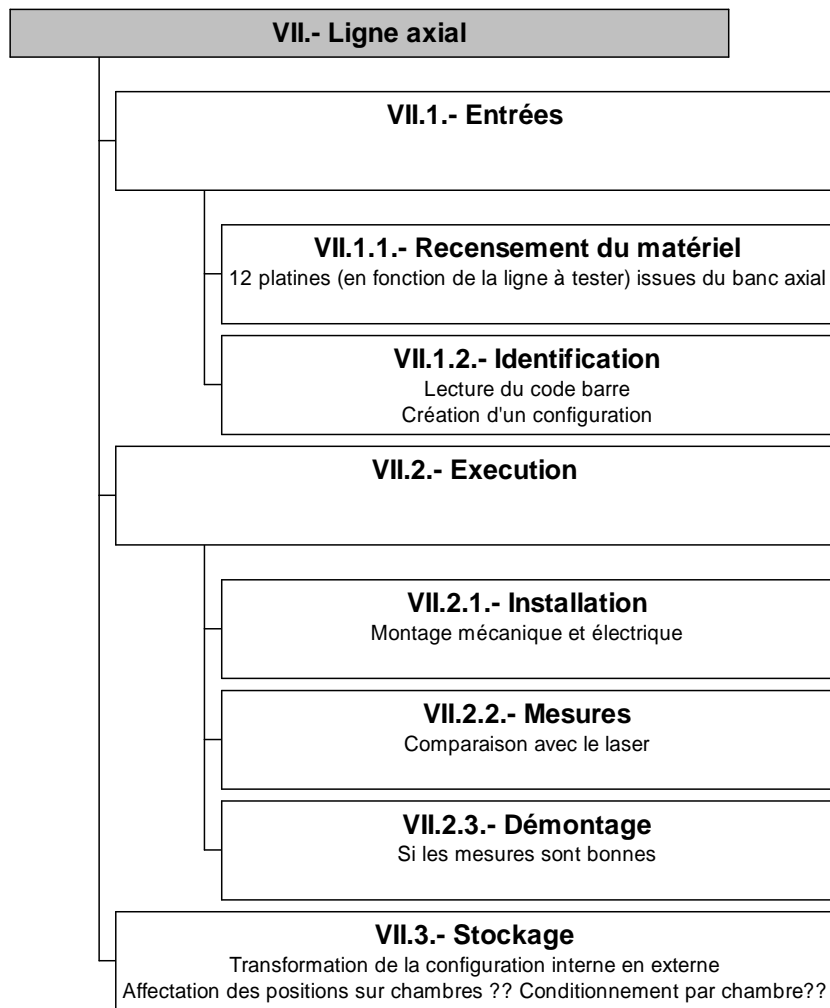


Figure 50: organigramme de niveau 2 pour le test Axial+Praxial.

Par la suite, nous détaillerons plus encore chaque organigramme de niveau 2 afin d'établir des procédures à mettre en œuvre pour l'exécution d'une tâche.

A cette heure, ces procédures n'ont pas encore été écrites. Le hall d'expérience (climatisé) est équipé de nombreuses étagères pour recevoir le matériel qui doit être stocké à température contrôlée (20 °C). Des solutions de conditionnement pour le dernier stockage et l'expédition sont déjà envisagées (voir section IV-4).

Les dernières avancées en matière de qualité concernent l'organisation des tests. Après plusieurs échanges, il nous paraît logique de tester les platines en essayant de constituer des lignes Axial/Praxial complètes. Si cette organisation impose de nombreux réglages des bancs d'étalonnage, elle est cependant la plus cohérente d'un point de vue fonctionnel.

A la réception des composants optoélectroniques (environ 3500 caméras et autant de masques), nous avons procédé à des tests de bon fonctionnement. Pour cela, nous avons prélevé un composant par boîte et l'avons testé. Au total, sur 550 composants vérifiés, aucun n'a présenté de défaut de fonctionnement.

Par ailleurs, tous les tests que nous avons menés pour finaliser l'étude du capteur Praxial font l'objet de rapports lorsqu'ils apportent des résultats importants.

XI BANC D'ETUDE.

Suite aux différents problèmes rencontrés, notamment avec les études mécaniques, la livraison des pièces du banc Caliprax a été retardée jusqu'à juillet 2001.

Pour avancer sur le développement du Caliprax, nous avons décidé de construire un banc d'étude. L'existence de ce banc étant justifiée par le délai de livraison du Caliprax, il devait être réalisé rapidement. Nous avons donc fabriqué quelques pièces mécaniques afin de recréer un banc à peu près similaire au Caliprax. Ce banc possède toutes les fonctionnalités du banc Caliprax mais à des niveaux plus ou moins dégradés.

XI-1 Description.

En dehors de la surveillance de température (nous travaillons dans un hall climatisé), le banc d'étude reprend les aspects fonctionnels du Caliprax.

- Les tables motorisées sont celles qui seront utilisées pour le banc Caliprax. Ces tables sont disponibles depuis le mois de novembre 00. Comme sur le Caliprax, elles permettent de déplacer une platine d'un capteur Praxial sur 6 degrés de liberté. Dans notre application, nous n'utilisons que 10 mm de course pour chacune des translations et 10 mrad pour les rotations. Pour cette phase d'étude, nous considérons que les mouvements des tables sont parfaits. La disponibilité de ces tables nous a permis d'écrire le programme de pilotage du contrôleur via un port RS232. Ce programme sera utilisé comme routine du programme général de contrôle et de commande du Caliprax.
- Les capteurs de déplacement qui équipent le banc d'étude sont les palpeurs LVDT numériques évoqués à la section VI-1. Pour le banc d'étude, nous n'avons mis en œuvre que deux palpeurs. En effet, le but est de tester le programme de lecture afin de l'intégrer par la suite au programme général. Le passage des palpeurs LVDT numériques aux codeurs optiques linéaires est simplifié par le fait que les deux types de capteurs utilisent le même bus RS485 (même fabricant). Nous avons profité du prêt d'un capteur à codeur optique pour implémenter les quelques commandes supplémentaires dans le programme. L'installation de deux capteurs sur le banc d'étude permet en plus de vérifier deux des six mouvements des tables (une translation et une rotation).
- La table statique est remplacée par une poutre d'aluminium supportant une plate-forme standard. Le choix d'une poutre est justifié par la nécessité d'avoir un support rigide et mécaniquement stable pour la platine statique. Cette poutre est fixée à sa base sur une plaque d'aluminium de 25 mm d'épaisseur. Sur cette plaque est également fixée la table de déplacement 6 axes. Les éléments : tables motorisées, plaque, poutre, plate-forme et platine statique sont rendus solidaires pour former un ensemble monolithique. Sur cette poutre est également fixé un barreau d'aluminium avec deux alésages pour tenir les palpeurs.
- Le support de la platine mobile est une plate-forme standard liée à une équerre d'adaptation. Cette pièce intermédiaire permet de fixer la plate-forme à la dernière unité de motorisation (plateau tournant). La plate-forme mobile est également équipée d'un profilé d'aluminium venant actionner l'extrémité des palpeurs.

- Les capteurs Praxial utilisés sur le banc d'étude sont des prototypes qui ont été fabriqués pour des tests précédents (fin 1999). De ce fait, leur conception ne correspond pas aux platines qui équiperont le détecteur ATLAS. Nous les avons dépouillé de leur anciens composants opto-electroniques pour les remplacer par les composants définitifs des platines Praxial. Pour cela, nous avons réalisé des pièces d'interface afin d'adapter les points d'ancrage des nouveaux composant aux anciennes fixations. Les lentilles ont été conservées. Le fait d'avoir des platines avec une conception mécanique différente des platines définitives ne gêne en rien la finalité du banc d'étude. Le principe de l'étalonnage étant de faire une reconstruction géométrique de la position des éléments du capteur Praxial, il est indépendant de la forme des platines.

La Figure 51 montre différentes vues du banc d'étude .

- **A** : vue d'ensemble. Le banc est vu en perspective haute, posé sur son bloc de béton. Le contrôleur des tables motorisées est sur la gauche (en gris clair). Le banc est sur la partie droite du bloc de béton.
- **B** : vue des deux platines prototypes Praxial. Le circuit électronique rouge est celui d'une caméra CCD. Nous pouvons également voir un masque partiellement caché par le support de la lentille au centre de l'image. En haut à droite, nous apercevons la plaque d'interface entre le plateau tournant et la plate-forme.
- **C** : la plate-forme statique sur la gauche, repose sur la poutre d'aluminium. Elle contient la platine statique et sert également de support pour les palpeurs. Sur la partie droite, nous pouvons voir l'extrémité de la plate-forme mobile. En dessous se trouve le profilé d'aluminium sur lequel s'appuient les palpeurs.
- **D** : la platine statique, logée dans sa plate-forme, elle-même fixée à la poutre, le support palpeurs équipé de 2 capteurs LVDT numériques.
- **E** : le prototype Praxial. La platine statique est au premier plan. La platine mobile, montée sur les tables motorisées se situe en arrière plan.
- **F** : vue d'ensemble selon une autre perspective. Les tables motorisées (à droite, en noir) supportent la platine mobile (au milieu) en regard de la platine statique (sur la gauche).



Figure 51: différentes vues du banc d'étude.

XI-2 Résultats.

Les premiers résultats que nous pouvons présenter concernant l'étalonnage des capteurs Praxial se rapportent au fonctionnement du modèle du capteur évoqué dans la section V-3.

Avec le banc d'étude, nous avons enregistré les mesures Rasnik pour des mouvements de ± 4 mm en translation et $\pm 0,3^\circ$ en rotation autour d'un point choisi comme origine. Dans un premier temps, nous avons acquis les données des systèmes Rasnik pour des mouvements « purs » puis, par la suite, nous avons combiné les mouvements deux par deux. Les résultats des mesures lors des mouvements purs nous ont permis de tester et corriger la partie de programme qui concerne la simulation des mesures Rasnik. Ce travail a été effectué à la fin de mon mémoire, en collaboration avec Valérie Gautard. Après plusieurs jours de « traque », nous avons trouvé et corrigé les « bugs » pour aboutir à un modèle dont le fonctionnement collait à la réalité du prototype Praxial.

Le tableau 3 compare les résultats calculés avec le modèle et les mesures réelles enregistrées par le Praxial. Afin de pouvoir comparer ces résultats entre eux, nous avons exprimé les variations des mesures réelles en X, Y et Θ plutôt que les valeurs absolues de ces mesures. En effet, sur le capteur, il n'y a aucune raison pour que l'origine du masque coïncide avec l'alignement (centre de la caméra, centre de la lentille), ni que l'angle entre la caméra et le masque soit nul. Nous pouvons constater que les valeurs calculées et réelles sont assez proches. Nous pouvons expliquer les différences par le fait que la géométrie entrée pour le modèle est mesurée avec une incertitude de quelques millimètres pour chaque coordonnées. Ceci explique également le fait que la valeur du grandissement à l'origine soit différente.

Position (X, Y, Z:mm, Θ_x , Θ_y , Θ_z :mrad)						Valeurs calculées				Mesures (avec chgt d'origine)			
X	Y	Z	Θ_x	Θ_y	Θ_z	X (mm)	Y (mm)	G	Θ (mrad)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	G	$\Delta \Theta$ (mrad)
0	0	0	0	0	0	0,000	0,000	0,6620	0,00	0,000	0,000	0,6915	0,00
4	0	0	0	0	0	3,643	0,000	0,6533	0,00	3,606	0,028	0,6827	0,09
-4	0	0	0	0	0	-3,643	0,000	0,6709	0,00	-3,590	-0,057	0,7008	0,13
0	4	0	0	0	0	0,000	4,000	0,6620	0,00	-0,080	3,987	0,6916	0,08
0	-4	0	0	0	0	0,000	-4,000	0,6620	0,00	0,098	-4,017	0,6915	0,11
0	0	4	0	0	0	1,652	0,000	0,6819	0,00	1,750	0,097	0,7114	0,05
0	0	-4	0	0	0	-1,652	0,000	0,6432	0,00	-1,725	-0,118	0,6734	0,13
0	0	0	5,24	0	0	-0,087	0,463	0,6610	-2,17	0,101	-0,717	0,6920	2,12
0	0	0	-5,24	0	0	0,086	-0,462	0,6630	2,17	-0,078	0,732	0,6909	-2,19
0	0	0	0	5,24	0	-0,506	0,000	0,6619	0,00	-0,737	-0,027	0,6922	-0,02
0	0	0	0	-5,24	0	0,506	0,000	0,6620	0,00	0,761	0,001	0,6909	0,14
0	0	0	0	0	5,24	0,191	0,206	0,6615	4,77	0,127	0,198	0,6913	4,62
0	0	0	0	0	-5,24	-0,190	-0,206	0,6624	-4,77	-0,117	-0,199	0,6918	-4,66

Tableau 3 : comparaison des valeurs Rasnik obtenues avec le modèle et avec le capteur réel.

CONCLUSION

Le premier point de cette conclusion concerne l'entreprise. Je suis totalement satisfait de travailler et d'avoir passé cette année de mémoire dans un centre de recherche tel que le CEA. Mon expérience en industrie n'étant pas significative, je ne ferai pas de comparaison entre le domaine de la recherche et le milieu industriel. Evoluer au sein d'un centre de recherche comptant 6000 agents donne la possibilité de rencontrer des personnes aux compétences très différentes. Un salarié du CEA, ou tout autre personne ayant la possibilité d'y travailler a tout intérêt à discuter et échanger des informations avec d'autres personnes de profils différents, qu'il s'agisse du secteur d'activité, ou du niveau de qualification. Cette remarque est vraie d'une manière générale, mais le contexte d'un centre de recherche en autorise l'application.

Ce premier point, placé dans le cadre du CEA, s'applique au Service d'Instrumentation Générale. Ce service (et d'autres également), regroupe les compétences de techniciens, qui par leur expérience, sont devenus difficilement remplaçables, d'ingénieurs généralistes qui ont une vue très large sur les projets, d'ingénieurs spécialisés, éléments quasiment incontournables au sein d'une structure comme le DAPNIA (700 personnes) et de quelques docteurs. La disponibilité de ces personnes pour une aide ou un conseil est formidable. Je prends un réel plaisir à évoluer dans ce service et m'astreins à le rendre au mieux.

La seconde partie de la conclusion se rapporte au projet. En premier lieu, les remarques citées dans la première partie de la conclusion sont encore valables pour l'équipe projet. Menée par un ingénieur généraliste (Olivier Cloué), cette équipe compte deux ingénieurs d'études mécaniques (Patrick Ponsot, Patrick Perrin), deux dessinateurs (Patrick Graffin, Patrick Girardot), un géomètre chargé de la qualité (Michel Fontaine), trois physiciens (Claude Guyot, Jean-Pierre Schuller, Philippe Schune), une mathématicienne-informaticienne (Valérie Gautard), un technicien polyvalent (Patrick Magnier) un technicien en mesures physiques (Yann Reinert) et moi-même. Pour douze personnes constituant l'équipe projet, huit profils différents sont présents.

En second lieu, nous aborderons la taille du projet. Bien qu'il concerne une application locale, ce mémoire s'est inscrit dans le cadre d'un projet de dimension internationale. Evidemment, une telle échelle offre des avantages sur les possibilités d'échanges avec des collaborateurs étrangers, mais elle apporte aussi des contraintes que nous ne pouvons maîtriser.

Parmi les points positifs, nous pouvons citer le réglage des outils de positionnement. Ce réglage, à la charge du groupe de Saclay, intéresse les laboratoires qui fabriquent les chambres. La formation à l'utilisation de la machine de mesure tridimensionnelle et le temps que nous y avons consacré a porté ses fruits puisqu'après être passés entre nos mains, les outils de positionnement se sont avérés correctement réglés.

Un autre point, non traité dans ce document, est une présentation orale en anglais faite au CERN devant la hiérarchie du projet et des représentants de différents instituts, lors de la « Preliminary Design Review », en mars 2001. C'était ma première présentation dans un contexte international et je pense l'avoir bien réussie.

Les tests menés sur les capteurs de déplacement ont suscité l'intérêt de nos collaborateurs. Pour le système Rasnik, l'utilisation avec des lentilles de très courtes focales est une application que l'institut NIKHEF n'a pas l'habitude de mettre en œuvre et les problèmes rencontrés ont attiré l'attention de nos collègues hollandais. Les étalonnages des palpeurs LVDT numériques, et les tests avec le codeur optique linéaire ont fortement intéressé la société qui fabrique ces produits puisqu'il n'avaient pas d'expérience sur le vieillissement de

ces capteurs. Ces tests montrent également que notre méthode d'étalonnage avec un système Rasnik obtient des résultats fiables.

Comme nous l'avons écrit au dessus, cette dimension de projet a aussi un inconvénient pour le déroulement d'un mémoire d'ingénieur. En effet, travailler en collaboration avec plusieurs services, plusieurs instituts ayant chacun des méthodes et des cultures relatives au travail différentes impose des contraintes avec lesquelles nous devons composer. Rapporté au banc Caliprax, nous pouvons citer les priorités fixées sur les études mécaniques. A l'origine du mémoire, ces études devaient aboutir au début de l'année 2001. En réalité, la livraison des pièces mécaniques du banc est arrivée au cours de l'été 2001.

J'ai ressenti un sentiment de frustration vis-à-vis de ces événements. En effet, avec un projet géré à l'échelle d'un laboratoire, un chargé d'affaires a beaucoup plus de prise sur les aléas que j'ai pu en avoir. J'ai eu l'impression d'être impuissant face à ces retards qui avaient une forte incidence sur l'avancement du banc Caliprax.

Dans ce genre de situation, la force d'un ingénieur est de savoir réagir pour faire progresser son projet. La réalisation du banc d'étude, maquette « dégradée » du Caliprax, est allé dans ce sens. Cette réalisation a permis de tester les diverses parties actives du banc Caliprax. Ainsi, à la réception des pièces, la phase d'intégration et de développement sera facilitée.

Si le déroulement de ce mémoire est assez éloigné de l'idéal que nous nous étions fixé pour objectif, nous avons su faire progresser plusieurs sous-systèmes plus ou moins indépendants pour les faire converger vers le bon fonctionnement du banc.

Ce mémoire nous montre la diversité des tâches que doit mener un chargé d'affaires et combien il est nécessaire de savoir composer avec les éléments imprévus ou incontrôlables. J'ai également eu l'occasion d'encadrer d'autres personnes, mais cet aspect n'est pas une nouveauté. J'apprécie beaucoup de travailler avec des personnes de qualifications différentes de la mienne pour leur faire profiter de mes acquis et inversement. Je pense avoir acquis la maturité pour être un ingénieur bien que j'ai encore beaucoup à apprendre. Entre autres, je souhaite fortement me former à l'utilisation d'un logiciel de simulation mathématique du type Mathematica ou Matlab. J'ai la conviction que la maîtrise de l'un de ces outils constitue un atout de taille pour un poste d'ingénieur.

A cette heure, le banc Caliprax n'est pas construit puisque les pièces mécaniques le constituant ne sont livrées que depuis quelques jours. Les routines concernant la gestion des tables motorisées, la lecture des capteurs de déplacement, la lecture des sondes de température et la lecture des données Rasnik sont opérationnelles. La partie de programme réalisant l'étalonnage (modélisation, mesures, minimisation) est en cours d'optimisation. Le modèle mathématique est correct mais la minimisation du χ^2 n'a pas encore été testée et validée. Les platines Praxial sont en cours d'étude. Les derniers tests ont permis d'en figer le design, mais il reste quelques détails à régler.

Dans les mois à venir, nous fabriqueront une pré-série de platines Praxial que nous étalonnerons avec le banc définitif. Ces tests nous permettront d'optimiser les paramètres de l'étalonnage pour atteindre les incertitudes de mesure requises. Nous devons rédiger plus précisément les procédures à suivre pour chaque poste de travail (réception, montage, étalonnages, stockage/expédition). A l'issue de cette phase de développement, le processus de production en série pourra débuter.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] : Passerelles, le journal interne du CEA Saclay, n° 13, mars 2001.
- [2] : G. COHEN-TANNOUDJI. *Les enjeux du LHC, le modèle standard*. Scintillations, journal du DAPNIA n°23, mai 1995.
- [3] : G. COHEN-TANNOUDJI. *Les enjeux du LHC, au-delà du modèle standard*. Scintillations, journal du DAPNIA n°24, juin 1995.
- [4] : <http://lhc.web.cern.ch/lhc>
- [5] : Groupe culture scientifique et communication. *ATLAS une expérience aux frontières des découvertes*. Bulletin interne du CERN, avril 1998.
- [6] : http://public.web.cern.ch/Public/Welcomme_fr.html.
- [7] : H. Van Der GRAAF et al. *RasNiK, an Alignment System for the ATLAS MDT Barrel Muon Chambers. Technical System Description*. Publication de l'institut NIKHEF d'Amsterdam, référence ET38110, Avril 2000. www.nikhef.nl
- [8] : F. BAGLINA. *Etude et réalisation d'un banc de calibration de capteurs de position pour l'expérience ATLAS*. Projet industriel du CEFIPA, promotion 1997-2000.
- [9] : D. DRAKOULAKOS et al. *The high precision X-ray tomograph for quality control of the ATLAS MDT muon spectrometer*. CERN-OPEN-97-023, 30 July 1997, presented at the 7th Asia Pacific Physics Conference, Beijing, 19-23 August 1997.
- [10] : J.-Ch. BARRIERE et al. *A mask to measure the Praxial alignment platform position with respect to the ATLAS muon chamber wires using the CERN X-ray tomograph*. ATLAS muon internal note 2001-08.
- [11] : Y. REINERT. *Test de repositionnement*. Note interne projet ATLAS MUONS au CEA-DSM-DAPNIA référence 7—3152—0000 008-01, 16 février 2001.
- [12] : J.C. BARRIERE et Y. REINERT. *Compte-rendu des mesures Rasnik*. Notes internes projet ATLAS MUONS au CEA-DSM-DAPNIA références 7—3152—0000 003-01 et 7—3152—0000 007-01, 22 janvier et 15 février 2001.

LISTE DES FIGURES.

Figure 1: Les particules élémentaires du Modèle Standard.....	13
Figure 2: Représentation artistique d'une réaction électron-positron.	16
Figure 3: schéma de la chaîne d'injection des protons et des ions du LHC.....	17
Figure 4: Matérialisation des accélérateurs du CERN. Le cercle de plus grand diamètre représente le LHC (Large Hadron Collider), le plus petit matérialise le SPS (Super Proton Synchrotron).....	17
Figure 5: Schéma du LHC avec ses deux principaux détecteurs.....	19
Figure 6: vue en écorché du détecteur ATLAS.	21
Figure 7: un écorché d'ATLAS laissant apparaître une partie de l'infrastructure. La représentation d'un homme indique la taille de l'instrument.	21
Figure 8: schéma d'une chambre à muons.....	22
Figure 9: représentation des alignements projectifs (en rouge) et Axial/Praxial (en bleu)	24
Figure 10: Les trois éléments optiques d'un Rasnik de gauche à droite : le masque vu par la caméra (pas d'un carré 170 μm), la lentille, le capteur d'image (matrice CCD 3x4 mm ²). 25	25
Figure 11: Schéma écorché des chambres avec les capteurs Axial et Praxial.....	28
Figure 12: un capteur Praxial, constitué de deux platines symétriques. Les éléments supérieurs appartiennent à l'Axial.....	29
Figure 13: collage d'une plate-forme sur les tubes	32
Figure 14: les 4 équerres disposées sur les tubes d'une chambre à muons.	33
Figure 15: dessin d'une équerre avec les cotes à respecter lors des réglages.....	34
Figure 16 : réglage d'une équerre sur la machine tridimensionnelle du LAL d'Orsay.	37
Figure 17: Outil fabriqué pour le contrôle de la position des plates-formes sur les chambres. 39	39
Figure 18: mise en place de l'outil dans la plate-forme.	40
Figure 19 : au premier plan, la plate-forme standard en aluminium et derrière le prototype avec inserts en acier.	41
Figure 20: la platine utilisée pour les test de repositionnement. Les pions définissent les appuis plan-trait-point. L'alésage au centre permet de fixer la platine sur la plate-forme avec une seule vis.....	42
Figure 21: dispositif expérimental pour les mesures de répétabilité.....	43
Figure 22: le masque Rasnik fixé sur une platine, elle-même posée sur une plate-forme.	43
Figure 23: empreintes laissées sur la plate-forme par les billes de l'appui plan.....	44
Figure 24: trois types de plate-forme pour les tests d'enfoncement: standard (à gauche), anodisée (au milieu) et nickelée (à droite).	47
Figure 25: conditionnements du capteur Praxial proposés par les sociétés A (à gauche) et B (à droite).....	50
Figure 26: représentation graphique du modèle Praxial. Le masque et la caméra sont repérés par leur centre et sont pourvus d'un repère local. La lentille est assimilée à un point.....	54
Figure 27: Modèle complet du capteur Praxial avec 2 systèmes Rasnik composés de 2 caméras (C_1 et C_2), de 2 lentilles (L_1 et L_2) et de 2 masques (M_1 et M_2)......	56
Figure 28 : schéma fonctionnel d'un capteur LVDT.....	61
Figure 29: schéma du premier mode opératoire de l'étalonnage	62
Figure 30: second dispositif expérimental utilisé pour l'étalonnage des palpeurs.....	63
Figure 31: courbes d'erreur obtenues avec le second montage.....	64
Figure 32: montage mécanique utilisé pour l'étalonnage des palpeurs	65
Figure 33: courbes d'erreur d'un palpeur LVDT mesurées sur une période de 3 mois.....	66
Figure 34 : montage pour mesurer l'influence d'une rotation du masque.....	68
Figure 35: schéma du montage pour les mesures le long de l'axe Z.	69

Figure 36: tracés des mesures Rasnik pour un déplacement du masque le long de l'axe optique ; première série.....	70
Figure 37: schéma du montage avec système de référence (vue de dessus).....	73
Figure 38: mesures du système Rasnik de référence.....	74
Figure 39: le banc Caliprax dans sa version finale.....	76
Figure 40: vue 3D de l'implantation des palpeurs.	78
Figure 41: les platines Praxial après étude au SGPI.....	79
Figure 42: organigramme général de l'étalonnage d'un capteur Axial/Praxial.	82
Figure 43: modèle d'analyse d'une tâche.	83
Figure 44: organigramme de niveau 2 pour les approvisionnements.....	84
Figure 45: organigramme de niveau 2 pour le montage.....	85
Figure 46: organigramme de niveau 2 pour l'initialisation.....	86
Figure 47: organigramme de niveau 2 pour le Zéroprax.....	87
Figure 48: organigramme de niveau 2 pour le Caliprax.....	88
Figure 49: organigramme de niveau 2 pour l'étalonnage Axial.....	89
Figure 50: organigramme de niveau 2 pour le test Axial+Praxial.....	90
Figure 51: différentes vues du banc d'étude.	93

RESUME

Sonder la matière pour en connaître les constituants élémentaires, la description des forces fondamentales et leur interaction, tel est le but de la physique des particules. Les expériences dans ce domaine consistent à provoquer des collisions entre des particules à des énergies très élevées puis à observer les particules créées par ces interactions. Ces observations reposent sur d'énormes détecteurs de particules dont l'utilisation est conditionnée par la connaissance précise de leur géométrie (par exemple : position des chambres de détection). Pour cela, ces détecteurs sont équipés de capteurs d'alignements qu'il faut au préalable étalonner.

Ce mémoire porte sur l'étude et la réalisation d'un banc d'étalonnage pour des capteurs d'alignement du type « Praxial » (PRoximity AXIAL), et d'autres travaux s'y rapportant. Ce banc est nommé CALIPRAX (CALibration of PRAXial).

Dans un premier temps, nous déterminons puis appliquons une méthode pour régler les outils de positionnement des supports de capteur sur les chambres. Ces réglages s'appuient sur l'utilisation d'une machine de mesures tridimensionnelles.

Ensuite, nous étudions les supports eux-mêmes. Ces études portent sur des aspects mécaniques : qualité du positionnement des capteurs dans leur supports, déformations des supports engendrées par le serrage. Cette fois encore, ces études se rapportent à de la métrologie dimensionnelle.

Après cela, les travaux s'orientent sur le banc, avec la détermination des capteurs de déplacements parmi deux technologies : optique avec le système Rasnik (infraRed Alignment System from NIKhef), et mécanique avec des capteurs de type LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Ayant découvert une ambiguïté sur le système Rasnik, nous poursuivons l'étude de manière à en comprendre le comportement.

Nous présentons également le principe et les calculs pour l'étalonnage des capteurs Praxial qui s'appuie sur un calcul de minimisation. Les programmes informatiques de contrôle du banc sont alors abordés, ainsi que la mise en place des procédures d'assurance de la qualité. Une autre partie traite des études mécaniques et des problèmes qu'elles ont engendrés.

A la suite de retards imposés par le déroulement du projet, nous réalisons une maquette du banc définitif permettant de faire progresser l'ensemble des activités. Cette maquette permet de tester individuellement les fonctions que le banc final devra posséder. Avec celle-ci, nous acquérons des données pour faire un premier essai du programme de minimisation.

MOTS-CLES

Capteur d'alignement - Banc d'étalonnage - Calcul de minimisation - Mesures - Métrologie dimensionnelle - Physique des particules - Système Rasnik -