



**HAL**  
open science

# Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC : des réseaux de géodésie au pré-alignement actif

Thomas Touze

## ► To cite this version:

Thomas Touze. Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC : des réseaux de géodésie au pré-alignement actif. Autre. Université Paris-Est, 2011. Français. NNT : 2011PEST1053 . tel-00778092

**HAL Id: tel-00778092**

**<https://theses.hal.science/tel-00778092>**

Submitted on 18 Jan 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DE PARIS-EST

~

ÉCOLE DOCTORALE DES MATHÉMATIQUES ET DES SCIENCES ET  
TECHNIQUES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

Thèse en vue de l'obtention du grade de docteur de l'université de  
Paris-Est en sciences de l'information géographique

Présentée par  
Thomas TOUZÉ  
CERN BE-ABP

---

PROPOSITION D'UNE MÉTHODE  
D'ALIGNEMENT DE L'ACCÉLÉRATEUR  
LINÉAIRE CLIC

~

Des réseaux de géodésie au pré-alignement actif

---

Thèse dirigée par le professeur Michel KASSER,  
Soutenue à l'ENSG, à Marne-La-Vallée, le 11 janvier 2011

Devant le jury constitué de :

Pr Pierre GRUSSENMEYER	INSA	Président du jury
Pr Michel KASSER	ENSG	Directeur de thèse
Pr Bertrand MERMINOD	EPFL	Rapporteur de thèse
Pr Alain GEIGER	ETHZ	Rapporteur de thèse
Pr Laurent POLIDORI	ESGT	Examinateur
Dr Stéphane DURAND	ESGT	Examinateur
Dr Hélène MAINAUD-DURAND	CERN	Examinatrice



*Tout ce que je sais, c'est que je ne sais rien, tandis que les autres croient savoir ce qu'ils ne savent pas.*

*Socrate  
V<sup>e</sup> siècle av. J-C*



« La mort de Socrate (1787) »  
Jacques-Louis David (1748-1825)  
Metropolitan Museum of Art  
New-York





## 1 Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance aux deux personnes qui ont dirigé et encadré mon travail de doctorat. M. Michel Kasser, mon directeur de thèse, a toujours été disponible pour me dispenser des conseils avisés. Mme Hélène Mainaud-Durand, qui me supervise depuis 2005, m'a toujours accordé sa confiance ainsi qu'une liberté totale d'action et d'investigation.

Je tiens également à remercier les membres de mon jury, particulièrement mes rapporteurs de thèse MM. Bertrand Merminod et Alain Geiger, pour l'intérêt qu'ils accordent à mes travaux de recherche, ainsi que M. Stéphane Durand qui m'a apporté son aide à maintes reprises, ne serait-ce qu'au travers de l'enseignement que j'ai reçu de lui.

En cinq années passées au CERN à travailler sur le projet CLIC, j'ai eu l'occasion de côtoyer de nombreuses personnes. Parmi elles, certaines ont contribué à faire de moi un scientifique. À MM. Friedrich Lackner et Sébastien Guillaume, je ne sais comment exprimer ma gratitude. Dans ce contexte, je remercie également mes collègues proches et amis MM. Julien Boerez et Sylvain Griffet pour les nombreuses discussions qui nous ont fait progresser mutuellement.

J'adresse également ma reconnaissance à l'ensemble du personnel, présent et passé, de la section « BE-ABP-SU » des géomètres du CERN. J'y remercie particulièrement les chefs de projets MM. Jean-Pierre Quesnel, Mark Jones et Christian Lasseur, ainsi que M. Andreas Herty. De plus, les travaux que j'y ai menés pendant cinq ans n'auraient pu aller aussi loin sans la présence des ateliers de mécanique et d'électronique et sans la compétence de leurs membres respectifs MM. Michel Rousseau, Antonio Marin, Sylvain Mico et Alexandre Beynel.

Je ne peux me rappeler toutes les personnes des autres services du CERN qui m'ont aidé pendant ces cinq années. Toutefois, je ne peux pas oublier M. Daniel Schulte, le responsable des études de la dynamique des faisceaux du CLIC, dont les exigences ont mû mon désir de progresser. Je regrette de ne pas avoir été en mesure de lui fournir un modèle rigoureux de simulations du pré-alignement du CLIC. Je remercie M. Bernard Jeanneret pour son aide en physique et M. Ahmed Cherif, de la métrologie, qui au cours du temps, est devenu un des partenaires privilégiés et indispensables de mes travaux.

Enfin j'adresse mes dernières pensées à ceux qui ont le plus contribué à ce que je suis en voie de devenir. Merci à ma famille pour la confiance et le soutien qu'elle m'a apporté depuis toujours. À ma mère, Mary-Anne Stéphan, à mes frères Merwen et Éric Touzé, à mon père, Pierre-Yves Touzé, merci.



# PROPOSITION D'UNE MÉTHODE D'ALIGNEMENT DE L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE CLIC

~

## Des réseaux de géodésie au pré-alignement actif

### 2 Mots-clefs

Géodésie, topométrie de précision, alignement, CERN, CLIC, accélérateur de particules, systèmes de coordonnées, similitude, simulations de Monte-Carlo.

### 3 Résumé

Le compact linear collider (CLIC) est le projet de collisionneur de particules proposé par l'organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) visant à succéder au large hadron collider (LHC). Du fait des dimensions nanométriques des faisceaux de leptons de ce projet, les accroissements admissibles de l'émittance sont extrêmement faibles. Cela a pour conséquence des tolérances d'alignement des composants du CLIC jamais atteintes.

La dernière étape de l'alignement sera effectuée par rapport au faisceau de particules du CLIC. Elle est du ressort des physiciens du faisceau. Toutefois son implémentation nécessite un pré-alignement qui lui-même représente un défi métrologique et géodésique : atteindre  $10\ \mu\text{m}$  à  $3\sigma$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m. Un tel niveau de précision requiert le développement d'une méthode compatible avec des systèmes de repositionnement qui seront constamment sollicités. Le pré-alignement du CLIC devra être actif.

Cette thèse ne démontre pas la faisabilité du pré-alignement actif du CLIC mais montre le chemin des derniers développements à effectuer dans ce but. Il y est proposé une méthode, fondée sur la gestion des similitudes entre systèmes euclidiens de coordonnées, qui, de la géodésie aux mesures métrologiques, est susceptible d'apporter la solution. Des expériences sur de longues distances ont été construites dans le but d'éprouver, en parallèle de simulations de Monte-Carlo, les modèles mathématiques des systèmes de mesure et des références d'alignement ainsi créés. L'extrapolation de ces modèles, une fois validés expérimentalement, sur toute la longueur du CLIC, sera la dernière étape prouvant la faisabilité du pré-alignement.





# PROPOSAL OF AN ALIGNMENT METHOD FOR THE CLIC LINEAR ACCELERATOR

~

## From geodetic networks to the active pre-alignment

### 4 Key words

Geodesy, precision survey engineering, alignment, CERN, CLIC, particles accelerator, coordinate systems, Helmert transformation, Monte-Carlo simulations.

### 5 Abstract

The compact linear collider (CLIC) is the particles accelerator project proposed by the european organization for nuclear research (CERN) for high energy physics after the large hadron collider (LHC). Because of the nanometric scale of the CLIC leptons beams, the emittance growth budget is very tight. It induces alignment tolerances on the positions of the CLIC components that have never been achieved.

The last step of the CLIC alignment will be done according to the beam itself. It falls within the competence of the physicists. However, in order to implement the beam-based feedback, a challenging pre-alignment is required :  $10 \mu\text{m}$  at  $3\sigma$  along a 200 m sliding window. For such a precision, the proposed solution must be compatible with a feedback between the measurement and repositioning systems. The CLIC pre-alignment will have to be active.

This thesis does not demonstrate the feasibility of the CLIC active pre-alignment but shows the way to the last developments that have to be done for that purpose. A method is proposed. Based on the management of the Helmert transformations between Euclidian coordinate systems, from the geodetic networks to the metrological measurements, this method is likely to solve the CLIC pre-alignment problem. Large scale facilities have been built and Monte-Carlo simulations have been made in order to validate the mathematical modelings of the measurement systems and of the alignment references. When this is done, it will be possible to extrapolate the modelings to the entire CLIC length. It will be the last step towards the demonstration of the CLIC pre-alignment feasibility.



---

---

# Table des matières

---

1	Remerciements . . . . .	v
2	Mots-clefs . . . . .	vii
3	Résumé . . . . .	vii
4	Key words . . . . .	ix
5	Abstract . . . . .	ix
<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1	Réflexions sur l'action d'aligner . . . . .	1
1.2	Définition du sujet . . . . .	2
1.3	Problématique de la thèse . . . . .	3
1.4	Plan adopté . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Pré-alignement du CLIC</b>	<b>7</b>
2.1	Introduction . . . . .	8
2.2	L'enjeu de l'alignement du CLIC . . . . .	9
2.3	Décomposition du pré-alignement . . . . .	23
2.4	La chaîne métrologique du MRN . . . . .	41
2.5	Conclusion . . . . .	54
<b>3</b>	<b>Gestion des systèmes de coordonnées</b>	<b>57</b>
3.1	Introduction . . . . .	58
3.2	Définition des outils mathématiques . . . . .	59
3.3	Métrologie et calibrations . . . . .	68
3.4	Compensation des réseaux . . . . .	92
3.5	Conclusion . . . . .	115
<b>4</b>	<b>Expériences et simulations</b>	<b>117</b>
4.1	Introduction . . . . .	118
4.2	Tests expérimentaux du MRN . . . . .	119
4.3	Simulations du pré-alignement du CLIC . . . . .	142
4.4	Futurs axes de recherche . . . . .	154
4.5	Conclusion . . . . .	164



## TABLE DES MATIÈRES

---

<b>5 Conclusion générale</b>	<b>167</b>
5.1 Réponse à la problématique . . . . .	167
5.2 Résultats obtenus . . . . .	168
5.3 Apport de la thèse . . . . .	169
<b>6 Glossaire</b>	<b>171</b>
<b>A Fonctions spéciales</b>	<b>175</b>
A.a Distribution et adéquation . . . . .	175
A.b Matrice de rotation . . . . .	178
A.c Angles d'une matrice de rotation . . . . .	179
<b>B Simulations du TT1</b>	<b>183</b>
B.a Hyperliens . . . . .	183
<b>Bibliographie</b>	<b>185</b>

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## 1.1 Réflexions sur l'action d'aligner

L'alignement est l'action qui consiste à positionner des objets de manière à ce qu'ils forment une ligne droite. Cette définition peut être décomposée en trois étapes distinctes. La première d'entre elles est la phase d'observation dans laquelle il s'agit de mesurer les positions relatives des objets devant être alignés. La seconde étape correspond au traitement des observations. Dès que les positions des objets à aligner sont connues les unes par rapport aux autres, les déplacements à effectuer pour former une ligne droite peuvent être déterminés. La dernière étape correspond alors au positionnement. En appliquant les déplacements calculés aux objets, la ligne droite souhaitée est obtenue.

Si les situations faisant appel à l'alignement peuvent être variées, l'enchaînement des phases d'observation, de traitement puis de positionnement, est une constante, même si chacune d'entre elles peut être réalisée de différentes façons. Ce qui change fondamentalement selon les situations, c'est le degré de conscience atteint dans l'application des trois phases de l'alignement. La méthode la plus simple et vraisemblablement la plus ancienne consiste à aligner à vue, en positionnant son œil dans l'axe formé par deux objets de référence. Le positionnement d'autres objets sur cet axe se fait en les déplaçant progressivement jusqu'à ce qu'ils soient alignés. La compréhension des implications géométriques de cette méthode n'était certainement pas la même pour les premiers agriculteurs délimitant leurs champs dans le croissant fertile et pour les métreurs de l'Égypte antique, à l'origine du premier cadastre avéré et des mathématiques.

Une seconde constante dans tous les types d'alignement tient au fait qu'ils ne sont jamais une fin en soi. Les menhirs de Carnac, en Bretagne, ont vraisemblablement été alignés pour une raison symbolique qui est encore mystérieuse pour les anthropologues. Cependant il est peu probable qu'ils aient été disposés ainsi par pur esthétisme géométrique. Or la présence d'un but introduit la notion d'efficience, qui correspond à la capacité d'un système à atteindre au mieux ses objectifs. C'est précisément l'efficience qui va décider des degrés de conscience nécessaires aux phases d'observation, de traitement et de positionnement, pour que l'alignement atteigne de la manière la plus adaptée ses objectifs, quels qu'ils soient.

## 1 Introduction générale

---

Dans le domaine des sciences de la mesure, le degré de conscience des trois phases de l'alignement se traduit par une réflexion sur ce qui est observé et sur la référence à partir de laquelle les déplacements sont calculés. D'une part, les observations issues des systèmes de mesure employés sont entachées d'erreurs aléatoires. D'autre part, le référentiel dans lequel les observations sont faites doit être clairement défini pour éviter, par exemple, que la ligne droite ne s'avère être une géodésique d'une surface équipotentielle de pesanteur. L'ensemble des paramètres qui interviennent dans la mesure vont devoir être déterminés et ce, de la manière la plus adaptée compte-tenu de la précision requise pour l'alignement.

C'est donc la chaîne métrologique, constituée de tout ce qui intervient dans le mesurage, qui va devoir être analysée, de même que l'ensemble des phénomènes susceptibles de l'affecter de manière significative. Le degré d'analyse de la chaîne métrologique et de ses perturbations va dépendre des spécifications de l'alignement, c'est-à-dire de la précision qui doit être atteinte.

### 1.2 Définition du sujet

L'organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), située à la frontière entre la France et la Suisse au nord de Genève, est le plus grand laboratoire de physique des hautes énergies au monde. Cet institut a pour mission principale d'étudier les lois fondamentales qui régissent le monde de l'infiniment petit. Pour ce faire, le CERN développe et exploite des accélérateurs qui amènent des faisceaux de particules à des niveaux d'énergie de plus en plus élevés, puis les font entrer en collision. L'observation de ces événements par des expériences gigantesques, constituées de nombreux capteurs, permettent de valider ou d'infirmer les derniers développements théoriques du modèle standard de la physique quantique.

Le *compact linear collider* (CLIC) est un projet d'accélérateur de particules proposé par le CERN. Il est conçu pour succéder au *large hadron collider* (LHC), l'accélérateur en fonction au CERN depuis 2008. L'objectif du CLIC est de permettre d'étudier plus finement la physique que le LHC devrait mettre en évidence. La dynamique du faisceau de particules du CLIC induit une précision d'alignement des composants de cette machine qui n'a jamais été atteinte jusqu'à présent. Avant même l'alignement final, réalisé à partir du faisceau de particules lui-même, les composants du CLIC doivent être positionnés selon une tolérance à  $3\sigma$  de  $10\ \mu\text{m}$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m. À une telle précision, les composants vont devoir être régulièrement déplacés pour assurer le respect de la tolérance. Du fait que le pré-positionnement des composants ne constitue pas la dernière étape de l'alignement et qu'un repositionnement fréquent est nécessaire, celui-ci est désigné comme étant le pré-alignement actif du CLIC.

L'objet de cette thèse consiste à proposer une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC qui intègre toutes les étapes de la chaîne métrologique allant des réseaux de géodésie jusqu'au pré-alignement actif. Même si les travaux effectués se sont focalisés sur la phase d'observation du pré-alignement, il a fallu s'assurer que la méthode proposée soit compatible avec le traitement des observations et avec le repositionnement.

### 1.3 Problématique de la thèse

Dans le cas du CLIC comme de tout alignement, il s'agit d'observer, de traiter puis de positionner. Si ce n'est que la tolérance d'alignement devant être atteinte requiert d'une part, la prise en compte de phénomènes qui pouvaient être négligés jusqu'à présent et d'autre part, une instrumentation beaucoup plus complexe que dans le cas du LHC. La chaîne métrologique du CLIC est composée de plusieurs niveaux qui font appel à des mesures de géodésie en surface, de topométrie de précision dans le tunnel, de métrologie en laboratoire, ainsi qu'à des observations faites par des capteurs à une précision micrométrique. Les perturbations susceptibles de les affecter, à l'échelle du micromètre, peuvent être dues aux paramètres météorologiques ou aux variations du champ de pesanteur. De plus, chacune de ces mesures peut être associée à un référentiel qui lui est propre et qui doit être défini par rapport aux autres. La proposition d'une méthode de pré-alignement du CLIC va devoir passer par la résolution de chacune de ces difficultés.

La problématique de cette thèse consiste donc à rechercher la méthode qui permet de rassembler l'ensemble des observations du pré-alignement actif du CLIC dans une seule et même chaîne métrologique. Cette méthode doit également prendre en considération les questions de référentiels, qu'ils soient associés aux capteurs, à leurs supports, aux composants à aligner ou aux mesures topométriques. Compte-tenu du rapport entre la précision requise et la distance considérée, s'affranchir des perturbations susceptibles d'intervenir dans la chaîne métrologique représente un défi. Une partie de la problématique va consister à définir ces perturbations, parmi lesquelles se trouvent des phénomènes géophysiques et gravimétriques, et à les intégrer au modèle proposé.

Actuellement parmi le groupe des géomètres du CERN, des recherches relatives au pré-alignement actif du CLIC sont menées en parallèle. De ce fait, le champ des études de cette thèse a été réduit. Deux ingénieurs, Sylvain Griffet et Juha Kemppinen, s'attèlent respectivement aux problèmes de mesure et positionnement des composants du CLIC à l'échelle de ces derniers, de l'ordre de 2 m. Deux étudiants en thèse de doctorat, Sébastien Guillaume et Julien Boerez, travaillent sur les questions gravimétriques et géophysiques relatives au pré-alignement du CLIC. D'une part, les recherches et développements menés au cours de ce doctorat ce sont focalisées sur la phase d'ob-



## 1 Introduction générale

---

servation en amont des composants du CLIC et d'autre part, les phénomènes gravimétriques et géophysiques n'ont été que sommairement étudiés. De ce fait, la méthode proposée pour le pré-alignement actif du CLIC doit être compatible avec les autres travaux menés au sein des géomètres du CERN, effectués sur ces aspects particuliers.

L'approche qui a été choisie pour répondre à la problématique consiste à considérer la chaîne métrologique du pré-alignement du CLIC comme un problème de gestion de systèmes de coordonnées et de calcul des paramètres de transformation. L'exposé des travaux menés dans ce sens est articulé en trois chapitres.

### 1.4 Plan adopté

Le premier chapitre de cette thèse est intitulé « pré-alignement actif du CLIC ». Il a pour but d'exposer les fondements de la méthode proposée. Dans un premier temps, après une introduction du CERN et des accélérateurs qui s'y sont succédés, la tolérance d'alignement est justifiée du point de vue de la dynamique des faisceaux de particules. Dans un second temps, la stratégie générale du pré-alignement active est présentée. Celle-ci inclut une synthèse des travaux antérieurs à cette thèse. Enfin, la dernière partie de ce chapitre traite des axes de recherches déduits de l'analyse de la chaîne métrologique. Il s'agit de justifier le choix fait de considérer le pré-alignement du CLIC en tant que problème de gestion de coordonnées.

Le second chapitre, intitulé « gestion des systèmes de coordonnées », décrit la méthode proposée pour le pré-alignement du CLIC, restreinte aux réseaux géodésiques et métrologiques de références. Il décompose selon une approche déterministe, la chaîne métrologique introduite au chapitre précédent. La première partie définit les outils mathématiques nécessaires, en l'occurrence la théorie des similitudes de l'espace, les calculs associés aux densités de probabilité et quelques notions liés à la propagation des erreurs. Dans la seconde partie du chapitre, il s'agit de définir les référentiels des systèmes de mesure utilisés ainsi que ceux de leurs supports associés. La dernière partie du chapitre explique comment les observations des capteurs sont exprimées dans le repère général par le biais de la modélisation des références d'alignement.

Le dernier chapitre de cette thèse présente les résultats obtenus dans le cadre de la validation du modèle proposé en réponse au problème du pré-alignement actif du CLIC. La première partie de ce chapitre présente les deux expériences qui ont été développées ainsi que leurs résultats respectifs. Le test du TT1, long de 140 m, y tiendra une large place du fait de son rôle fondamental dans la démonstration de la faisabilité du pré-alignement. La seconde partie traite des simulations du pré-alignement par la méthode de Monte-Carlo, tout d'abord par un modèle global approximatif fait en 2008,

## 1.4 Plan adopté

---

puis par un modèle exhaustif à l'échelle de l'expérience du TT1. La dernière partie, donne les directions à suivre pour finaliser la démonstration de la faisabilité du pré-alignement du CLIC. Parmi elles, celles qui correspondent aux échéances à court terme devraient permettre de valider le modèle simulé par les résultats expérimentaux.



# PRÉ-ALIGNEMENT DU CLIC

---

## Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>L'enjeu de l'alignement du CLIC</b>	<b>9</b>
2.2.1	Introduction	9
2.2.2	Le CERN et la physique des hautes énergies	9
2.2.3	Le projet CLIC	14
2.2.4	Alignement et stabilisation du CLIC	19
2.2.5	Conclusion	22
<b>2.3</b>	<b>Décomposition du pré-alignement</b>	<b>23</b>
2.3.1	Introduction	23
2.3.2	Le réseau géodésique de référence	23
2.3.3	Le réseau métrologique de référence	28
2.3.4	Pré-alignement des composants du CLIC	35
2.3.5	Conclusion	41
<b>2.4</b>	<b>La chaîne métrologique du MRN</b>	<b>41</b>
2.4.1	Introduction	41
2.4.2	Choix des axes de recherche	42
2.4.3	Enchaînement des systèmes de coordonnées	45
2.4.4	Nouvelle décomposition du pré-alignement	51
2.4.5	Conclusion	53
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>54</b>

---



### 2.1 Introduction

L'organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) rassemble, depuis sa création dans les années cinquante, un grand nombre de compétences. Les moyens sont très divers, mais l'objet est constant, en l'occurrence l'exploration de la physique des hautes énergies. Pour pouvoir progresser dans ce domaine, de nombreuses recherches appliquées en ingénierie sont nécessaires. Le projet de *compact linear collider* (CLIC) du CERN ne déroge pas à cette règle. L'alignement est un des axes de recherches appliquées qui est particulièrement crucial pour le fonctionnement de cette machine.

Cette thèse participe aux travaux de développement d'un projet extrêmement complexe. Pour en saisir pleinement les enjeux et la problématique, une mise en perspective de l'alignement dans le cadre du projet CLIC semble opportune. Pour un collisionneur, l'alignement est un enjeu au sens où la machine n'atteint pas son fonctionnement optimal s'il ne répond pas aux spécifications. Dans la première partie de ce chapitre, cet enjeu va être présenté après une description du CERN et du CLIC dans leurs contextes historiques et scientifiques.

Depuis 1990, les géomètres du CERN effectuent des recherches relatives à l'alignement du projet CLIC. Ces vingt années de développement seront en partie décrites de manière à définir les fondements sur lesquels cette thèse s'est appuyée. La tolérance à  $3\sigma$  du pré-alignement actif du CLIC est de  $10\ \mu\text{m}$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m, ce qui représente une performance trente fois supérieure à celle du *large hadron collider* (LHC). Cet objectif audacieux, qui sera justifié par la suite, a naturellement soulevé beaucoup de questions relatives aux aspects géodésiques, métrologiques et instrumentaux. L'objet de la seconde partie de ce chapitre sera de définir la stratégie proposée au problème du pré-alignement actif du CLIC et à partir de laquelle les axes de recherches seront définis.

Cette description du pré-alignement actif va soulever plus de questions qu'elle n'apporte de réponses, notamment sur le point crucial du principe général du pré-alignement, à savoir le recouvrement des fils tendus. L'analyse de la chaîne métrologique, exposée dans la troisième partie de ce chapitre, permettra de mettre en évidence les axes de recherches choisis. L'idée développée consiste à considérer chaque objet qui compose le pré-alignement du CLIC comme un système euclidien de coordonnées. Le problème se réduit ainsi à la définition de chacun de ces repères spécifiques, puis à la gestion des transformations permettant de passer des uns aux autres.

## 2.2 L'enjeu de l'alignement du CLIC

### 2.2.1 Introduction

Le projet CLIC représente un défi technologique à maints égards. L'alignement en est un, parmi d'autres certes, mais non des moindres. La tolérance du pré-alignement du CLIC est de  $10\ \mu\text{m}$  sur les positions transversales et verticales des composants, le long d'une fenêtre coulissante de 200 m.

Dans cette partie, il s'agit, non seulement de justifier cette spécification, mais aussi de la définir du point de vue de la dynamique du faisceau. L'intérêt de cette démarche est qu'elle permet de comprendre pleinement le contexte scientifique dans lequel l'alignement doit s'insérer, en l'occurrence la quête de la luminosité des collisions par la maîtrise de l'émittance du faisceau de particules.

Pour ce faire, un bref aperçu historique du CERN et des accélérateurs de particules de cette organisation va être effectué, ce qui va permettre de placer le projet CLIC dans le contexte mondial des recherches sur la physique des hautes énergies. Afin d'introduire la définition des contraintes d'alignement de cette machine, quelques notions de dynamique des faisceaux de particules seront décrites.

### 2.2.2 Le CERN et la physique des hautes énergies

#### 2.2.2.1 Brève histoire de l'organisation

Au lendemain de la seconde guerre mondiale, la physique européenne était exsangue, comme l'ensemble du continent. Nombre de scientifiques émigrèrent, parmi lesquels certains se mirent au service des principaux vainqueurs qu'étaient les États-Unis d'Amérique et l'Union Soviétique.

La physique européenne des hautes énergies souffrit particulièrement de ce partage des cerveaux du fait de l'importance géostratégique de l'arme atomique dans les rapports entre les deux blocs. La guerre froide commençait, tout comme l'âge de la terreur nucléaire.

De cet amer constat, le physicien français Louis de Broglie proposa, lors de la conférence européenne de la culture à Lausanne en 1949, la création d'un laboratoire scientifique européen. En 1952, cette proposition se concrétisa avec la fondation du Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire [CERN, 2004]. Un an après la signature du traité instituant la Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier, les scientifiques suivaient les pas des industriels et des politiciens vers l'Europe communautaire. Sur la figure 2.1 figurent les physiciens Lockspeiser, Amaldi, Bloch, Kowarski, Bakker et Bohr lors de la première réunion du conseil en 1952.

En 1954, le CERN devint l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. Si le nom changea, l'acronyme lui survécut. Elle fut implantée à la frontière entre la France et la Suisse, sur le territoire du village de

## 2 Pré-alignement du CLIC

---



FIG. 2.1 – Première réunion instituant le conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN) en 1952

Meyrin. Douze pays membres, qui auparavant et pour la plupart d'entre eux s'affrontaient, allaient désormais œuvrer ensemble pour le progrès de la science fondamentale.

La convention instituant le CERN en 1954 définit les quatre missions principales de l'organisation [CERN, 2004]. Si la science évolua depuis lors, elles sont toujours d'actualité.

- La mission principale du CERN consiste en la recherche nucléaire de caractère purement scientifique et fondamental. Il s'agit de comprendre les lois régissant l'infiniment petit de l'univers.
- Pour parvenir à ce but, l'organisation doit mettre en œuvre des moyens qui repoussent constamment les limites de la technologie.
- Le CERN s'abstient de toute activité à des fins militaires. Les fondements de l'organisation sont la collaboration entre états européens et l'encouragement aux coopérations internationales.
- Les résultats des travaux sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles. La mission de publicité est renforcée par la volonté du CERN de participer à la formation des jeunes chercheurs.

Aujourd'hui le CERN rassemble vingt états membres et 2500 employés. Il est le plus grand laboratoire de physiques des hautes énergies au monde.

2.2.2.2 Les accélérateurs et autres collisionneurs

Généralement une théorie, pour pouvoir être appliquée, doit être validée expérimentalement. La théorie de la relativité générale d'Albert Einstein fut prise au sérieux par la communauté scientifique quand il s'avéra qu'elle concordait avec les observations de la rotation de l'orbite de Mercure et avec celles de déviations de positions d'étoiles du fait de l'effet gravitationnel du Soleil.

Parfois, c'est l'observation expérimentale qui engendre la théorie. Par exemple la théorie du « Big Bang » provient de la découverte par Edwin Hubble des vitesses relatives des nébuleuses.

Les accélérateurs de particules qui se sont succédés au CERN depuis sa création furent conçus dans le but de valider expérimentalement ou de susciter de nouvelles théories en physique des hautes énergies. Chacun de ces accélérateurs correspondait à une ou plusieurs théories en particulier, leur validation ou non permettant d'en élaborer de nouvelles, elles-même devant être confrontées aux observations par la suite.

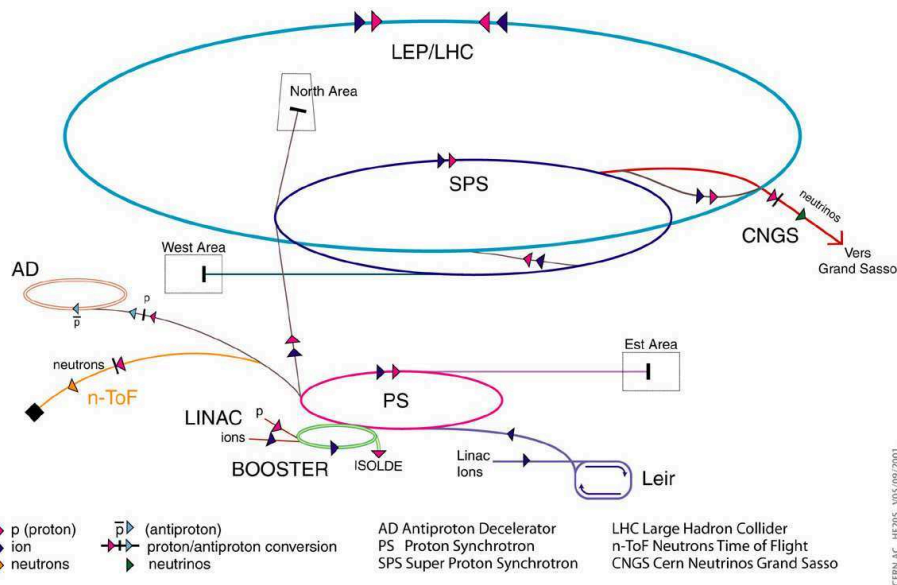


FIG. 2.2 – Schéma du complexe actuel des accélérateurs du CERN

Un accélérateur de particules consiste à amener un faisceau de particules, regroupées en paquets, à un niveau élevé d'énergie [Baird, 2007]. En amenant ces particules à la collision, contre une cible fixe ou contre d'autres particules, il est possible de détecter des phénomènes impossibles à observer à des niveaux standards d'énergie. L'accélérateur de particules en question est alors un collisionneur.

De nombreux accélérateurs et collisionneurs se sont succédés au CERN

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

(voir le complexe actuel d'accélérateurs de particules en figure 2.2). Parmi eux peuvent être cités ceux qui symbolisèrent de grande étapes pour l'organisation [CERN, 2004].



FIG. 2.3 – Livraison du premier aimant du PS en décembre 1956

Le synchro-cyclotron (SC) en service de 1957 à 1991, accélérât des protons jusqu'à une énergie de 600 MeV<sup>1</sup>. Ce fut le premier accélérateur du CERN. Le diamètre de l'orbite final du faisceau était de 2.27 m.

Le *proton synchrotron* (PS), en service depuis 1959, accélère des faisceaux de protons jusqu'à une énergie de 28 GeV. D'un diamètre de 200 m, il s'agissait du premier anneau de grand taille du CERN. A son inauguration, le CERN quitta le domaine de la physique nucléaire pour celui de la physique des particules (voir le premier aimant du PS en figure 2.3).

Les *intersecting storage rings* (ISR) franchirent de nombreuses étapes. Ces anneaux de 300 m de diamètre, en service de 1962 à 1984, correspondaient au premier collisionneur de protons, puis de protons et d'antiprotons. L'énergie des faisceaux atteignait 62 GeV. Leurs mises en place furent aussi l'occasion pour le CERN d'étendre son site en France.

Avec la mise en route du *super proton synchrotron* (SPS) en 1976, le CERN devenait le pionnier des collisionneurs gigantesques : des faisceaux de

---

<sup>1</sup>L'électron-Volt est l'unité de mesure d'énergie utilisée en physique des particules.  $1 \text{ eV} = 1.60217653 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Cela correspond à l'énergie cinétique d'un électron accéléré, depuis le repos, par une différence de potentiel de 1 V.



---

## 2.2 L'enjeu de l'alignement du CLIC

protons à 300 GeV dans un tunnel creusé à 40 m de profondeur et de 7 km de circonférence.

Le *large electron positron* (LEP), en service de 1989 à 2000, est encore le plus grand et le plus puissant des collisionneurs de leptons<sup>2</sup> jamais construits. D'une circonférence de 27 km, dans un tunnel à 100 m de profondeur, ses faisceaux atteignaient 100 GeV.

Le *Large Hadron Collider* est entré en fonction en 2008. Il utilise le tunnel laissé vacant depuis le démontage du LEP. Basé sur une technologie supraconductrice, il est conçu pour que ses faisceaux de protons atteignent 7 TeV. Le LHC est le collisionneur le plus puissant au monde alors qu'à ce jour il n'atteint que la moitié de sa puissance nominale.



FIG. 2.4 – Les cryodipôles dans le tunnel du LHC

Le dernier né des grands collisionneurs du CERN — le LHC (voir des cryodipôles<sup>3</sup> du LHC en figure 2.4) — devrait apporter des résultats susceptibles de prouver l'existence du boson de Higgs, la particule prédite par le modèle standard de la physique quantique expliquant pourquoi certaines particules ont une masse et d'autres n'en ont pas. Le LHC devrait aussi apporter des réponses au sujet de l'antimatière qui est nettement minoritaire dans l'univers actuel alors que matière et antimatière devraient être équilibrées.

---

<sup>2</sup>Les leptons sont les particules insensibles à l'interaction forte, contrairement aux hadrons. Les leptons les plus fameux sont les électrons à opposer aux protons, membres de la famille des hadrons.

<sup>3</sup>Un cryodipôle est un aimant qui permet, à l'aide d'une technologie supraconductrice, de changer la trajectoire du faisceau par un champ magnétique dipolaire.

## 2 Pré-alignement du CLIC

### 2.2.3 Le projet CLIC

#### 2.2.3.1 Contexte du CLIC

Le *Compact Linear Collider* (CLIC) est un des projets de collisionneurs conçu pour explorer la physique que le LHC devrait mettre en évidence, notamment les propriétés du boson de Higgs [Ellis *et al.*, 1998]. Comme il peut être déduit du schéma en figure 2.5, le CLIC est un collisionneur linéaire d'électrons et de positrons, composé principalement de deux *linear accelerators* (linacs) de 21 km. Sa longueur totale devrait atteindre 48.3 km. L'énergie de centre de masse des faisceaux au niveau du point d'interaction sera 3 TeV [Braun *et al.*, 2008]. Il s'agit certes d'une valeur moins élevée que le LHC, cependant, comme le CLIC est un collisionneur de leptons et non de hadrons, les énergies des collisions n'ont pas exactement la même signification. En effet, un électron est presque 2000 fois plus léger qu'un proton.

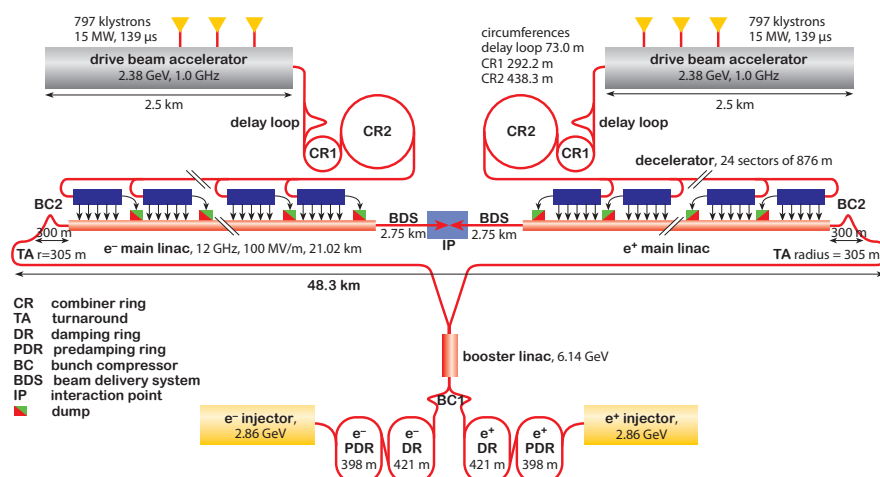


FIG. 2.5 – Schéma général du collisionneur CLIC

Actuellement, pour faire progresser la physique fondamentale, les accélérateurs doivent atteindre des énergies colossales qui les rendent extrêmement onéreux. Le coût du LHC atteint quatre milliards d'euros alors qu'il n'y avait pas de tunnel à creuser — celui fait pour le LEP était vacant — ni de complexe d'injection à construire — le LHC se sert du PS et du SPS comme injecteurs. Ce ne fut pas chose aisée pour le CERN de mobiliser une telle somme. Les États-Unis d'Amérique l'apprirent à leurs dépens lors de l'abandon en 1993, pour raisons budgétaires, du *superconducting super collider* (SSC) alors en cours de construction. Aucun état ne peut plus financer seul un projet d'une telle ampleur.

De ce fait, le collisionneur qui succèdera au LHC sera le fruit d'une collaboration internationale. Deux projets sont en concurrence, le CLIC d'une

## 2.2 L'enjeu de l'alignement du CLIC

part, proposé par le CERN et l'*international linear collider* (ILC) (voir le schéma en figure 2.6). Ces deux machines sont des accélérateurs linéaires de leptons. Le choix entre ces deux projets reviendra à l'*international committee for future accelerators* (ICFA) qui jugera, à l'aide des premiers résultats du LHC, laquelle de ces deux machines est la plus à même d'en prendre la suite.

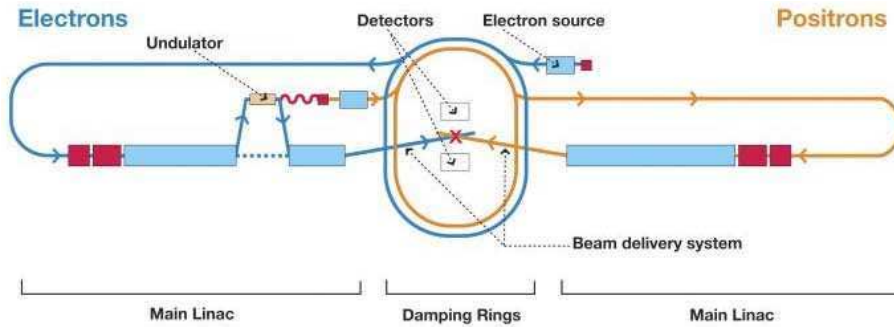


FIG. 2.6 – Schéma simplifié du collisionneur ILC

La concurrence entre le CLIC et l'ILC peut néanmoins être considérée comme saine. Pratiquement tous les instituts de recherche en physique des hautes énergies du monde collaborent aux deux projets. De plus, le CLIC et l'ILC partagent de nombreux points communs, tels les détecteurs au point d'interaction ou encore le système final de focalisation du faisceau, le *beam delivery system* (BDS), optimisant ainsi les recherches et le développement.

Les premières réflexions du CERN sur un accélérateur de leptons apte à atteindre 1 TeV furent menées en 1985, avant même la mise en route du LEP. L'objet du document qui fut nommé rétroactivement « CLIC note 1 », consistait à proposer de nouveaux concepts permettant d'obtenir des faisceaux, respectivement d'électrons et de protons, d'énergies supérieures à 1 TeV et 10 TeV, du fait que « *la taille et le coût des accélérateurs circulaires ne [pouvaient] augmenter indéfiniment* » [Lawson, 1985].

Depuis lors, l'idée germa au CERN de concevoir un collisionneur linéaire au principe de fonctionnement radicalement différent des autres machines existantes ou en cours de développement de par le monde.

### 2.2.3.2 Principe de fonctionnement du CLIC

Le principe de fonctionnement du CLIC est basé sur la méthode des deux faisceaux. L'énergie nécessaire à l'accélération du faisceau principal — le *Main Beam* — est obtenue en décélérant le faisceau d'entraînement — le *Drive Beam*. Pour ce faire, le décélérateur est essentiellement composé de *power extraction and transfer structures* (PETS) qui soutirent l'énergie du faisceau d'entraînement et la transmettent aux *accelerating structures* (AS)



## 2 Pré-alignement du CLIC

du faisceau principal par le biais de guides d'onde [Braun *et al.*, 2008] (voir le schéma de ce principe en figure 2.7).

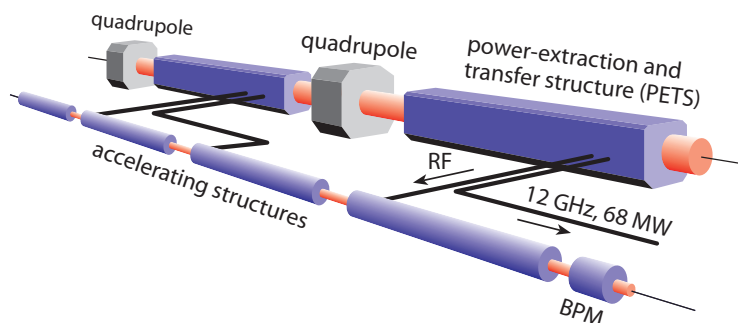


FIG. 2.7 – Schéma du principe de fonctionnement du CLIC. L'énergie du faisceau d'entraînement est extraite par les PETS puis transmise aux cavités accélératrices du faisceau principal.

De ce fait, chacun des deux linacs du CLIC est composé d'un accélérateur d'électrons ou de positrons, correspondant au faisceau principal, et d'un décélérateur pour le faisceau d'entraînement. A proprement parler, il y a plusieurs décélérateurs par *linear accelerator* (linac). En effet, au bout de 800 m d'extraction d'énergie, la dynamique du faisceau d'entraînement ne permet plus d'alimenter les cavités accélératrices du faisceau principal. Le décélérateur s'achève par un système d'éjection du faisceau. Un autre décélérateur prend alors immédiatement le relai [Braun *et al.*, 2008] (Voir la représentation du *Drive Beam* en figure 2.5).

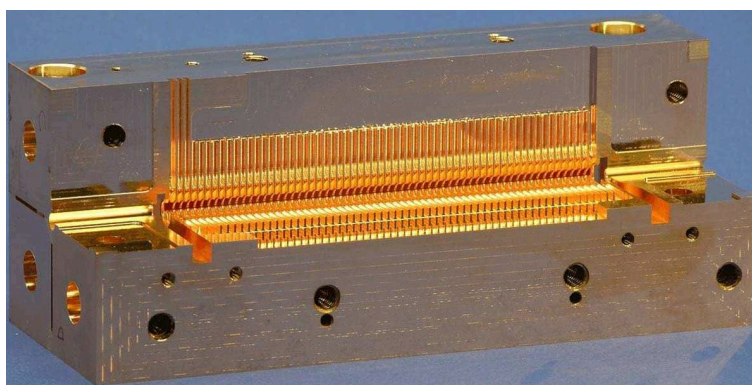


FIG. 2.8 – Proposition de cavité accélératrice du CLIC

Une des spécificités du CLIC par rapport aux autres collisionneurs est la taille de ses composants. Par rapport aux cryodipôles du LHC, longs de 20 m et pesant 30 t, ceux du CLIC — AS, PETS et autres quadrupôles — ont une longueur généralement inférieure au mètre et une masse de quelques

## 2.2 L'enjeu de l'alignement du CLIC

dizaines de kilogrammes (les quadrupôles les plus grands feront 2 m de long et pèseront plusieurs centaines de kilogrammes). Malgré leur petitesse, ces composants doivent atteindre des performances extrêmement audacieuses. Ainsi les cavités accélératrices (voir une proposition de cavité en figure 2.8), longues de 23 cm, génèreront un champ électrique dont le gradient atteindra 100 MV/m à une fréquence de 12 GHz [Braun *et al.*, 2008]. De telles spécifications requérant de très grandes qualités, notamment en terme d'usinage et de résistance des matériaux, les cavités nécessiteront de nombreuses recherches et furent longtemps un des principaux points clefs de la faisabilité du CLIC.

### 2.2.3.3 Les modules du CLIC

Précisément du fait de leur faible taille, il est prévu d'assembler les composants du CLIC sur des poutres de 2.01 m. Une poutre du faisceau principal avec sa voisine du faisceau d'entraînement forment un module du CLIC. Chaque linac du CLIC comporte plus de 10000 modules dont il existe cinq variantes [Braun *et al.*, 2008].

Le module standard, de type T0, représente la grande majorité de la machine. La poutre du faisceau principal supporte huit cavités accélératrices. La poutre du faisceau d'entraînement comporte deux fois la séquence suivante : un quadrupôle<sup>4</sup> puis deux PETS, chacun d'entre eux étant connecté à deux cavités accélératrices du faisceau principal par le biais de guide d'onde (voir le schéma en figure 2.9).

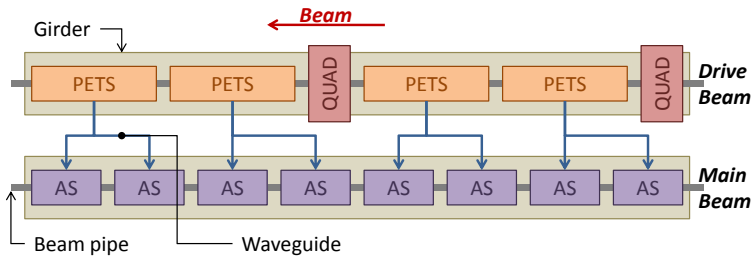


FIG. 2.9 – Vue schématique du module CLIC de type T0

Les quatre autres types de modules, les modèles de T1 à T4 diffèrent du modèle standard du fait de la présence d'un quadrupôle sur le faisceau principal qui prend la place de plusieurs cavités accélératrices. Le module de type T1 a ainsi un quadrupôle de 50 cm de long qui remplace deux cavités accélératrices. Le PETS du faisceau d'entraînement connecté à ces deux cavités est donc supprimé (voir une vue CAO d'un module de type T1 en figure 2.11

<sup>4</sup>Un aimant quadrupôle sert à focaliser ou défocaliser le faisceau. La similitude avec les lentilles convergentes et divergentes est tellement poussée que les physiciens de la dynamique du faisceau parlent d'optique pour désigner ces aimants [Baird, 2007].

## 2 Pré-alignement du CLIC

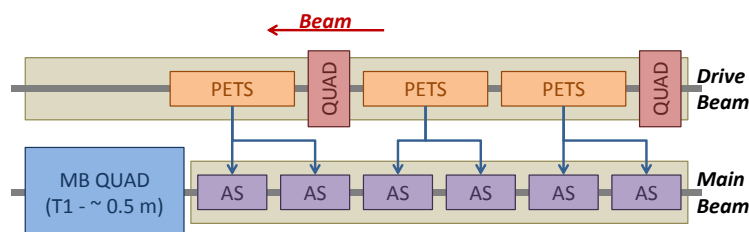


FIG. 2.10 – Vue schématique du module CLIC de type T1. Il diffère du type T0 par l'ajout d'un quadrupôle au faisceau principal.

et le schéma en figure 2.10). Du fait des contraintes de stabilisation sur les quadrupôles du faisceau principal, ceux-ci sont supportés indépendamment des poutres.

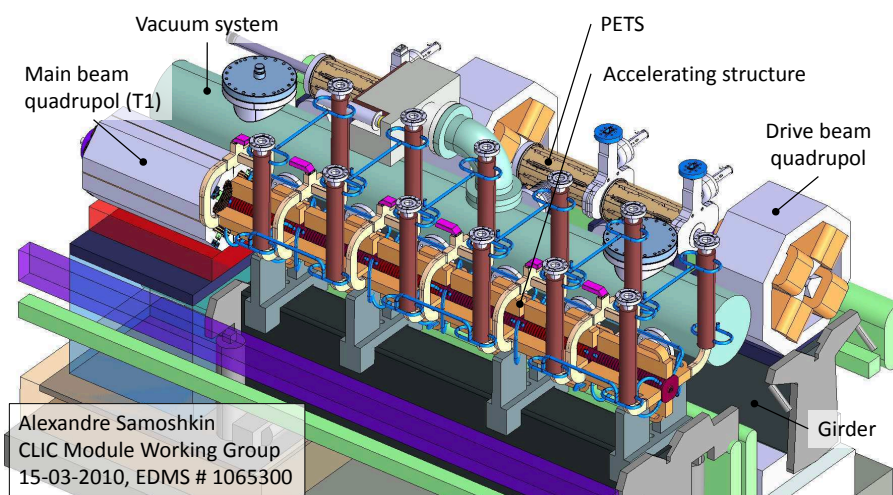


FIG. 2.11 – Module CLIC de type T1 en 2010

Pour les modules de types T2, T3 et T4, le principe est le même. La longueur du quadrupôle du faisceau principal est, respectivement, de 1 m, 1.5 m et 2 m. Pour le dernier type de module, comme la longueur du quadrupôle est égale à la longueur de la poutre, celle-ci est supprimée. Le type T4 ne comporte donc aucune cavité accélératrice ni aucun PETS.

Au fur et à mesure que le faisceau s'approche du point d'interaction, c'est-à-dire l'intersection des axes des deux linacs où les particules entrent en collision, la nécessité d'accélérer le faisceau s'amoin-drit au profit de la focalisation du faisceau. Ainsi, les modules de type T1 à T4, correspondant à des quadrupôles du faisceau principal de plus en plus grands, sont d'autant plus près de ce point d'interaction que leur quadrupôle est long.

Une fois que la vitesse et le niveau d'énergie des faisceaux principaux sont satisfaisants [Baird, 2007], les linacs s'achèvent et laissent place aux BDS qui

## 2.2 L'enjeu de l'alignement du CLIC

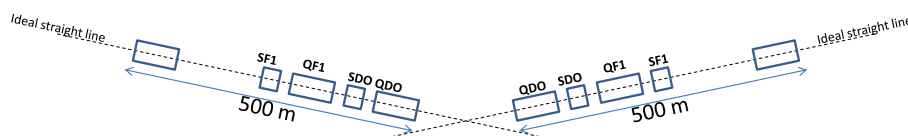


FIG. 2.12 – La focalisation finale avant le point d'interaction

servent à préparer les paquets d'électrons et de positrons pour qu'ils aient les propriétés souhaitées en vue des collisions. Le BDS, long de 2.75 km (voir la figure 2.5), est principalement composé par le système de focalisation finale du faisceau [Braun *et al.*, 2008] (voir le schéma en figure 2.12).

### 2.2.4 Alignement et stabilisation du CLIC

#### 2.2.4.1 Quelques notions sur les accélérateurs

De la même façon qu'un véhicule, pour atteindre des vitesses élevées, doit se mouvoir selon une trajectoire la plus lisse possible, sinon droite, les composants des accélérateurs de particules, quels que soient leurs rôles respectifs, sont conçus pour fonctionner selon des tolérances d'alignement bien définies.

L'objectif d'un collisionneur est de fournir des collisions de particules les plus puissantes possibles. Un paramètre essentiel dans cette direction est la luminosité des collisions, qui doit être la plus grande possible. Ce paramètre est directement proportionnel au nombre de particules par unité de temps et par unité de surface. De ce fait, en considérant un nombre constant de particules par paquet, plus la luminosité est élevée, plus le faisceau est « dense » et plus la probabilité de collision est importante.

Pour assurer une luminosité optimale au point d'interaction, il est nécessaire, de par la définition de ce paramètre, de conserver une taille de faisceau aussi faible que possible en transversal et en vertical. En terme de dynamique de faisceau de particules, il s'agit de conserver l'émittance des paquets de particules constituant le faisceau.

Dans un accélérateur, les particules, regroupées en paquets, oscillent autour de chacun des axes du faisceau en transversal et vertical selon une certaine longueur d'onde et une certaine phase. Si à un endroit et à un instant donnés, le paquet de particules est représenté selon les paramètres  $x'$  en fonction de  $x$  ( $x$  est la position transversale ou verticale de la particule,  $x'$  est la dérivée de  $x$  selon sa position longitudinale  $z$ ), une ellipse est obtenue (voir la figure 2.13). Cette représentation est appelée le plan de phase. L'ellipse regroupant 68.3 % des particules du paquet, c'est-à-dire la proportion des particules normalement distribuées dans l'intervalle  $[-\sigma, \sigma]$ , est caractérisée par l'émittance  $\varepsilon$  et la fonction  $\beta$ .

L'émittance  $\varepsilon$  selon l'axe en question est définie comme la surface de

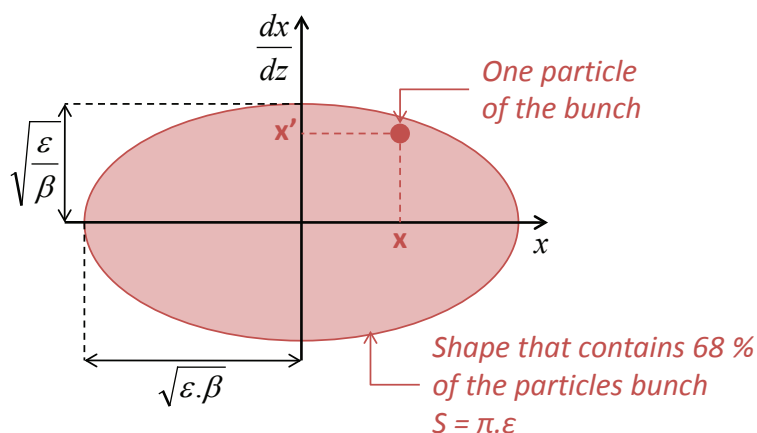


FIG. 2.13 – Définition de l'émittance transversale  $\varepsilon$ . Un paquet de particules du faisceau (*bunch*) est considéré dans son plan de phase, ce qui met en évidence les différents états possibles de son comportement dynamique.

l'ellipse qui rassemble 68 % des particules, divisée par  $\pi$  [Baird, 2007] (voir la figure 2.13). Quant à la fonction  $\beta(z)$ , il s'agit de la modulation de la taille du faisceau.

Qu'il s'agisse de l'émittance transversale ou verticale, celle-ci est étroitement liée à la taille du faisceau dans la direction respective. L'émittance peut même être considérée comme une généralisation du concept qui intègre ses aspects dynamiques le long de la machine. Or tout décalage dans l'axe d'une cavité accélératrice ou d'un quadrupôle engendre une augmentation de l'émittance [Baird, 2007]. C'est dans ce cadre que l'alignement intervient. Les tolérances d'alignement sont déterminées par rapport aux accroissements acceptables de l'émittance le long de la machine afin d'optimiser la luminosité des collisions.

### 2.2.4.2 Au sujet de l'alignement du CLIC

Les dimensions des paquets de particules du CLIC au niveau du point d'interaction devraient atteindre, respectivement en longitudinal, transversal et vertical, de 44  $\mu\text{m}$ , 40 nm et 0.67 nm [Braun *et al.*, 2008]. Ces tailles infinitésimales — 0.1 nm correspond à l'ordre de grandeur d'un atome — induisent des contraintes de conservation de l'émittance drastiques et, de ce fait, des tolérances d'alignement et de stabilisation extrêmement contraignantes.

Les défauts d'alignement peuvent survenir à différentes échelles. Il faut alors penser ces erreurs comme des perturbations selon différentes longueurs d'ondes. Au niveau d'un module, autrement dit sur une longueur de 2.01 m, ces défauts d'alignement sont essentiellement tributaires de l'incertitude du réseau de pré-alignement des supports et de celle de la fiducialisation (lire

## 2.2 L'enjeu de l'alignement du CLIC

le paragraphe 2.3.4). En considérant de plus grandes distances, les perturbations dont les longueurs d'onde correspondent à un module s'annulent. De ce fait, les accroissements d'émittance du faisceau sont plus sensibles aux erreurs du réseau métrologique de référence (lire le paragraphe 2.3.3), c'est-à-dire aux perturbations de grandes longueurs d'onde [Schulte, 2009b].

Les spécifications en termes d'alignement et de stabilisation sont nombreuses pour le CLIC [Riddone *et al.*, 2008]. En effet, il est nécessaire de les définir pour chacun des composants de ce collisionneur et chaque procédure. Cependant, comme la problématique de cette thèse est orientée vers le réseau métrologique de référence, seule la tolérance d'alignement sur longue distance est présentement pertinente.

La tolérance est de 10  $\mu\text{m}$  dans les directions transversales et verticales par rapport au faisceau [CLIC study team, 2000] et correspond à une tolérance à trois sigma. La question restant en suspens concerne la distance le long de laquelle cette tolérance d'alignement doit s'appliquer. Sur ce point, la justification des 200 m provient des simulations de l'accroissement de l'émittance en fonction de la longueur d'onde des erreurs d'alignement sur longue distance. Selon ces résultats, la distance définissant la tolérance d'alignement est de 200 m [Schulte, 2009b].

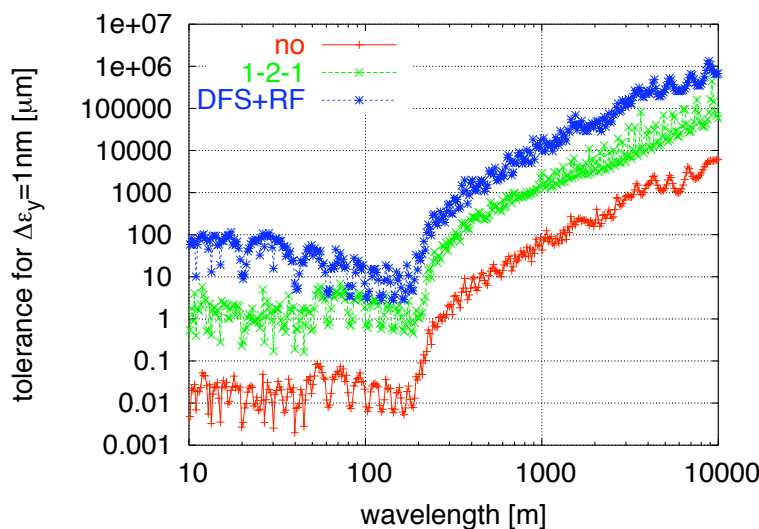


FIG. 2.14 – Tolérances d'alignement, en fonction des longueurs d'ondes des erreurs, nécessaires aux corrections du faisceau pour un accroissement de l'émittance fixé à 1 nm

La figure 2.14 en est l'illustration. Un budget maximal d'accroissement d'émittance a été fixé à 1 nm. À partir de cette contrainte, la tolérance des erreurs d'alignement, selon telle ou telles longueurs d'ondes, nécessaire au bon fonctionnement des corrections du faisceau, a pu être simulée. La correction finale, *dispersion for steering* (DFS), semble sur la figure 2.14

## 2 Pré-alignement du CLIC

particulièrement sensible aux erreurs d'alignement sur 200 m pour lesquelles le budget d'accroissement de l'émittance implique une tolérance de  $10\ \mu\text{m}$ .

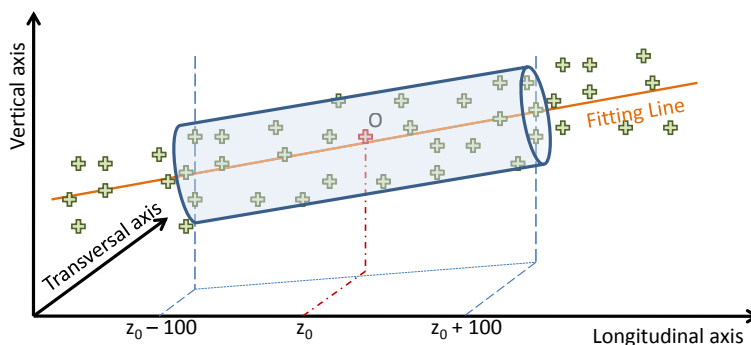


FIG. 2.15 – Le respect de la tolérance d'alignement revient à s'assurer que les erreurs d'alignement appartiennent, sur 200 m, à un cylindre de  $10\ \mu\text{m}$  de rayon.

Ainsi, la tolérance à trois sigma sur l'incertitude de la chaîne métrologique constituant le réseau métrologique de référence est de  $10\ \mu\text{m}$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m. La figure 2.15 permet d'illustrer une telle spécification. Si une section de 200 m du CLIC, quelle qu'elle soit, est considérée, alors tous les points définis à partir du réseau métrologique de référence qu'elle contient doivent se trouver dans un cylindre de  $10\ \mu\text{m}$  de rayon. Selon les résultats des premières simulations du pré-alignement et de leur exploitation par la dynamique du faisceau, une incertitude moins bonne pourrait suffire [Touzé *et al.*, 2009] [Schulte, 2009a]. Cependant le choix fut fait de conserver cette tolérance comme objectif.

### 2.2.5 Conclusion

L'ensemble de cette partie introduisant le CERN, ses machines passées, présentes ou futures, le CLIC dans son principe et jusqu'à l'enjeu de son alignement est révélateur du fonctionnement de cette institution. En effet, les physiciens théoriciens énoncent initialement un besoin, une requête pour un accélérateur ayant telles propriétés en luminosité et énergie afin d'étudier tel ou tels phénomènes. Dès lors, ce besoin est transmis à d'autres physiciens, spécialisés en dynamique de faisceau, qui élaborent un projet susceptible de répondre à cette requête. Ce projet impliquant un grand nombre de composants, des spécifications sur chacun de ces derniers sont émises puis transmises à un grand nombre de chercheurs et d'ingénieurs spécialisés.

Le CLIC ne fait pas exception à cette règle, ni les études sur l'alignement. Elles forment une modeste pierre d'un immense ouvrage mais qui, sans elle, ne pourrait s'ériger. Sans pré-alignement à  $10\ \mu\text{m}$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m, l'émittance ne peut être bridée suffisamment pour assurer



---

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

une luminosité de collision optimale. Ces tolérances sont un défi, à la mesure de l'audace des technologies impliquées dans l'ensemble du projet CLIC. Il s'agit de gagner un ordre de grandeur par rapport à la précision d'alignement du LHC.

Cela étant, au risque de sombrer dans l'anachronisme, est-ce qu'atteindre une précision de 0.1 mm lorsqu'il s'agissait de développer les méthodes pour aligner le PS à la fin des années 1950 ne représentait pas un défi similaire pour les géomètres du CERN de l'époque ?

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

### 2.3.1 Introduction

La tolérance du pré-alignement actif du CLIC est, à  $3\sigma$ , de 10  $\mu\text{m}$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m. Le terme de pré-alignement tient au fait qu'il ne s'agit pas de la dernière étape de l'alignement de cette machine. Cette dernière est effectuée par rapport au faisceau de particules et est du ressort des physiciens. Enfin, il s'agit d'un système actif de pré-alignement du fait qu'à l'issue de la phase de mesure, les composants de l'accélérateur doivent être repositionnés.

De ce fait, la tolérance citée précédemment doit être interprétée de deux manières différentes et qui correspondent à deux problématiques distinctes du pré-alignement actif. Tout d'abord, le réseau métrologique sur lequel s'appuie le pré-alignement doit avoir une incertitude de mesure sur 200 m de 3.3  $\mu\text{m}$  ( $1\sigma$ ). Ensuite, il s'agit de repositionner l'accélérateur de manière à ce qu'il forme une ligne droite selon cette tolérance.

Dans cette partie va être décrite la stratégie du pré-alignement actif du CLIC. Tout d'abord il s'agira de présenter les systèmes de mesure composant les différents réseaux, de la géodésie à la métrologie. Enfin, le problème du repositionnement sera brièvement abordé.

### 2.3.2 Le réseau géodésique de référence

#### 2.3.2.1 Le réseau géodésique en surface

Le réseau géodésique de référence est constitué de points disposés au sol du tunnel et espacés d'une vingtaine de mètres les uns à la suite des autres. Il est déterminé par les méthodes usuelles au CERN pour l'alignement des accélérateurs, tels le LEP ou le LHC, permettant d'atteindre une incertitude relative de 0.1 mm [Mayoud, 1989]. Au niveau de chaque puits d'accès au tunnel, ces points sont rattachés à un réseau de piliers géodésiques en surface par le biais de descentes de points. En effet, du fait de la difficulté de contraindre transversalement un réseau métrologique souterrain, ces rattachements permettent de définir des couloirs radiaux, au niveau de chaque



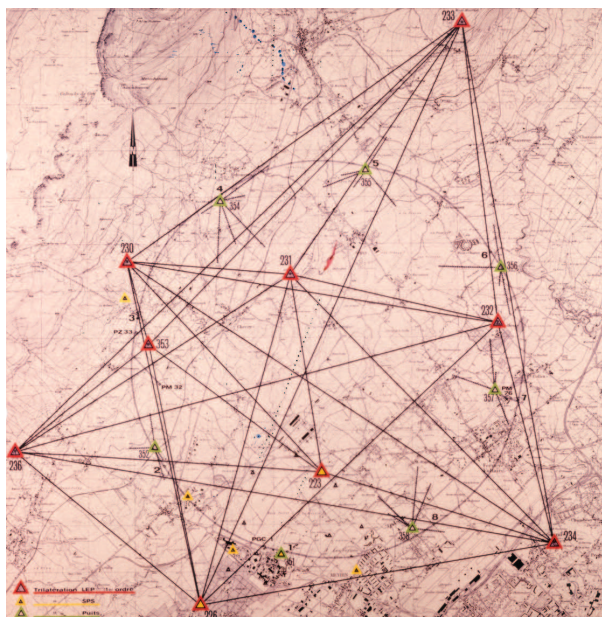


FIG. 2.16 – Triangulation du LEP, de 1983 à 1986

puits, et au travers desquels le réseau géodésique de référence doit passer, à l'incertitude de la descente de points près.

Le dernier réseau géodésique de surface au CERN (voir la figure 2.16) date de la mise en place du LEP, dans les années 1980. Il a été déterminé par mesures de triangulation et de distances (voir la figure 2.17) ainsi qu'avec des cheminements de nivellement de précision.

Les techniques modernes de la géodésie, notamment le *global positioning system* (GPS) en mode différentiel, permettent désormais de circonscrire les piliers du réseau en surface à la proximité immédiate des puits d'accès au tunnel, tout en assurant une précision relative de ces points les uns par rapport aux autres de 1 mm par kilomètre [Duquenne *et al.*, 2005].

Le système de coordonnées actuellement utilisé au CERN, le *CERN coordinate system* (CCS) est euclidien et défini par rapport à l'*international terrestrial reference frame* (ITRF) [Wiat, 2001]. Il s'agit d'un repère local astronomique. De ce fait, il nécessite la connaissance locale du géoïde pour traiter les données tant altimétriques que planimétriques. L'origine du système de coordonnées du CERN correspond au pilier géodésique  $P_0$  au centre du PS. La direction de la verticale en ce point définit l'un des trois axes du repère. Les deux autres axes sont définis dans le plan normal à ce vecteur passant par un autre pilier du PS [Jones, 2000a]. Le modèle de géoïde utilisé est le même qu'en Suisse, en l'occurrence le CHGEO2004, dont l'erreur relative, rapportée à l'altitude du pilier  $P_0$ , est de 1 mm par kilomètre [Marti, 2007].



FIG. 2.17 – Mesures sur l'un des points du réseau géodésique du LEP

### 2.3.2.2 La descente de points

Avant de pouvoir mettre en place le réseau géodésique de référence dans le tunnel, il faut y définir, au niveau de chaque puits, des points par rapport aux piliers mesurés en surface. Pour ce faire il faut effectuer les mesures de descentes de points et de déviations de la verticale.

Sur le rebord du puits, à la surface, sont fixées des plaques pouvant supporter des réflecteurs pour les mesures d'angles et de distances (voir la figure 2.18). Les points ainsi matérialisés — les centres de ces réflecteurs — sont d'une part définis par rapport au pilier du réseau géodésique en surface, c'est-à-dire dans le système de coordonnées général au projet. D'autre part, ils sont définis dans un repère local astronomique, ce qui induit une mesure locale de la déviation de la verticale avec une lunette ou une caméra astro-zénithale (voir la figure 2.19).

Différentes méthodes de descente de points, basées sur différents principes physiques, existent : relèvement au théodolite sur des fils à plomb, lancers de billes, triangulations et trilatérations (avec des pentaprismes ou des oculaires coudés), lunettes nadiro-zénithales, etc. [Hugon, 2010]. Chacune de ces méthodes souffre de systématismes spécifiques et difficilement quantifiables (torsions et mémoires de forme des fils à plomb, instabilités atmosphériques et météorologiques dans le puits pour les méthodes optiques, etc.). La solution idéale consiste alors à coupler ces différents types de mesures pour limiter le risque de fautes indétectables, à défaut de supprimer les systématismes.

La précision des descentes de points des puits du LEP, d'une profondeur allant jusqu'à 120 m, a été estimée inférieure à 1 mm en planimétrie et 2 mm

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

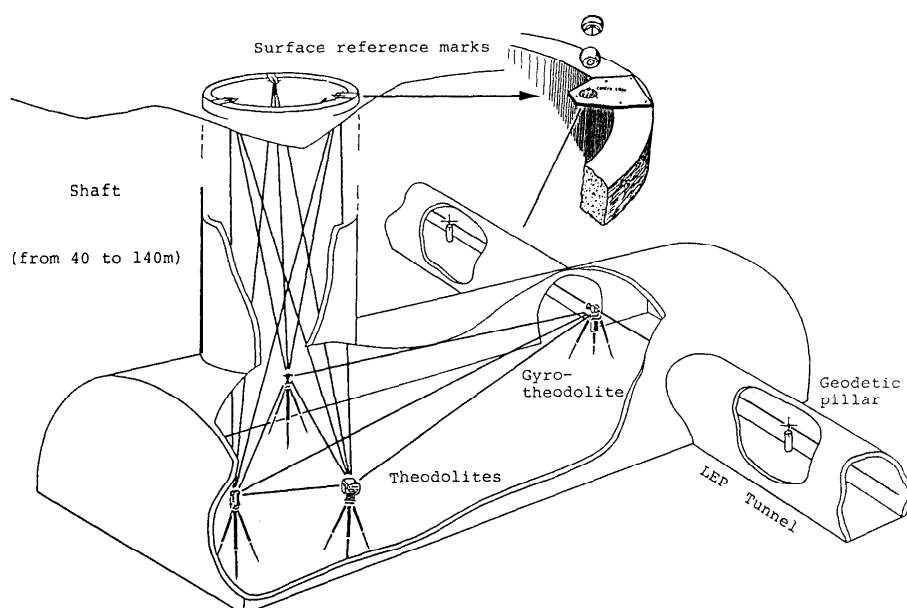


FIG. 2.18 – Principe de la descente de points dans le tunnel. Il s’agit de faire la liaison entre les réseaux géodésiques à la surface et métrologiques dans le tunnel.

en altimétrie [Mayoud, 1989]. Lors du creusement du tunnel ferroviaire du Saint-Gothard en Suisse, une descente de point de 800 m a été réalisée : une incertitude de 6 mm a été obtenue [Ryf *et al.*, 2005].

En 2010, la précision des descentes de points a fait l’objet d’un projet de fin d’études pour un stagiaire ingénieur, M. Pierre Hugon. Dans le puits PM32 du LHC, profond de 65 m, il a atteint des précisions de 0.1 mm, que ce soit par triangulation et trilatération à l’aide d’un tachéomètre ou par relèvement depuis plusieurs fils à plomb [Hugon, 2010]. Cependant, les résultats entre ces méthodes distinctes différaient de 0.5 mm. C’est donc cette valeur qui a été retenue comme incertitude de mesure [Hugon, 2010].

La descente de point se fait dans un repère local astronomique. Mais d’une part, comme les points en surface descendus sont aussi connus dans le système général de coordonnées et, d’autre part, comme la déviation de la verticale au niveau du puits a été déterminée, une simple mesure d’orientation planimétrique au gyro-théodolite suffit pour que les points ainsi construits au fond du tunnel puissent être exprimés dans le système général.

Vraisemblablement, les puits d’accès au tunnel du CLIC seront plus profonds que ceux du LEP, de l’ordre de 150 m (voir la figure 2.20). Compte-tenu des résultats obtenus au CERN et au Saint-Gothard, une précision de 2 mm à l’issue des descentes de points du CLIC semble être une valeur réaliste.

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

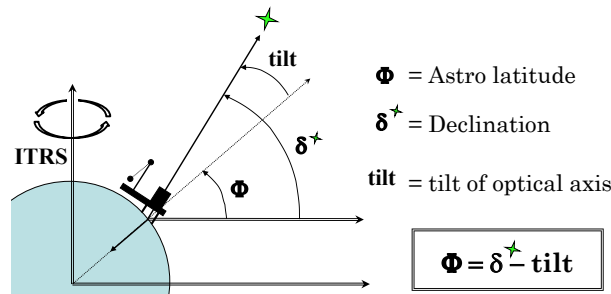


FIG. 2.19 – Détermination astro-zénithale de la déviation de la verticale par la comparaison de la déclinaison connue d’une étoile observée à l’inclinaison mesurée de la caméra. La latitude astronomique obtenue permet de déduire la déviation de la verticale.

### 2.3.2.3 Pré-alignement mécanique

Le réseau géodésique de référence du projet CLIC est similaire aux *geodetic ground point socket* (GGPSO). Ce sont des alésages pour réflecteurs sphériques de diamètre 88.9 mm (voir la figure 2.21), scellés dans le sol du tunnel et protégés par un capot. Ils sont espacés les uns des autres de 25 m. Les précisions recherchées sur les trois coordonnées des points de ce réseau sont de 0.2 mm sur 100 m. En utilisant les méthodes employées pour les alignements des composants du LEP et du LHC, en l’occurrence les mesures angulaires et de distances au tachéomètre, de l’écartométrie à fils et du nivellement de précision, une telle précision peut être atteinte sur les positions transversales et verticales [Mayoud, 1989]. En longitudinal, l’emploi supplémentaire de mesures de distances au *laser tracker* permet de franchir ce seuil [Touzé, 2009].

Ce réseau de points a plusieurs usages. Tout d’abord, les poutres des faisceaux principaux et d’entraînement doivent être mises en place dans le tunnel et pré-alignées mécaniquement. Du fait, d’une part des guides d’ondes qui connectent les cavités accélératrices aux PETS (lire le paragraphe 2.2.3.3), et, d’autre part aux systèmes de repositionnement [Becker *et al.*, 2003], l’implantation des modules doit alors se faire avec une précision de l’ordre de 0.1 mm [Riddone *et al.*, 2008]. De là proviennent les spécifications sur le réseau géodésique de référence.

Plus généralement, avant de mettre en place les ensembles de capteurs servant à gagner un ordre de grandeur sur l’incertitude d’alignement, le réseau géodésique de référence permet de s’assurer que le dixième de millimètre est atteint. Il sert donc de base à l’ensemble des opérations usuelles d’alignement et de contrôle des positions des composants du CLIC.

La dernière fonction du réseau géodésique de référence consiste à pallier les manques des capteurs dans la direction longitudinale qu’ils ne mesurent pas. Cette information est donc fournie par le réseau géodésique de référence.

## 2 Pré-alignement du CLIC

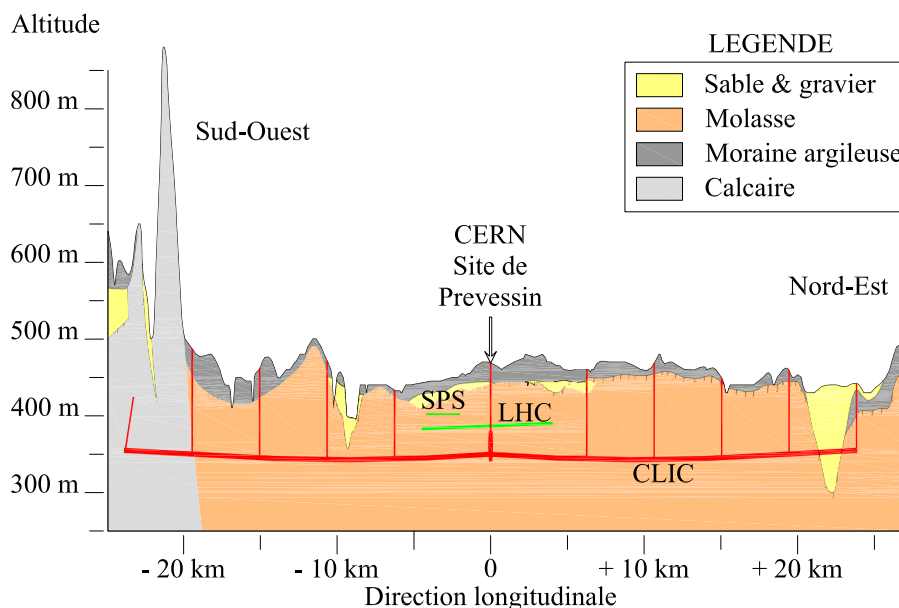


FIG. 2.20 – Profil en long d’un projet d’implantation du CLIC dans la région du CERN. Le point d’interaction se trouverait sous le site actuel de Prévessin en France.

Cet aspect sera plus amplement décrit par la suite (lire le paragraphe 3.4.4.2).

### 2.3.3 Le réseau métrologique de référence

#### 2.3.3.1 Concepts de base

Les poutres supportant les composants du faisceau principal du CLIC doivent être pré-alignées selon une tolérance à trois sigma de  $10\ \mu\text{m}$  le long d’une fenêtre coulissante de 200 m. Une telle spécification interdit tout d’abord de suivre la courbure de la Terre. En effet, l’écart  $\varepsilon$  sur une longueur  $L$  entre une droite et un cercle de rayon  $R$  (voir la figure 2.22) est défini par la formule linéarisée 2.1. En considérant le rayon de la Terre égal à 6400 km, l’écart sur 200 m s’élève à 0.39 mm et est, de ce fait, supérieur de deux ordres de grandeur à la précision recherchée pour le réseau géodésique de référence.

$$2\varepsilon = \frac{L^2}{8R} \quad (2.1)$$

Ce calcul de trigonométrie peut sembler bien trivial. Cependant il s’agit d’une question récurrente dans le développement du CLIC car le fait de suivre la courbure de la Terre — ou plus précisément celle de la surface équipotentielle de pesanteur à l’altitude du projet — simplifierait la tâche au génie civil et aux géomètres. La tolérance de pré-alignement, basée sur



## 2.3 Décomposition du pré-alignement

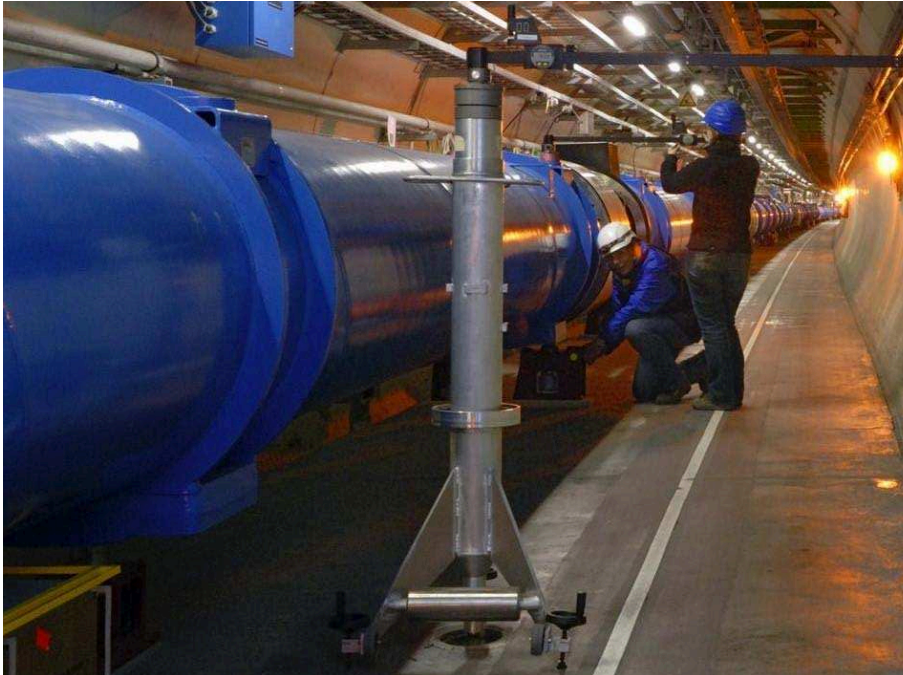


FIG. 2.21 – Alignement d'un cryodipôle du LHC à l'aide d'un écartomètre à fil en station sur un GGPSO

les spécifications de la dynamique du faisceau, l'interdit. En ce qui concerne l'alignement, les conséquences sont l'obligation de définir un système général euclidien de coordonnées et de définir le géoïde à cette précision.

A l'issue du pré-alignement actif, les linacs du CLIC doivent ainsi former des lignes droites à  $10 \mu\text{m}$  sur 200 m. Pour ce faire, il faut disposer d'une référence d'alignement sur toute la longueur du projet CLIC et à partir de laquelle les positions de l'ensemble des composants de cette machine sont définies. Bien évidemment, aucun système d'alignement actuel ne permet de construire une telle référence en une seule étape sur 20 km. Cela pourrait sembler concevable en utilisant un faisceau laser dans le vide de l'espace,

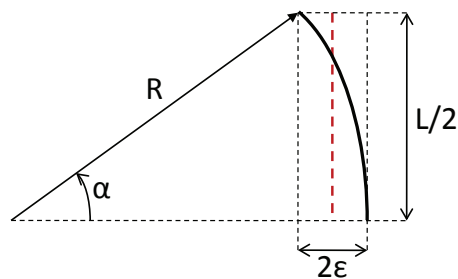


FIG. 2.22 – Ecart d'une droite par rapport à un cercle

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

malheureusement, c'est bien sur Terre que le CLIC serait construit. Comme le montre la figure 2.23, l'idée développée par les géomètres du CERN pour pallier l'absence de système de mesure sur 20 km consiste à construire une ligne droite en propageant, avec recouvrement et redondance, des références d'alignement d'une longueur de l'ordre de 200 m [Becker, 2003].

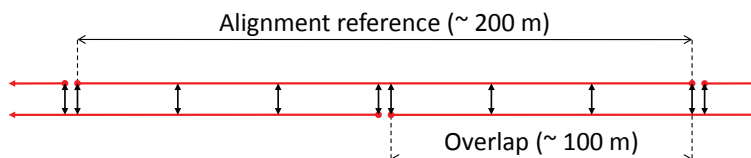


FIG. 2.23 – Principe fondamental du pré-alignement du CLIC : la propagation par recouvrement des références d'alignement.

De cette idée fondamentale découlent plusieurs questions. Quel type de référence d'alignement peut être utilisé ? Comment est définie la longueur de 200 m de ces références élémentaires ? Comment s'effectue le recouvrement, autrement dit comment se propage la géométrie d'une référence à l'autre ? Comment utiliser ces références pour aligner les composants du CLIC ?

En replaçant les travaux de cette thèse dans le contexte des études sur le pré-alignement actif du CLIC par les géomètres du CERN, ils font suite à ceux du doctorat de M. Freddy Becker [Becker, 2003] qui propose, entre autre, une solution en réponse au type de référence à utiliser et donne les directions à suivre pour répondre aux autres questions. Les travaux présentés dans ce document vont dans ce sens, celui de démontrer de manière exhaustive l'ensemble des concepts métrologiques contenus dans la figure 2.23 afin de mettre en évidence la faisabilité du pré-alignement du CLIC.

### 2.3.3.2 Les fils tendus

L'une des particularités de l'instrumentation utilisée par les géomètres du CERN est l'importance des systèmes à fils tendus [Quesnel *et al.*, 2008]. En dehors des « distinvar », qui permettaient d'obtenir des distances spatiales entre deux points en tendant un fil d'invar calibré, il s'agit exclusivement de systèmes de mesures par écartométrie. Le principe est simple. Un fil est tendu entre deux points. Il forme, horizontalement, une ligne droite. En un point, la distance horizontale à cette ligne droite est mesurée à l'aide d'une règle (voir la figure 2.21).

L'intérêt initial de cette méthode tend à disparaître des mémoires. Il s'agissait de la simplicité des calculs dans le cadre de l'alignement. En effet, l'application du théorème de Thalès suffit à aligner plusieurs composant les uns par rapport aux autres avec un seul fil (voir la figure 2.24). A l'époque où les outils informatiques balbutiaient, c'était un avantage majeur comparé aux calculs inhérents aux méthodes trigonométriques. Désormais cet argument

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

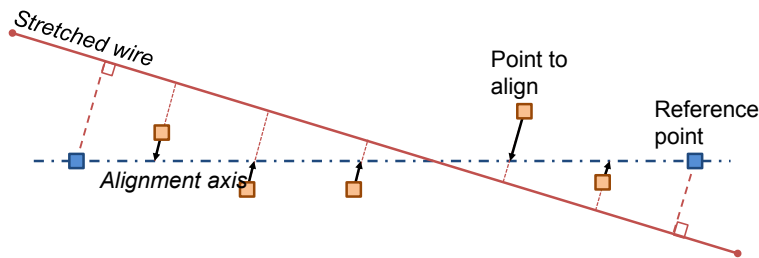


FIG. 2.24 – Principe de la mesure par écartométrie

est bien désuet. Cependant les fils disposaient d'autres atouts.

La difficulté principale des réseaux métrologiques en couloir est de limiter les déviations transversales. Or cette méthode est extrêmement efficace dans cette direction et sur de longues distances. De plus elle est peu coûteuse et repose sur un principe physique simple. En utilisant des règles optiques de  $50\ \mu\text{m}$  de résolution et des fils de pêche en nylon de 92 m, l'écart-type des 1 286 résidus transversaux de l'alignement d'un secteur du SPS — 1.1 km — a atteint  $86\ \mu\text{m}$  [Quesnel *et al.*, 2008].

Lorsqu'il a fallu réfléchir aux systèmes de mesures pouvant être appliqués au pré-alignement du CLIC, c'est tout naturellement que les fils tendus se sont imposés aux géomètres du CERN. Cependant les capacités en terme de précision n'étaient pas suffisantes. Ils ont eu l'idée de concevoir un capteur capacitif mesurant la distance jusqu'au centre du fil selon deux axes, en transversal et en vertical. La mise au point du capteur et du système de mesure capteur plus fil tendu a été l'objet de la première thèse sur l'alignement du CLIC [Mainaud, 1996]. La production a été confiée à la firme FOGALE NANOTECH. Le *wire positioning system* (WPS) était né (voir la figure 2.25).

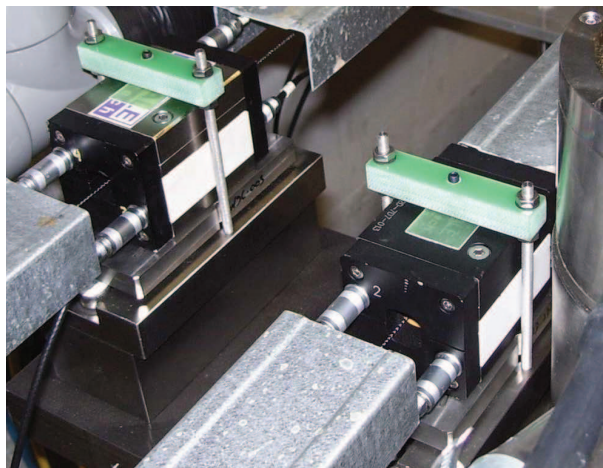


FIG. 2.25 – Deux générations de capteurs WPS



## 2 Pré-alignement du CLIC

Si des capteurs permettant de mesurer la position d'un point d'un fil sont désormais disponibles, pour effectuer un alignement, encore faut-il être en mesure de modéliser le fil lui-même. Si dans un plan horizontal, celui-ci forme une ligne droite, ce n'est pas le cas dans un plan vertical. Pour ce faire il faut avoir recours à la modélisation de la chaînette qui définit la position verticale  $y$  d'un point du fil par rapport à son point bas en fonction de son abscisse  $z$ , sa tension  $T$ , sa masse linéaire  $q$  et l'accélération de la pesanteur  $g$ <sup>5</sup> (voir l'équation 2.2) [Timoshenko et Young, 1937].

$$y = \frac{T}{gq} \left( \cosh \frac{gqz}{T} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Ce modèle nécessite une très bonne détermination de la tension du fil et de la masse linéaire, ce qui n'est pas chose aisée lorsqu'il s'agit d'atteindre des précisions micrométriques avec des fils de plus de 100 m. Dans le cas du CERN, pour lequel l'ordre de grandeur de la tension est de 150 N et celui de la masse linéaire de  $2.35 \cdot 10^{-4}$  kg/m, la chaînette peut être approchée par son développement limité de deuxième ordre [Mainaud, 1996], l'erreur étant inférieure au micromètre pour des fils de longueur inférieure à 560 m (lire le paragraphe 3.4.2.1).

$$f = \frac{gql^2}{8T} \quad (2.3)$$

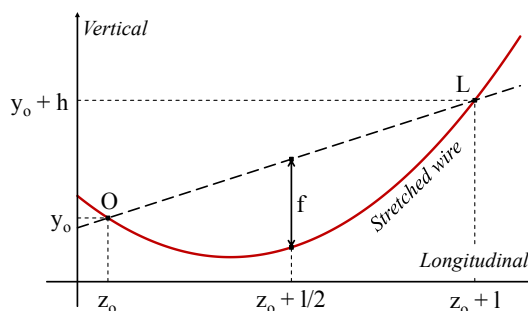


FIG. 2.26 – Modélisation verticale d'un fil tendu

De plus il est possible de s'affranchir de la connaissance de la tension et de la masse linéaire au profit de celle de la longueur du fil et de sa flèche [Mainaud, 1996] (voir l'équation 2.3). En effectuant un changement de repère, le fil peut être modélisé en connaissant un point origine, la longueur, la flèche et la dénivelée du fil (voir la figure 2.26 et l'équation 2.4).

$$y = \frac{4f}{l^2} (z - z_0)^2 + \frac{(h - 4f)}{l} (z - z_0) + y_0 \quad (2.4)$$

<sup>5</sup>Les unités sont exprimées dans le Système International.

---

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

Par l'étude des dérivées partielles de l'équation 2.4, s'il est possible de déterminer la longueur du fil et les abscisses à une incertitude de 0.2 mm, ainsi que la hauteur initiale  $y_0$ , la flèche  $f$  et la dénivelée  $h$  à une précision micrométrique, alors la précision sur la modélisation du fil sera du même ordre de grandeur [Touzé, 2010a].

### 2.3.3.3 Modélisation et propagation des fils

La référence d'alignement devant être propagée tout le long du CLIC est ainsi définie. Il s'agit de fils tendus mesurés par des capteurs WPS. En horizontal, le fil tendu est considéré comme une ligne droite. En vertical, le modèle considéré est l'approximation au second ordre de la chaînette (voir la figure 2.26 et l'équation 2.4). Pour corriger l'écart vertical du fil par rapport à la ligne droite, l'idée développée dans les travaux précédant ce mémoire consistait à mesurer les dénivelées entre les différents capteurs WPS à l'aide de systèmes de mesures par nivellement hydrostatique [Becker, 2003].

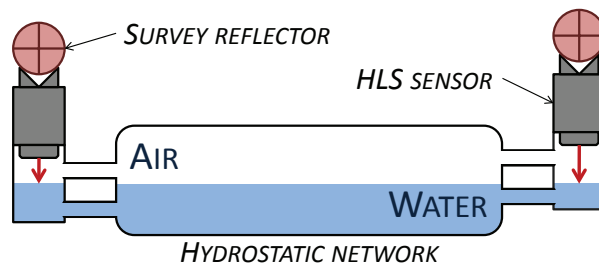


FIG. 2.27 – Principe du nivellement hydrostatique

Les capteurs *hydrostatic levelling system* (HLS) utilisés au CERN sont eux aussi fournis par FOGALE NANOTECH. Fonctionnant selon un principe capacitif, ils fournissent la distance entre une référence interne et la surface d'eau (voir la figure 2.27). Lorsque plusieurs capteurs sont connectés à un même réseau hydrostatique, selon le principe des vases communicants, les dénivelées entre chacun d'entre eux peuvent être déduites [Becker, 2003]. Ainsi, en plaçant un capteur HLS auprès de chaque WPS — pour autant que la géométrie du premier vers le second soit parfaitement connue — il est possible de compenser la flèche du fil à l'aide des dénivelées hydrostatiques.

Ce lien entre capteurs HLS et WPS nécessite un seul et même support supposé indéformable et dont la géométrie est connue aussi précisément que possible. En ajoutant sur ce support un autre capteur WPS correspondant à un autre fil tendu, ainsi que des inclinomètres, il devient possible de définir la position d'un fil par rapport à l'autre. C'est ainsi que fonctionne le *metrological reference network* (MRN), constitué de plaques métrologiques qui sont calibrées en laboratoire et supportent les capteurs (voir la figure 2.28).

Dans la thèse de Freddy Becker [Becker, 2003], le lien géométrique d'un fil

## 2 Pré-alignement du CLIC

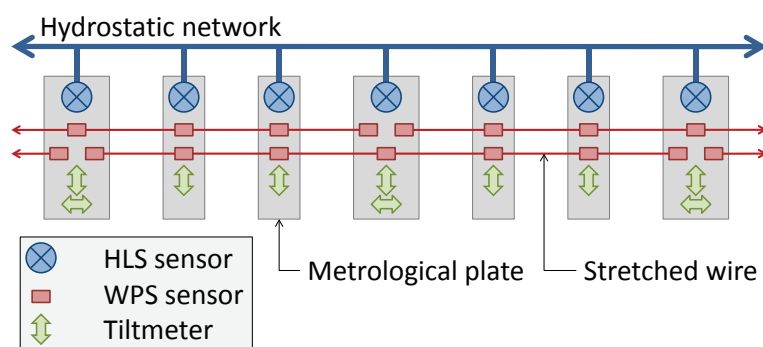


FIG. 2.28 – Le réseau métrologique de référence

à l'autre et même d'un HLS vers le WPS qu'il est sensé définir verticalement reposait sur les tolérances d'orientation des capteurs et celles de l'usinage des plaques métrologiques. Aucun enjeu métrologique n'est mis en évidence. Il s'agissait dans son cas de mettre en évidence la capacité de ces systèmes à aligner selon une incertitude de mesures micrométrique. La définition de la géométrie des plaques métrologiques et des capteurs a représenté la majeure partie des travaux de cette présente thèse. Elle sera décrite dans le chapitre suivant.

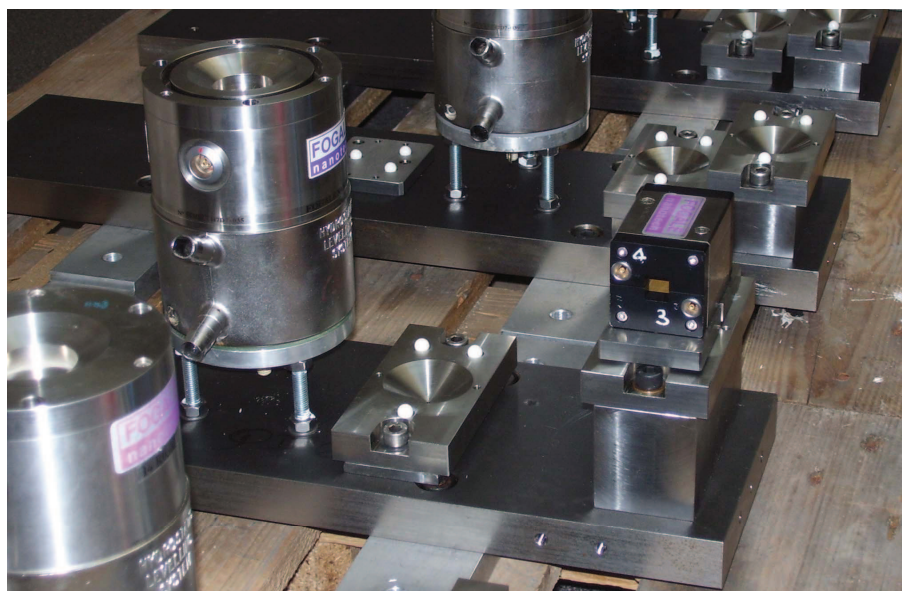


FIG. 2.29 – Plaques métrologiques calibrées en invar

Brièvement, l'idée développée au cours de ce doctorat est la suivante. Pour pouvoir se baser sur les fils tendus pour aligner les composants du CLIC, il faut les définir dans un même système de coordonnées, ce qui re-

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

vient à exprimer les lectures des capteurs WPS dans un repère général. Cela se fait au travers de la calibration systématique du zéro des WPS et des HLS et de la mesure des plaques métrologiques en laboratoire à l'aide d'une *coordinate measuring machine* (CMM). Ainsi les lectures des capteurs WPS et HLS sont définies dans le repère des plaques. Il reste à déterminer les six degrés de liberté de cette dernière dans le repère général. La translation longitudinale et le lacet (ainsi que le tangage quand les capteurs appartiennent tous au même plan transversal, lire le paragraphe 3.4.4.2) n'étant pas critiques, les valeurs obtenues en s'appuyant sur le réseau géodésique de référence (lire le paragraphe 2.3.2.3) suffisent. Les autres rotations et translations sont fournies par la compensation des réseaux hydrostatiques, des fils tendus et des lectures des inclinomètres.

### 2.3.4 Pré-alignement des composants du CLIC

#### 2.3.4.1 Le réseau de pré-alignement des supports

Le *support pre-alignment network* (SPN) permet de définir, dans un système général de coordonnées, les références, en l'occurrence les fils tendus, à partir desquelles les composants du CLIC sont pré-alignés. Du fait de leur petite taille et de leur grand nombre, ces composants sont regroupés, pour le faisceau principal et celui d'entraînement, sur des poutres de 2.01 m (voir la figure 2.9). Comme les contraintes de stabilisation des quadrupôles du faisceau principal sont plus importantes que pour les autres composants, ils disposent de leurs propres supports indépendants à cinq degrés de liberté (la translation longitudinale est fixée).

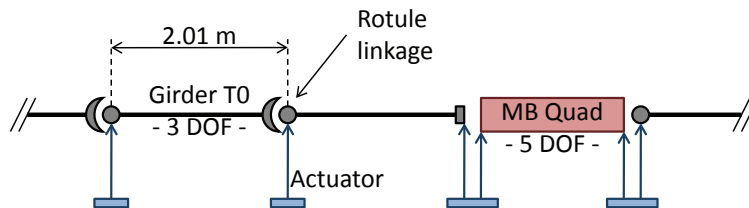


FIG. 2.30 – Schéma de la cinématique des poutres et quadrupôles

Pour limiter le nombre de systèmes de repositionnement, les poutres sont liées les unes aux autres par une rotule. Ainsi, chacune d'entre elles n'a plus que trois degrés de liberté par rapport à celle qui la précède (voir le schéma en figure 2.30). De ce fait seuls trois moteurs sont nécessaires au repositionnement d'une poutre par rapport à sa voisine. De la même façon, le nombre de capteurs nécessaires à la définition de la position et de l'orientation de la poutre est réduit. Enfin, ce concept engendre un lissage naturel des poutres, tel un serpent qui se meut.

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

Le rôle du réseau de pré-alignement des supports est de mesurer les positions et orientations des quadrupôles du faisceau principal et des poutres par rapport aux références d'alignement du réseau métrologique de référence. Le fait de définir un autre réseau s'explique par des raisons d'optimisation. En effet, le système le plus à même aujourd'hui de servir de référence d'alignement est le fil tendu mesuré par des capteurs WPS de Fogale Nanotech. Or ces derniers sont onéreux. Malgré le gain obtenu par le point d'articulation entre poutres qui divise le nombre de capteurs requis, le nombre de WPS nécessaires au pré-alignement des poutres s'élève à plus de 40 000 unités.

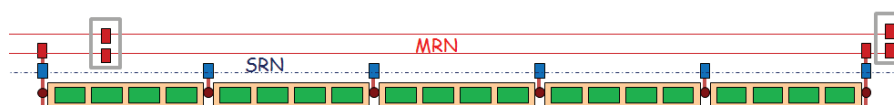


FIG. 2.31 – Le SPN : le réseau de pré-alignement des supports

Le réseau de pré-alignement des supports est une des solutions au problème de coût des systèmes de mesures WPS. L'idée envisagée est de créer un réseau secondaire, composé d'autres systèmes de mesures, et qui se rattache au réseau métrologique de référence tous les  $n$  modules (voir le figure 2.31). Les capteurs candidats aux mesures de ce réseau secondaire sont des systèmes optiques très précis sur de courtes distances, en l'occurrence les *red alignment system from NIKHEF* (RASNIK) produits par *nationaal instituut voor subatomaire fysica* (NIKHEF) [Dekker *et al.*, 1993].

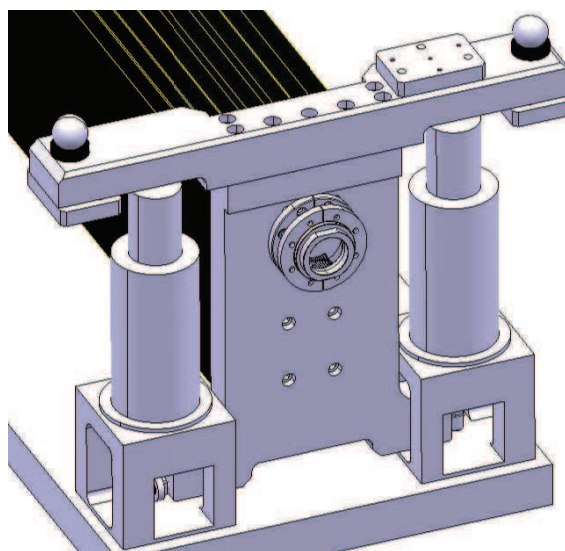


FIG. 2.32 – Conception d'un berceau pour les poutres du CLIC

En ce qui concerne les supports de ces capteurs, ceux-ci sont solidaires de la poutre qu'ils doivent pré-aligner et ce, par l'intermédiaire d'un berceau

---

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

auquel ils sont fixés. Ce même berceau supporte le système d'articulation d'une poutre à l'autre ainsi que les fixations nécessaires au repositionnement [Mainaud-Durand *et al.*, 2010] (voir la figure 2.32).

### 2.3.4.2 La fiducialisation

Dans le cas du CLIC comme dans celui de n'importe quel accélérateur de particules, les objets qui doivent être alignés sont des aimants, des cavités accélératrices ou de l'instrumentation. Mais plus précisément, ce sont les axes de ces composants qui doivent être alignés. Or comment positionner un quadrupôle dont l'axe magnétique n'est pas mesurable par l'instrumentation usuelle de topométrie de précision ? La fiducialisation est donc l'opération qui consiste à définir l'axe mécanique, électrique ou magnétique du composant qui doit être aligné dans son propre repère « objet ». Le repère est alors matérialisé par des fiducielles qui sont des points accessibles et mesurables lorsque le composant est en place.

La fiducialisation est un terme qui appartient au vocabulaire de l'alignement des accélérateurs. Il est issu du nom commun latin *fiducia* qui signifie la confiance. En alignement, le sens de ce terme est le même qu'en horlogerie, pour lequel l'adjectif fiduciel définit ce qui sert à guider. Du point de vue de l'étymologie, ce terme est extrêmement pertinent. Lorsque les composants sont interconnectés, la seule connaissance disponible de la géométrie interne provient des fiducielles, qui servent effectivement de guide. De plus, quelle que soit la configuration du réseau métrologique, la robustesse de tout l'alignement de l'accélérateur dépendra toujours et avant tout de la confiance qui peut être attribuée à la fiducialisation.

Même si le principe de cette étape de l'alignement ne change pas, la fiducialisation des composants du CLIC est plus complexe que celle des autres accélérateurs du CERN. En effet, du PS au LHC, les objets à aligner — et de ce fait à fiducialiser — correspondaient à des entités élémentaires indépendantes (dipôle, quadrupôle, cavité accélératrice, collimateur<sup>6</sup>, etc.). La fiducialisation se limitait donc strictement à la définition de l'axe du faisceau et des fiducielles dans le repère « objet » du composant [Griffet, 2010b] (voir la figure 2.33).

Qu'il s'agisse du faisceau principal ou du faisceau d'entraînement du CLIC, les objets à aligner sont systématiquement des assemblages de plusieurs entités :

- Une poutre du faisceau d'entraînement supporte des PETS, deux quadrupôles associés chacun à un *beam position monitor* (BPM),
- Une poutre du faisceau principal supporte des cavités accélératrices,

---

<sup>6</sup>L'optique de correction de faisceau (quadrupôle, sextupôle, etc.) ne permet pas de donner les propriétés souhaitées à toutes les particules du paquet. Le rôle du collimateur est d'éliminer ces particules irrécupérables et perturbatrices en rabotant le faisceau.





FIG. 2.33 – Fiducialisation d'un cryodipôle du LHC au *laser tracker*

- Les quadrupôles du faisceau principal, indépendants des poutres, sont tous associés à un BPM [Riddone *et al.*, 2008].

Ainsi, la fiducialisation de ces structures ne se limite pas à définir un axe moyen de chaque poutre ou de chaque ensemble quadrupôle - BPM, il s'agit aussi, d'une part de contrôler la qualité des assemblages et, d'autre part, de définir les zéros de chaque entité par rapport au repère de l'ensemble [Griffet, 2010a]. Ce dernier aspect est particulièrement important pour la définition de l'axe magnétique du quadrupôle du faisceau principal par rapport au zéro de son BPM associé. En effet, l'alignement final du CLIC, qui sera réalisé en se référant au faisceau lui-même, dépend en grande partie de la définition de l'axe magnétique des quadrupôles par rapport aux BPM qui leur sont attachés [Pfungstner *et al.*, 2010].

### 2.3.4.3 Degrés de liberté et repositionnement

L'enchaînement des précédentes étapes avait pour but de connaître les positions des axes du faisceau de chaque assemblage de composants du CLIC dans un même système de coordonnées selon une incertitude conforme aux spécifications. Cependant, la mission du pré-alignement actif n'en est pas pour autant remplie, encore faut-il repositionner ces ensembles de manière à

## 2.3 Décomposition du pré-alignement

---

obtenir une orbite<sup>7</sup> suffisamment lisse pour qu'elle soit assimilable, à 10  $\mu\text{m}$  sur 200 m, à une ligne droite (voir la figure 2.15). Deux questions se posent alors, en l'occurrence comment est définie la courbe suffisamment lisse selon laquelle les composants vont être pré-alignés et, comment calculer, à partir de l'information de position, les déplacements devant être effectués par les moteurs ?

A l'issue de la phase des mesures du pré-alignement,  $n$  points, appartenant aux axes du faisceau des différents composants, sont connus dans un même système euclidien de coordonnées. Soit  $z_i$  la position longitudinale d'un de ces  $n$  points. Les coordonnées transversales et verticales mesurées de chacun d'entre eux sont respectivement  $x_i$  et  $y_i$ . Il s'agit de déterminer leurs positions théoriques transversales et verticales  $x_{th}(z_i)$  et  $y_{th}(z_i)$  en fonction de leurs positions longitudinales  $z_i$ .

Le premier critère de repositionnement consiste à minimiser l'ensemble des déplacements nécessaires. La solution la plus simple, du point de vue des mathématiques, serait de chercher les fonctions  $x_{th}$  et  $y_{th}$  qui minimisent les sommes  $p_t$  et  $p_v$  des carrés des déplacements transversaux et verticaux à effectuer (voir l'équation 2.5).

$$\left\{ \begin{array}{l} p_t = \min \left( \sum_{i=1}^n (x_i - x_{th}(z_i))^2 \right) \\ p_v = \min \left( \sum_{i=1}^n (y_i - y_{th}(z_i))^2 \right) \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Le second critère définissant les fonctions  $x_{th}$  et  $y_{th}$  est lié aux spécifications du pré-alignement. Ces fonctions doivent être assimilables sur 200 m à une ligne droite à 10  $\mu\text{m}$  près. Ceci peut être traduit par une condition sur les accroissements des fonctions  $x_{th}$  et  $y_{th}$ , autrement dit par une condition sur leurs fonctions dérivées respectives (voir la figure 2.34 et l'équation 2.6).

Soit  $M_i$ , le  $i^{\text{ème}}$  des  $n$  points de l'orbite du faisceau du CLIC de position longitudinale  $z_i$ . Quel que soit le point  $M$  de position longitudinale  $z$  à moins de 100 m de  $M_i$ , sa position transversale doit être à moins de 10  $\mu\text{m}$  de la tangente à l'orbite en  $M_i$ . Il en est de même en vertical, c'est-à-dire :

$$\forall i \in \{1..n\} \quad \forall z \in [z_i - 100 \text{ m}, z_i + 100 \text{ m}] \quad \left\{ \begin{array}{l} \left| x_{th}(z) - x_{th}(z_i) - \frac{dx_{th}(z_i)}{dz} \cdot (z - z_i) \right| \leq 10 \mu\text{m} \\ \left| y_{th}(z) - y_{th}(z_i) - \frac{dy_{th}(z_i)}{dz} \cdot (z - z_i) \right| \leq 10 \mu\text{m} \end{array} \right. \quad (2.6)$$

---

<sup>7</sup>L'orbite était, à l'origine, le cercle décrit par le faisceau dans un accélérateur circulaire. Elle correspond désormais plus généralement à la trajectoire du faisceau, quelle que soit la configuration de la machine.



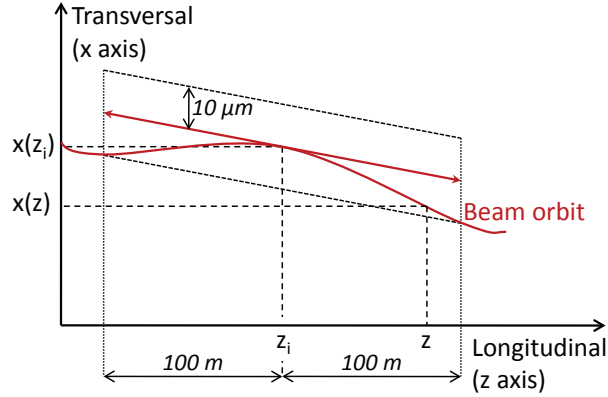


FIG. 2.34 – Lissage de l'orbite du faisceau

L'équation 2.6 correspond à la définition générale du lissage de l'orbite d'un faisceau de particules. La forme de cet orbite dépend du type de fonction choisi pour exprimer  $x_{th}$  et  $y_{th}$ . C'est vraisemblablement aux physiciens de la dynamique du faisceau qu'incombe le choix de ces deux fonctions. En supposant qu'elles soient fournies, les positions théoriques peuvent être considérées comme définies. De ce fait, le vecteur  $\Delta M_i$  des déplacements à appliquer peut être aisément calculé.

$$\Delta M_i = \begin{bmatrix} x_{th}(z_i) \\ y_{th}(z_i) \\ z_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Ce vecteur n'est pas directement exploitable par les moteurs en vue de repositionner le composant. Il faut alors poser le problème en termes de degrés de liberté. Un composant à aligner est composé d'un point d'entrée et d'un point de sortie du faisceau. Les deux vecteurs  $\Delta M$  associés à ces points permettent de déduire, à partir de sa position et de son orientation initiales, celles qu'il doit avoir pour être aligné. Soit  $\Delta P$ , le vecteur contenant le changement d'orientation devant être appliqué au composant à aligner. Si ce composant est une poutre, il a trois degrés de liberté (trois rotations). Le vecteur  $\Delta P$  contient alors trois composantes. S'il s'agit d'un quadrupôle à cinq degrés de liberté (deux translations et trois rotations), alors ce vecteur a cinq composantes.

Pour le repositionnement d'un composant, il doit y avoir autant de moteurs que de degrés de liberté. Soit  $m$  le nombre de degrés de liberté d'un composant à aligner. Il existe une fonction  $F$  qui associe, aux informations des moteurs (par exemple leur nombre de pas), une valeur de l'orientation du composant. Cette fonction  $F$  est le plus souvent inconnue. Cependant, l'étude cinématique du système permet de connaître la valeur de la jacobienne de

---

## 2.4 La chaîne métrologique du MRN

F. La variation d'orientation étant égale au produit de la jacobienne et des déplacements des moteurs  $\Delta M$ .

$$\Delta P = J_F \times \Delta M \quad (2.8)$$

Les nombres de dimensions des vecteurs  $\Delta M$  et  $\Delta P$  étant égaux aux degrés de liberté du système, la matrice jacobienne  $J_F$  est carrée. Si elle est inversible, alors les déplacements moteurs à effectuer se déduisent selon l'équation 2.9. Par définition de la matrice jacobienne, cette formule provient d'une linéarisation au premier ordre. De ce fait, ce calcul de repositionnement sera itératif.

$$\Delta M = J_F^{-1} \times \Delta P \quad (2.9)$$

### 2.3.5 Conclusion

Obtenir une incertitude de mesure sur 200 m de  $3.3 \mu\text{m}$  ne peut se faire en une seule étape. C'est pourquoi le pré-alignement du CLIC se décompose en plusieurs réseaux qui permettent de passer d'un ordre de grandeur de précision à l'autre : le réseau géodésique en surface au millimètre, le réseau géodésique de référence à 0.1 mm, le réseau métrologique de référence à  $3.3 \mu\text{m}$ .

De plus, les méthodes de mesures doivent être compatibles avec ce qu'il y a en aval du pré-alignement. En effet, il s'agit, d'une part de repositionner la machine et, d'autre part d'effectuer l'alignement final par rapport au faisceau de particule lui-même. Comme le précédent paragraphe l'a démontré, l'organisation du pré-alignement s'insère dans cette problématique plus générale.

Le lien entre les résultats des mesures et leur application par les moteurs a été présenté. Enfin, le fait de mesurer l'ensemble des zéros des composants assemblés dans ce qui constitue le module du CLIC rend certes la fiduciaisation plus complexe, mais cela se fait au profit de l'alignement par rapport au faisceau qui découle alors naturellement du pré-alignement.

La stratégie globale du pré-alignement actif a été présentée ainsi que les instrumentations liées aux différentes étapes qui la composent. Ce résumé va désormais servir de base pour exposer les travaux de cette thèse.

## 2.4 La chaîne métrologique du MRN

### 2.4.1 Introduction

Les recherches sur lesquelles s'appuie cette thèse avaient mis en avant le principe général à appliquer en vue du pré-alignement [Becker, 2003]. Les

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

principales bases de l'instrumentation à utiliser avaient déjà été posées dans un précédent doctorat [Mainaud, 1996]. Les fils tendus avec recouvrement avaient déjà été mis à l'épreuve pour l'alignement relatif du *CLIC test facility 2* (CTF2) à une précision de l'ordre du micromètre [Becker *et al.*, 2003]. Cependant de nombreuses questions restant en suspend nécessitaient de plus amples investigations, notamment en ce qui concerne le recouvrement.

Pour pouvoir passer d'une référence d'alignement à l'autre, d'un fil tendu à son voisin, il faut être en mesure de comparer les lectures des capteurs associés dans un même système de coordonnées. Dans ce cadre, les mesures relatives ne suffisent plus. Il faut s'assurer de la justesse des systèmes de mesure employés. Pour ce faire, il a fallu travailler sur tous les fronts : l'optimisation du centrage des capteurs, leurs calibrations absolues ainsi que la modélisation des références d'alignement.

Dans cette partie, il s'agit de présenter la manière dont le problème a été posé. Le choix a été fait de s'atteler au recouvrement des fils en tant que problème de systèmes de coordonnées et de similitudes 3D entre chacun d'entre eux.

### 2.4.2 Choix des axes de recherche

#### 2.4.2.1 Point de départ des recherches

La clef de voûte du pré-alignement actif du CLIC se situe au niveau du recouvrement des références d'alignement qui constituent le réseau métrologique de référence. A proprement parler, le recouvrement est un enjeu majeur du pré-alignement au sens où s'il n'est pas faisable, le pré-alignement ne peut atteindre les spécifications.

Du point de vue des accroissements de l'émittance du faisceau de particules, les erreurs d'alignements peuvent être dissociées en fonction de leur longueur d'onde [Schulte, 2009b]. Sur les courtes distances, de l'ordre du mètre, les accroissements d'émittance sont dus essentiellement à l'incertitude du réseau de pré-alignement des supports et à celle de la fiducialisation [Schulte, 2009b]. Or ces accroissements peuvent être traités indépendamment, module par module, pour peu que le caractère linéaire du linac du CLIC soit suffisamment bon [Schulte, 2009b], autrement dit si le réseau métrologique de référence est suffisamment précis pour définir une ligne droite à 10  $\mu\text{m}$  sur 200 m.

Or plusieurs questions relatives au fonctionnement du réseau métrologique de référence restaient en suspend à l'issue des recherches antérieures à cette thèse (lire le paragraphe 2.3.3). Ce réseau est composé de fils tendus, modélisés en vertical par des réseaux hydrostatiques, qui se succèdent les uns aux autres avec recouvrement et redondance. Dans ce cadre, comment associer les lectures d'un capteur WPS mesurant un point d'un fil à celles du capteur voisin qui mesure un autre fil ? Comment utiliser les informations

---

## 2.4 La chaîne métrologique du MRN

des réseaux hydrostatiques, mesurés par des capteurs HLS, pour modéliser les flèches et les dénivelées des fils tendus ?

L'un des premiers apports des recherches de ce doctorat a été d'approfondir le concept de plaque métrologique, c'est-à-dire un objet supposé indéformable sur lequel sont fixés deux capteurs WPS et un pot HLS (voir la figure 2.28). Si la métrologie de cet objet est parfaitement connue (soit par des tolérances d'usinage extrêmement fines ou par des mesures précises), alors il est possible d'associer les lectures des WPS et du HLS fixés sur cet objet si et seulement si les mesures de chacun de ces capteurs sont définies par rapport à leur fixation.

### 2.4.2.2 Analyse de la chaîne métrologique

Qu'il s'agisse d'un inclinomètre, du WPS ou d'un HLS, chacun de ces types de capteurs mesure un angle ou une distance par rapport à un référentiel qui lui est propre. Ce référentiel est défini par le constructeur du capteur par rapport à des références externes. L'incertitude de la définition de ce référentiel correspond alors à la précision dite « absolue » du capteur, c'est-à-dire à sa justesse [JCGM, 2008c].

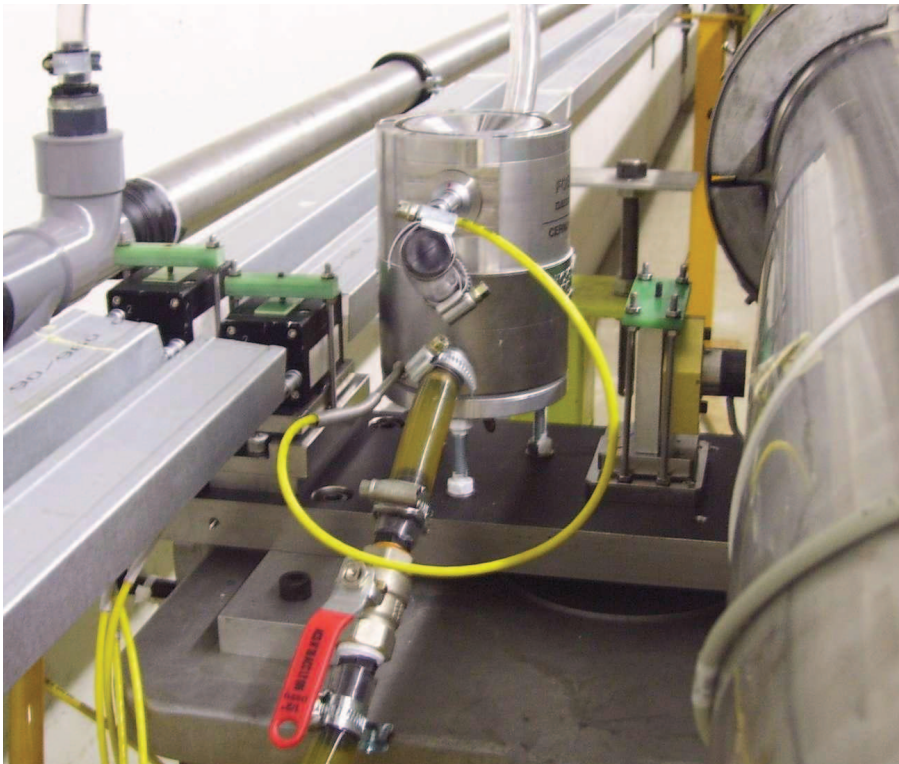


FIG. 2.35 – Vue d'une plaque métrologique au TT1

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

Par la suite, le capteur est fixé à un support qui, lui-même, est solidaire d'une plaque métrologique. Si la plaque en question comporte des alésages pour deux WPS, un HLS et un inclinomètre, chaque support de capteur doit être défini au mieux par rapport à ses voisins pour être en mesure, d'une part de se servir des dénivelées HLS pour compenser les flèches et les dénivelées des fils associés aux deux WPS, et d'autre part d'assurer la propagation des fils. Il est alors plus aisé de définir chaque support par rapport à la plaque métrologique. Cela permet de s'affranchir des permutations sans répétitions d'un support à l'autre.

De ce fait, la chaîne métrologique permettant d'effectuer le passage d'un fil à l'autre, au niveau des capteurs WPS d'une même plaque, est similaire aux liaisons mécaniques (voir la figure 2.35) :

- Il faut définir chaque support de capteur par rapport à la plaque sur laquelle il est fixé.
- Il est nécessaire d'exprimer les lectures des capteurs par rapport à leurs supports associés, ce qui revient à estimer la justesse de ces différents systèmes de mesures par rapport à leurs alésages.

### 2.4.2.3 Définition des axes de recherches

Avant de réfléchir aux méthodes métrologiques permettant de définir les supports des capteurs sur les plaques métrologiques, il fallait s'atteler à la justesse de ces derniers. Était-elle suffisante ? La résolution des capteurs WPS et HLS est donnée à  $0.2 \mu\text{m}$  tandis que leur précision est de  $1 \mu\text{m}$  [Herty, 2009]. La justesse, quant à elle, est de  $50 \mu\text{m}$ . Elle correspond à une tolérance d'assemblage des composants de ces capteurs [Herty, 2009].

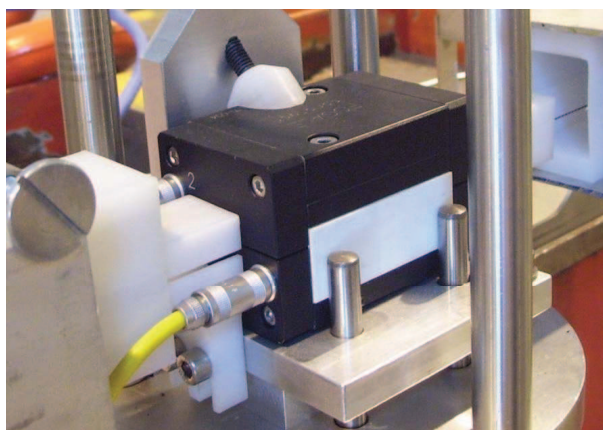


FIG. 2.36 – Surface de référence d'un capteur WPS

Le centre du capteur WPS est défini à  $23.5 \text{ mm}$  de deux surfaces de céramique orthogonales [Herty, 2009] (voir la figure 2.36). Les alésages de capteurs utilisés jusqu'alors au CERN consistait à mettre en contact ces

---

## 2.4 La chaîne métrologique du MRN

surfaces de céramiques contre des goupilles. Si la justesse est nettement en dehors des spécifications du CLIC, la répétabilité de la mise en place des capteurs n'était pas non plus satisfaisante, du fait que le serrage, s'il se veut optimal, doit appliquer la même force aux deux surfaces de céramique.

Le premier axe de recherche a naturellement consisté au développement d'un système de centrage des WPS de manière à obtenir une justesse de  $5\ \mu\text{m}$ . Dans ce cadre, pour optimiser les liaisons entre les capteurs d'une même plaque, il fallait que ces systèmes de centrage soient mesurables de la manière la plus simple, la plus répétable et la plus pérenne possible. La solution proposée consiste à définir les centres de sphères de précision à l'aide d'une CMM en laboratoire de métrologie.

Le second axe de recherche concerne les méthodes de calcul permettant de traiter rigoureusement les données en provenance de la métrologie et des capteurs. La réflexion sur la chaîne métrologique, du capteur à la plaque, met en évidence des incertitudes qui interviennent au sein du capteur lui-même, du capteur à son support, et enfin du support à la plaque métrologique. Chacun de ces objets dispose d'une orientation spécifique qui doit être définie. La méthode adoptée consiste alors à définir des repères orthonormés pour chaque capteur, pour chaque système de centrage et chaque plaque, puis de calculer les transformations entre tous ces objets sous la forme de matrices de translations et de rotations.

Le dernier axe de recherche traite de la modélisation des références d'alignement, à savoir les inclinomètres, les fils tendus et les réseaux hydrostatiques. En effet, la dernière transformation, pour aller du repère des plaques métrologiques au repère général, se fait en compensant les points issus des mesures WPS et HLS, qui appartiennent par définition à des fils tendus ou des surfaces d'eau, et les mesures inclinométriques qui fournissent le roulis de la plaque.

### 2.4.3 Enchaînement des systèmes de coordonnées

#### 2.4.3.1 Repères orthonormés des capteurs

La majorité des capteurs fournissant des positions ou des angles sont conçus pour effectuer de la surveillance d'ouvrage. Il s'agit, la plupart du temps, de suivre des déplacements. Le problème est bien plus complexe lorsqu'il s'agit d'obtenir une position et une orientation d'un objet. Cet aspect est d'autant plus délicat lorsque la précision recherchée est de l'ordre du micromètre ou du microradian. Il est alors nécessaire de prendre en considération les dérives des électroniques associées aux capteurs qui biaisent les mesures et qui, dans le cas des capteurs fournis par FOGALE NANOTECH, est de l'ordre de  $1\ \mu\text{m}$  par mois [Herty, 2009]. Il n'est pas suffisant de définir le référentiel de mesure du capteur par rapport à son support. Encore faut-il étudier son évolution dans le temps. Au cours de cette thèse, les recherches se

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

sont orientées vers les méthodes métrologiques. Les capteurs sont considérés comme n'ayant aucune dérive.

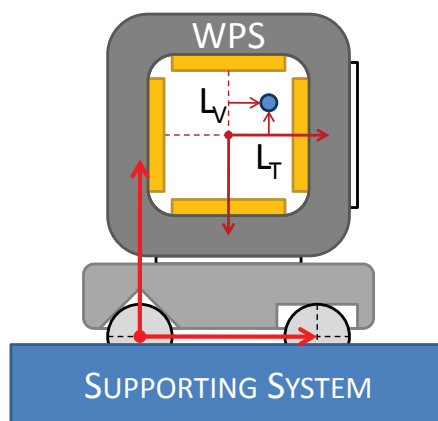


FIG. 2.37 – Définition du repère de mesures du WPS

Le capteur WPS de FOGALE NANOTECH fournit les positions transversales et verticales du fil tendu autour duquel il est installé (voir la figure 2.37). De ce fait, il peut être considéré comme un capteur fournissant les coordonnées rectangulaire d'un point dans un repère orthonormé direct à deux dimensions. Le fabricant considérant qu'il s'agit de définir les déplacements du capteur relativement au fil, le système d'axe par défaut est inversé par rapport à la logique de cette approche, qui veut obtenir la position du point mesuré dans le repère du capteur (voir la figure 2.37).

Le HLS, quant à lui, mesure la distance entre la surface d'eau et sa référence interne (voir la figure 2.38). Il s'agit alors d'un système fournissant la position d'un point dans un repère à une dimension.

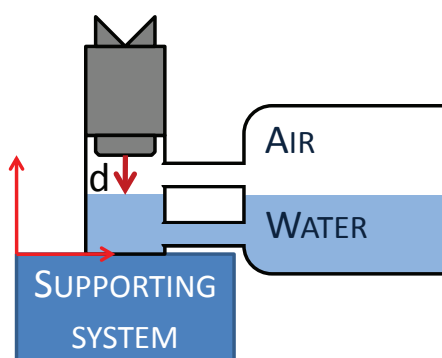


FIG. 2.38 – Définition du repère de mesures du HLS

Les inclinomètres sont un peu plus délicats à définir, ne serait-ce qu'à cause de leur référence de mesure qu'il n'est pas courant de manipuler en



métrologie, à savoir la direction de la verticale locale.

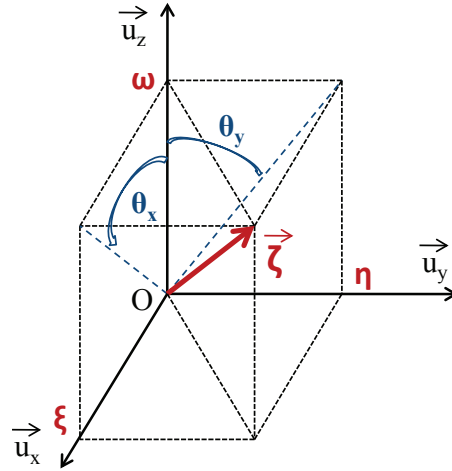


FIG. 2.39 – Définition du repère de mesures d'un inclinomètre biaxial

Soit  $\vec{\zeta}$ , le vecteur directeur normé de la verticale locale au niveau d'un inclinomètre (voir la figure 2.39). En considérant un repère orthonormé direct en trois dimensions, il est possible de projeter  $\vec{\zeta}$  sur plusieurs plans. Un inclinomètre mono-axe effectue cette projection sur un unique plan. Il mesure alors l'angle du vecteur projeté par rapport à un des axes de son repère. S'il s'agit d'un inclinomètre bi-axial, il effectue ces opérations dans deux plans différents.

### 2.4.3.2 Repères de centrage des capteurs

Les questions les plus simples sont souvent les plus difficiles à se poser. Pour résoudre l'enjeu majeur du pré-alignement du CLIC que représente la calibration absolue des capteurs, le plus grand pas en avant a consisté à définir les capteurs comme des systèmes de coordonnées.

Si l'objet sur lequel le capteur est installé est lui aussi doté d'un système de coordonnées connu, alors la calibration absolue des capteurs revient à calculer les paramètres de la similitude 3D permettant de passer de l'un à l'autre. La question suivante a consisté à se demander comment concevoir un système de centrage rassemblant les propriétés suivantes :

- Il assure une répétabilité micrométrique dans le centrage du capteur,
- Il est facilement mesurable,
- Il permet de construire facilement un système de coordonnées orthonormé direct,
- Il est pérenne, d'un encombrement réduit, d'utilisation simple.

La réflexion a rapidement convergé vers un système de centrage isostatique basé sur des billes de précision. En effet, de tels objets existent pour un



## 2 Pré-alignement du CLIC

---

coût réduit, tout en ayant d'excellentes tolérances de fabrication. De plus, à l'aide d'une CMM, il est possible de connaître très précisément les coordonnées des centres de ces billes. Connaissant ainsi un nombre limité de points, il est possible de définir des vecteurs puis, de là, une base orthonormée directe.

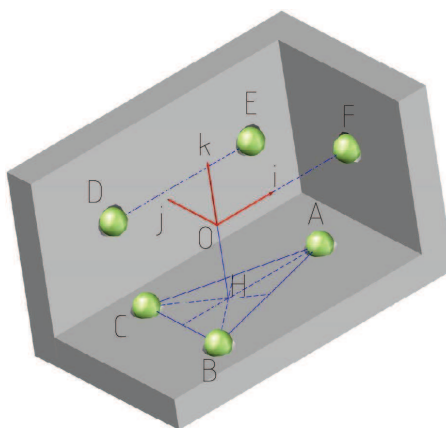


FIG. 2.40 – Centrage isostatique à six billes

Deux types de systèmes de centrage pouvaient alors être appliqués. Le premier est basé sur six billes contre lesquelles trois faces du capteur viennent en contact. La première face du capteur est posée sur trois billes (voir A, B et C sur la figure 2.40), fixant ainsi trois de ses degrés de liberté. Puis un des côtés du capteur vient au contact de deux autres billes (D et E sur la figure 2.40). Le capteur n'a plus qu'un degré de liberté, en l'occurrence sa translation longitudinale. La dernière des six billes (F sur la figure 2.40), au contact de la face avant du capteur, fixe ce dernier degré de liberté.

La seconde méthode est basée sur trois billes selon le principe trait-point-plan (voir la figure 2.41). L'interface du capteur est dotée d'un cône qui se loge sur la première bille. Il reste trois degrés de liberté au capteur : ses trois rotations. En logeant en plus la seconde bille le long d'un axe creusé dans l'interface, le tangage et le lacet du capteur sont fixés. En mettant au contact la troisième bille contre une surface, le roulis est lui-aussi fixé.

Le choix s'est porté sur les trois billes selon le principe trait-point-plan du fait que l'autre solution a plus d'inconvénients, malgré un usinage plus simple. En effet, la position et l'orientation sont fixées en mettant six billes au contact contre trois surfaces. Le serrage du capteur, pour être efficace et répétable, doit alors appliquer la même force simultanément sur ces trois plans. Si les trois plans sont orthogonaux deux à deux, alors l'axe de serrage doit être selon la grande diagonale du volume ainsi créé. L'usinage devient immédiatement plus complexe. A l'inverse, les trois billes du trait-point-plan sont, par définition, coplanaires. Le serrage optimal du capteur doit donc se faire selon la direction orthogonale à ce plan et passant par le centre de

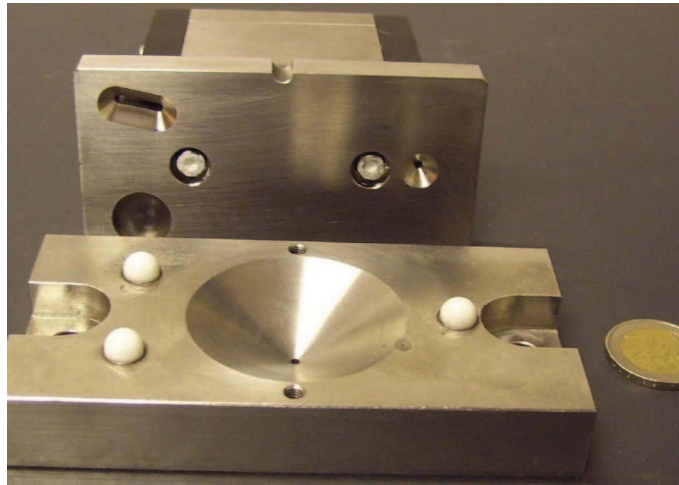


FIG. 2.41 – Centrage isostatique trait-point-plan sur trois billes

gravité du triangle formé par les trois billes, ce qui est beaucoup plus simple à réaliser.

Ensuite, dans les deux méthodes, la répétabilité du centrage dépend de la pérennité de l'état de surface des zones de contact. Celles-ci étant plus nombreuses et plus accessibles avec six billes qu'avec trois, le risque de dommages à long terme est plus élevé.

### 2.4.3.3 Repères des plaques et repère général

Les repères de centrage des capteurs sont définis à partir des centres des billes. De ce fait, il est aisé de construire celui des plaques invar sur lesquels les systèmes de centrage sont fixés (voir la figure 2.29). En effet, la mesure des coordonnées des centres des billes, faite avec une CMM en laboratoire de métrologie, s'effectue une fois les systèmes de centrage assemblés sur la plaque. Les coordonnées de tous ces points sont fournies dans le même système d'axe, dans le référentiel de mesure de la CMM. En général, ce dernier est construit initialement par le métrologue en charge de la mesure. Afin de minimiser les incertitudes de la CMM (notamment les facteurs d'échelle de chacun des trois axes), le référentiel est défini en fonction de la pièce à mesurer, à partir des points les plus éloignés.

Néanmoins, à partir des coordonnées issues de la métrologie, un repère orthonormé direct est re-défini pour chaque plaque. Les mathématiques utilisées sont de simples calculs vectoriels qui seront décrits par la suite. L'intérêt de cette opération est de limiter la valeur des rotations à appliquer pour passer d'un repère à l'autre. Pour un éventuel ajustement de ces angles, le calcul est plus stable avec de bonnes valeurs approchées. Il est alors plus simple de s'assurer que celles-ci soient proches de zéro.

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

Cet aspect est d'autant plus important pour la transformation des plaques vers le repère général qui passe inéluctablement par une compensation par la méthode des moindres carrés. En effet les premiers sont définis par la métrologie, le second par la topométrie. Pour passer de l'un à l'autre, il faut calculer les paramètres d'une similitude 3D.

Le repère général, quant à lui, doit être bâti avec quelques précautions qui permettront de simplifier le travail par la suite. Ainsi, autant qu'il soit proche du repère faisceau utilisé par les physiciens. Dans le cas du CLIC, ce rapprochement est d'autant plus simple que les faisceaux des deux linacs du CLIC forment chacun une ligne droite, et non un cercle approché comme dans les cas du LEP et du LHC. Pour cette même raison, qui implique que les faisceaux ne suivent pas la courbure de la Terre, ce repère doit former une base orthonormée directe. De plus comme la modélisation verticale des fils (voir l'équation 2.2) s'effectue dans un repère euclidien, un système général de coordonnées  $2D + h$  n'est pas envisageable.

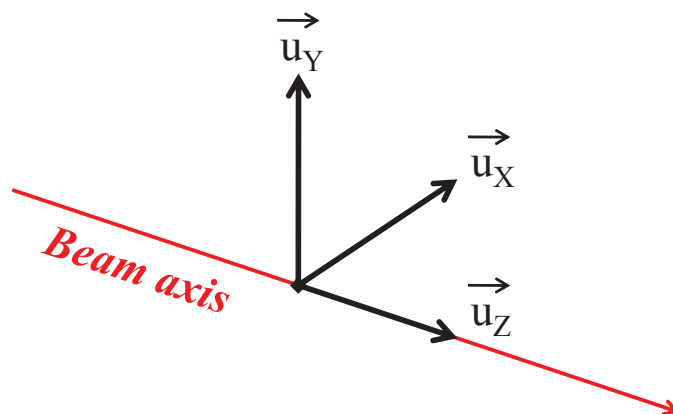


FIG. 2.42 – Conventions du repère faisceau

Il est d'usage dans les accélérateurs de particules de désigner  $z$  comme étant le longitudinal, correspondant à l'axe du faisceau (voir la figure 2.42). Les directions  $x$  et  $y$  correspondent respectivement au transversal et au vertical. Cela étant, cette dernière direction est à désigner ainsi avec précaution. Le terme vertical n'a pour cet axe aucun sens lié à la gravité, toutefois, ce n'est pas pour autant que le géoïde sera négligé. Le faisceau du CLIC forme une ligne droite, mais les systèmes de mesures employés pour son alignement sont liés à la pesanteur. En chaque point du réseau métrologique de référence, la verticale locale doit être définie par rapport au repère général. Ainsi dans l'expérience du *transfer tunnel 1* (TT1), un repère local astronomique a été créé. En l'origine du repère, au centre de l'expérience, la direction de la verticale est confondue avec l'axe  $y$  du système général de coordonnées.

## 2.4.4 Nouvelle décomposition du pré-alignement

### 2.4.4.1 Chaîne métrologique globale

Le pré-alignement du CLIC a pour but de s'assurer que les axes du faisceau de tous les composants de cet accélérateur forment une ligne droite selon une tolérance à trois sigma de  $10\ \mu\text{m}$  sur 200 m (voir la figure 2.15). Pour ce faire, la solution la plus simple, en terme de systèmes de coordonnées, consiste à définir un point appartenant à l'axe faisceau de chaque composant du CLIC, puis de les exprimer tous dans le repère général de l'accélérateur. Cela fait, il est possible de vérifier si ces points sont conformes aux spécifications d'alignement.

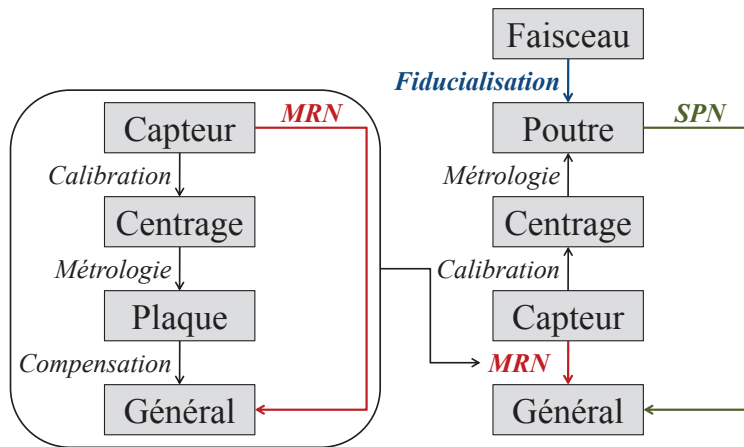


FIG. 2.43 – Schéma de la décomposition du pré-alignement

Le diagramme en figure 2.43 propose un enchaînement de systèmes de coordonnées et de transformations entre chacun d'entre eux. Il correspond au découpage de la chaîne métrologique globale du pré-alignement actif du CLIC. Il schématise également le lien entre le réseau métrologique de référence (MRN) et le réseau de pré-alignement des supports (SPN). Une fois le problème posé en ces termes, le travail devant être effectué consiste à déterminer chacune de ces transformations.

### 2.4.4.2 Décomposition du MRN

L'objectif du MRN n'est pas de fonctionner en tant que tel, c'est-à-dire de pouvoir exprimer les coordonnées d'un point mesuré d'un fil tendu dans le système général. Le but est de fournir des informations utilisables par le réseau de pré-alignement des supports, le SPN, afin d'exprimer les coordonnées des points du faisceau de chaque composant dans le repère général.

Si le capteur est calibré en justesse, il est possible d'utiliser ses lectures pour exprimer les coordonnées du point observé dans son repère de centrage.

## 2 Pré-alignement du CLIC

---

Ensuite, les supports des capteurs sont fixés sur une plaque, afin d’obtenir un ensemble pouvant être considéré comme indéformable. Le matériau choisi pour les plaques installées dans l’expérience du TT1 est l’invar<sup>8</sup>, afin de limiter le risque d’erreurs dues aux variations de température. Une étude mécanique plus poussée permettrait aussi d’optimiser les points de fixation des supports de capteurs sur la plaque, d’une part, et de la plaque sur son pilier, d’autre part. Avec les données à disposition, il n’y a d’autre choix que de considérer les déformations dues au serrage comme étant négligeables. La plaque est mesurée en métrologie. Les différents systèmes de centrage de capteurs sont définis dans le repère de la plaque, ainsi que les transformations associées.

Les points des fils tendus et des surface d’eau mesurés par les capteurs qui appartiennent à une même plaque sont désormais connus dans le système de coordonnées de cette dernière. Il faut par la suite les exprimer dans le repère général.

Tout d’abord, il existe une transformation, composée de trois translations et trois rotations, qui permet de définir la position et l’orientation de la plaque dans le repère général. Ces six degrés de libertés sont, *a priori*, inconnus. Ensuite, il existe une règle régissant les positions des points des plaques les uns par rapport aux autres. En effet, ceux-ci appartiennent, par définition, à des fils tendus ou à des surfaces d’eau, qui sont modélisables dans un système général euclidien de coordonnées [Touzé, 2010b]. Des points sont connus dans les repères des plaques. Pour obtenir leurs coordonnées dans le repère général, il faut calculer des valeurs compensées des deux ensembles de paramètres qui sont, d’une part les degrés de libertés des plaques et, d’autre part, les variables en jeu dans la modélisation des fils tendus et des surfaces d’eau.

Cela fait, l’ensemble du MRN est défini. Les positions et orientations des plaques sont connues, ainsi que les coordonnées des points des fils et des surfaces d’eau, mesurés par les capteurs WPS et HLS. Enfin, les paramètres de modélisation des fils et des surfaces d’eau sont disponibles. De ce fait, n’importe quel point appartenant à une de ces références d’alignement est désormais défini dans le système général de coordonnées. C’est précisément cette propriété qui va être exploitée par le SPN (voir la figure 2.43).

### 2.4.4.3 SPN et fiducialisation

L’association du réseau de pré-alignement des supports, le SPN, et de la fiducialisation permet, selon la figure 2.43, d’exprimer les points appartenant à l’axe du faisceau d’un composant du CLIC dans le repère général de l’accélérateur.

---

<sup>8</sup>L’invar, FeNi36, est un alliage de fer et de nickel. Son coefficient de dilatation thermique est 1.2  $\mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ .

---

## 2.4 La chaîne métrologique du MRN

Plus précisément, il s'agit, dans le cas du CLIC, d'aligner des ensembles de composants, à savoir les poutres des faisceaux principaux et d'entraînement, et les quadrupôles du faisceau principal. Ces ensembles sont dotés de systèmes de centrage similaires au MRN et sur lesquels les capteurs reliés au MRN (directement ou indirectement, lire le paragraphe 2.3.4.1) sont installés. De plus la fiducialisation permet de connaître la position de l'axe du faisceau par rapport à ces systèmes de centrage.

En supposant que le capteur en question soit un WPS, appartenant à une poutre du faisceau principal, observant un des fils tendus du MRN, il est possible d'exprimer les coordonnées du point mesuré dans le système général. Si le capteur est calibré et que la métrologie de son support est connue dans le système de la poutre, alors le point observé du fil est défini dans ce même repère. Les coordonnées de ce point étant connues dans deux repères distincts, il est possible de décrire la relation entre elles par une similitude 3D. Si plusieurs points sont disponibles ou si plusieurs degrés de liberté sont fixés, alors les paramètres de la transformation peuvent être calculés.

En associant la fiducialisation à cette démarche, les axes faisceau de tous les composants du CLIC sont définis dans le repère général de cette machine.

### 2.4.5 Conclusion

L'intérêt de traiter le recouvrement des fils en tant que problème de systèmes de coordonnées est indéniable. Tout d'abord cette approche suit la logique de la chaîne métrologique : les capteurs reposent sur un support, quelle est la transformation pour aller du premier au second ? Cette approche est au plus près de la réalité physique du problème. Cette transformation existe, pour des raisons d'usinage, de déformations, etc, elle est difficile à déterminer. Cependant elle existe. Elle doit juste être quantifiée.

Ensuite il y a un intérêt du point de vue du calcul. Le problème de la résolution du pré-alignement du CLIC revient à définir l'ensemble des paramètres des similitudes 3D entre chacun des nombreux systèmes de coordonnées. Autrement dit il va falloir déterminer des rotations et des translations. Ce sont là des objets mathématiquement bien définis qui, sous forme matricielle, disposent d'un formalisme poussé et efficace : l'algèbre linéaire.

Enfin, le dernier avantage, et non des moindres, est qu'avec cette approche, il est possible de donner un sens à l'ensemble du pré-alignement du CLIC dans une seule et même chaîne métrologique (voir la figure 2.43). En connaissant d'ores et déjà ce que le MRN doit fournir au SPN pour son bon fonctionnement, le développement et l'optimisation de ce réseau auront plus de chances d'aboutir.

### 2.5 Conclusion

Le CERN, depuis sa fondation en 1954, se veut une organisation motrice en terme de recherches fondamentales sur la physique des hautes énergies, qu'il s'agisse de susciter de nouvelles théories, ou d'en démontrer la véracité par le biais des puissants instruments que sont les collisionneurs. Cette thèse fait partie des recherches appliquées sur la faisabilité du projet CLIC, qui lui-même s'insère dans le contexte général de la physique actuelle des particules. L'accélérateur actuel du CERN, le LHC, devrait prochainement ouvrir aux physiciens la porte des interactions supérieures à 1 TeV. L'objectif du CLIC sera d'étudier plus finement les phénomènes devant être mis en évidence.

Mais qu'il s'agisse de faisceaux de leptons ou de hadrons, pour faire avancer la théorie, les collisionneurs doivent être toujours plus puissants, ce qui se traduit par une augmentation de l'énergie des collisions et de leurs luminosités. Comme il a été expliqué au cours de ce chapitre, la luminosité des collisions est liée, au travers de la conservation de l'émittance du faisceau de particules sur toute la longueur de l'accélérateur, à la qualité de l'alignement des composants de la machine. De ce fait, le bon fonctionnement du CLIC est tributaire de l'incertitude de mesure — jamais atteinte jusqu'à présent — de son alignement.

Pour ce faire, l'alignement du CLIC est décomposé en plusieurs étapes dont la dernière — effectuée par rapport au faisceau de particules — nécessite un pré-alignement actif dont la tolérance à  $3\sigma$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m, sur les positions transversales et verticales des composants, est de 10  $\mu\text{m}$ . Le pré-alignement peut lui-même être dissocié en plusieurs étapes, de la géodésie spatiale au GPS en surface, à la fiducialisation en laboratoire des poutres. Chacune de ces étapes a pour but d'atteindre une incertitude de mesure de plus en plus petite, à l'aide d'une instrumentation idoine.

Les recherches précédentes sur le pré-alignement du CLIC ont scellé de solides fondations pour édifier la réponse au problème posé. Le concept de recouvrement des références d'alignement sur plusieurs centaines de mètres permet de limiter les erreurs transversales et verticales. Les systèmes de mesure susceptibles d'être appliqués ont été définis, en l'occurrence les fils tendus et les réseaux hydrostatiques, mesurés respectivement par des capteurs HLS et WPS. Les enjeux gravimétriques intervenant dans ce concept ont aussi été mis en évidence dans les études précédentes. Il reste à étudier de manière globale comment ces éléments interagissent pour être en mesure de calculer, à un instant donné, la position de chacun des composants du CLIC et le déplacement qui doit leur être appliqué en vue du repositionnement, et ce, avec une incertitude de mesure conforme aux spécifications.

Les recherches sur le pré-alignement du CLIC se sont focalisées sur le réseau métrologique de référence parce que de nombreuses questions restaient en suspens, notamment au sujet du recouvrement des fils. Or il s'agissait du



## 2.5 Conclusion

---

concept central de la solution proposée par les géomètres. Le problème a été repensé en terme de gestion de systèmes de coordonnées. Cette approche, fondée sur l'analyse de la chaîne métrologique du MRN, met en évidence les enjeux majeurs sur lesquels il fallait concentrer les efforts : la calibration absolue des capteurs, la métrologie de leurs supports et la modélisation des références d'alignement.



# GESTION DES SYSTÈMES DE COORDONNÉES

---

## Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>58</b>
<b>3.2</b>	<b>Définition des outils mathématiques</b>	<b>59</b>
3.2.1	Introduction	59
3.2.2	Similitudes 3D	59
3.2.3	Quelques éléments de statistiques	61
3.2.4	Méthodes de simulation	64
3.2.5	Conclusion	67
<b>3.3</b>	<b>Métrologie et calibrations</b>	<b>68</b>
3.3.1	Introduction	68
3.3.2	Centrage et calibration des WPS	69
3.3.3	Centrage et calibration des autres capteurs	76
3.3.4	Métrologie et mesures CMM	85
3.3.5	Conclusion	91
<b>3.4</b>	<b>Compensation des réseaux</b>	<b>92</b>
3.4.1	Introduction	92
3.4.2	Modélisation des fils tendus	92
3.4.3	Modélisation des réseaux hydrostatiques	100
3.4.4	Calcul de la dernière similitude	106
3.4.5	Conclusion	114
<b>3.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>115</b>

---

### 3.1 Introduction

Le choix a été fait de considérer le problème général du pré-alignement du CLIC, et plus particulièrement du réseau métrologique de référence, sous l'angle de la gestion des systèmes de coordonnées. En effet, le principe du recouvrement des fils et l'idée de modéliser les flèches de ces derniers à partir des dénivelées hydrostatiques laissaient trop de places aux doutes. Ces deux concepts nécessitaient des investigations au sens où il fallait être en mesure de les décrire de manière exhaustive. L'analyse de la chaîne métrologique a montré que pour ce faire, il fallait s'atteler à la calibration du capteur par rapport à son support, puis de ce dernier à l'objet auquel il est fixé. La solution la plus simple, tant du point de vue des calculs que du formalisme mathématique, a consisté au fait de considérer ces différentes étapes, pour chacune d'entre elle, comme un problème de définition des paramètres d'une similitude 3D sans facteur d'échelle entre deux systèmes de coordonnées.

Dans un premier temps, il va s'agir de définir les outils mathématiques nécessaires pour les travaux qui vont suivre. Pour gérer les systèmes de coordonnées intervenant dans le réseau métrologique de référence, de nombreuses similitudes 3D vont devoir être déterminées. Les méthodes permettant de les calculer vont être présentées. Cependant calculer les valeurs quantitatives des translations et des rotations n'est pas suffisant. Il est nécessaire de fournir *in fine* une incertitude de mesure aussi proche de la réalité que possible, afin de démontrer ou non la faisabilité du pré-alignement du CLIC selon les spécifications. La méthode de simulation de Monte-Carlo, qui va être systématiquement utilisée par la suite, va être brièvement expliquée, ainsi que les inéluctables calculs de densités de probabilités qui lui sont associés.

Dans ce chapitre, trois familles de similitudes 3D vont être décrites. La première est relative à la définition des axes de mesures des capteurs par rapport à leurs repères de centrage associés. Les développements faits dans cette direction, à savoir la conception de nouvelles interfaces et de bancs de calibrations pour les capteurs WPS et les inclinomètres, vont être présentés. La seconde concerne le lien entre les supports des capteurs et l'objet qui les regroupe, en l'occurrence les plaques métrologiques. Ce lien va être déterminé grâce aux CMM disponibles au laboratoire de métrologie du CERN.

La dernière similitude est sans aucun doute la plus complexe. Il s'agit de définir les positions et orientations des plaques dans le repère euclidien général. Les données à disposition seront les mesures topométriques, celles des WPS et HLS et surtout le fait que les positions et orientations des différentes plaques entre elles sont liées par les fils tendus et les surfaces d'eau qui sont observés par leurs capteurs respectifs. Ainsi l'étape préalable au calcul de cette dernière similitude consistera à modéliser le plus efficacement possible les fils tendus et les réseaux hydrostatiques dans un repère euclidien général.

## 3.2 Définition des outils mathématiques

### 3.2.1 Introduction

Dans les prochains chapitres, certains outils mathématiques vont fréquemment être mis à contribution. Afin de simplifier la lecture de cet ouvrage, ceux-ci vont être décrits dans la prochaine partie.

Tout d'abord, il s'agit de décrire les calculs inhérents aux similitudes 3D, notamment aux propriétés des matrices de rotation dans l'espace. Il sera abordé la façon de les calculer à partir de la construction d'un repère euclidien et ce, en s'appuyant sur une de leurs propriétés fondamentales qu'est l'orthogonalité.

Ensuite, les méthodes statistiques utilisées dans les simulations seront présentées. La méthode adoptée pour obtenir la densité de probabilité empirique à partir de  $n$  réalisations d'une variable aléatoire sera décrite. Il en sera de même pour la fonction de répartition, l'espérance mathématique et enfin le test d'adéquation du  $\chi^2$ , connu sous le nom de test de Pearson.

Enfin, le principe des simulations de Monte-Carlo va être brièvement présenté, ainsi que la raison du choix de cette méthode au détriment de la propagation des erreurs.

### 3.2.2 Similitudes 3D

Une similitude 3D est la transformation qui permet d'aller d'un repère de l'espace à un autre. Il est alors possible d'exprimer les coordonnées d'un point dans le nouveau repère en fonction de celles dans l'ancien et en fonction des paramètres de transformation de l'un à l'autre.

Soit  $M$  un point de l'espace. Soient deux bases orthonormées directes distinctes  $\{A\}$  et  $\{B\}$  formant deux repères euclidiens. Les coordonnées cartésiennes de  $M$  exprimées dans  $\{A\}$  et  $\{B\}$  sont similaires, au sens où il existe une similitude 3D permettant d'exprimer la relation entre ces coordonnées. Cette similitude est la composée d'une translation, d'un facteur d'échelle et d'une rotation.

Autrement dit, il existe une matrice colonne  $T$  de translation, une matrice de rotation  $R$  et un facteur d'échelle  $k \in \mathbb{R}^*$  tels que :

$$[M]_{\{B\}} = T + k \cdot R \times [M]_{\{A\}} \quad (3.1)$$

Une matrice de rotation est, par définition, orthogonale, ce qui équivaut au fait que sa transposée soit égale à son inverse.

$$R^{-1} = R^t \quad (3.2)$$

A partir de 3.1 et de 3.2, il est aisé d'écrire la transformation inverse en fonction de  $T$ , de  $R$  et de  $k$ .

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

$$[M]_{\{A\}} = -\frac{1}{k} \cdot R^t \times T + \frac{1}{k} \cdot R^t \times [M]_{\{B\}} \quad (3.3)$$

Dans un espace à trois dimensions, la matrice de rotation peut être exprimée comme le produit de trois matrices de rotation élémentaire autour de chacun des axes de la base orthonormée. Le produit matriciel n'étant pas commutatif, l'ordre de multiplication des matrices impose la vigilance. Dans un souci d'uniformisation, pour l'ensemble des calculs de rotation de cette thèse, l'ordre de multiplication a été choisi arbitrairement selon la formule 3.4.

$$\exists \{\theta_x, \theta_y, \theta_z\} \in [-\pi, \pi]^3 \quad R = Rot_Z(\theta_z) \times Rot_Y(\theta_y) \times Rot_X(\theta_x) \quad (3.4)$$

Les matrices de rotations élémentaires  $Rot_X$ ,  $Rot_Y$  et  $Rot_Z$  sont définies dans les formules en 3.5.

$$\left\{ \begin{array}{l} Rot_X(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & -\sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \\ Rot_Y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & -\sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix} \\ Rot_Z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

La similitude 3D pour aller du repère  $\{A\}$  vers  $\{B\}$  est donc définie par sept paramètres réels  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ,  $k$ ,  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  et  $\theta_z$  tels que :

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^3 \quad k \in \mathbb{R}^* \quad \{\theta_x, \theta_y, \theta_z\} \in [-\pi, \pi]^3 \quad (3.6)$$

La matrice  $R$  est une matrice de rotation 3D, ce qui équivaut au fait que ses trois colonnes forment une base orthonormée directe. Autrement dit, calculer les coordonnées des vecteurs unitaires directeurs de la base orthonormée directe  $\{B\}$  dans  $\{A\}$  équivaut à calculer la matrice de rotation  $R$  de la similitude 3D allant de  $\{A\}$  vers  $\{B\}$ .

Cette propriété des matrices de rotation servira notamment à obtenir ces dernières à partir des coordonnées issues de la métrologie.

## 3.2 Définition des outils mathématiques

---

Il reste à étudier comment obtenir la valeur des angles  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  et  $\theta_z$  à partir de la matrice  $R$ . A l'aide des relations 3.4 et 3.5, on obtient l'expression de la matrice  $R$ .

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_y \cos \theta_z & a & b \\ -\cos \theta_y \sin \theta_z & c & d \\ \sin \theta_y & -\sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Dans la formule 3.7, tous les termes ne sont pas exprimés du fait de la longueur des expressions. Heureusement, les autres termes suffisent pour obtenir les valeurs de  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  et  $\theta_z$  (voir les relations en 3.8).

$$\begin{cases} \theta_y = \sin^{-1} R \{3, 1\} \\ \theta_x = \sin^{-1} \left( -\frac{R \{3, 2\}}{\cos \theta_y} \right) = \cos^{-1} \left( \frac{R \{3, 3\}}{\cos \theta_y} \right) \\ \theta_z = \cos^{-1} \left( \frac{R \{1, 1\}}{\cos \theta_y} \right) = \sin^{-1} \left( -\frac{R \{2, 1\}}{\cos \theta_y} \right) \end{cases} \quad (3.8)$$

L'intérêt d'extraire les angles de la matrice de rotation est lié à l'exploitation des données. Au lieu de retenir les neuf termes corrélés d'une matrice de rotation, seuls trois termes indépendants sont retenus. De plus un calcul d'incertitude devient immédiatement plus intelligible lorsqu'il est associé à une quantité dotée d'une unité, comme un angle, plutôt qu'un terme de matrice.

### 3.2.3 Quelques éléments de statistiques

Dans les calculs qui vont suivre dans ce chapitre, les simulations seront omniprésentes. Pour être en mesure de déduire des résultats de ces tirages les informations les plus pertinentes possibles, il est nécessaire de s'atteler au sens de cette démarche. Un calcul d'espérance mathématique ou de variance n'a de sens qu'en faisant l'hypothèse que la variable en question suive telle ou telle densité de probabilité.

Dans les éléments présentés ci-après, les méthodes employées pour analyser empiriquement une variable simulée vont être décrites. Celles-ci vont du calcul de la densité de probabilité empirique jusqu'à la vérification de la normalité de la variable par un test d'adéquation du  $\chi^2$ .

Soit  $X$  une variable aléatoire réelle supposée suivre une loi normale. Soient  $((x_i)_{i=1}^n) \in \mathbb{R}^n$ ,  $n$  réalisations indépendantes de  $X$ . On cherche à calculer la densité de probabilité empirique des  $x_i$ , puis d'effectuer un test d'adéquation du  $\chi^2$  pour vérifier leur normalité.



### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

Soit le couple  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$  tel que  $\forall i \in \{1 \cdots n\} a \leq x_i < b$ . L'intervalle  $[a, b[$  est divisé en  $m$  intervalles  $I_j$  de même largeur  $\delta$ .

$$\begin{cases} I_j = [a + \delta \cdot (j - 1), a + \delta \cdot j[ \\ \text{avec} \\ \delta = \frac{b - a}{m} \end{cases} \quad (3.9)$$

Par construction, les intervalles  $I_j$  ont des intersections nulles. De plus leur réunion permet d'obtenir l'intervalle  $[a, b[$ .

$$\begin{cases} \bigcup_{j=1}^m I_j = [a, b[ \\ \bigcap_{j=1}^m I_j = \emptyset \end{cases} \quad (3.10)$$

Soit  $\nu_j$ , le nombre de réalisations  $x_i$  appartenant à l'intervalle  $I_j$ . D'après la propriété en 3.10, les formules 3.11 et 3.12 peuvent être écrites.

$$\nu_j = \text{card}(I_j \cap \{\cdots x_i \cdots\}) \quad (3.11)$$

$$\sum_{j=1}^m \nu_j = n \quad (3.12)$$

En représentant graphiquement les  $\nu_j$  en fonction des intervalles  $I_j$ , on obtient l'histogramme de la répartition des  $x_i$  en figure 3.1.

Soit  $\xi_j$  le centre de l'intervalle  $I_j$  (voir la figure 3.1).

$$\xi_j = a + \frac{\delta \cdot (2j - 1)}{2} \quad (3.13)$$

Afin de comprendre comment obtenir la densité de probabilité empirique des  $x_i$ , étudions de plus près la fonction  $\nu$  telle que  $\nu_j = \nu(\xi_j)$ .

$$\int_{\mathbb{R}} \nu(x) dx \approx \sum_{j=1}^m \delta \cdot \nu_j = n \cdot \delta \quad (3.14)$$

Soit  $\psi$  la densité de probabilité empirique des  $x_i$  telle que  $\psi_j = \psi(\xi_j)$ . Par définition d'une densité de probabilité, son intégrale sur  $\mathbb{R}$  est égale à 1. En s'appuyant sur l'équation 3.14, on obtient :

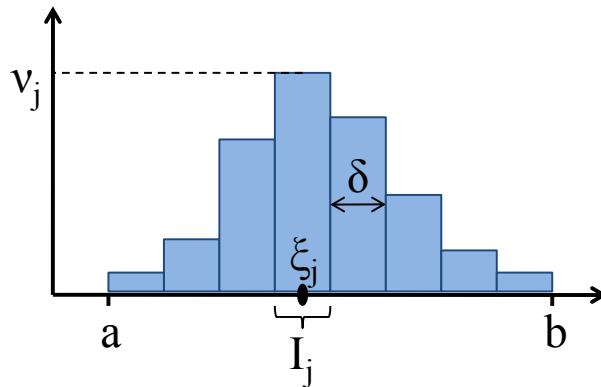


FIG. 3.1 – Répartition des réalisations d’une variable aléatoire

$$\psi_j = \frac{\nu_j}{n \cdot \delta} \quad (3.15)$$

A l’aide de la densité de probabilité, il est possible d’obtenir les valeurs empiriques de l’espérance mathématique des  $x_i$  et de leur fonction de répartition  $F$ .

$$\mathbb{E}(X) = \int_{\mathbb{R}} x \cdot \psi(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \xi_j \cdot \nu_j \quad (3.16)$$

$$F_j = F(\xi_j) = \int_{-\infty}^{\xi_j} \psi(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{k=1}^j \nu_k \quad (3.17)$$

Une fois les définitions préalables faites, il est possible de s’atteler au test d’adéquation du  $\chi^2$ . Commençons par définir l’hypothèse  $\mathcal{H}_0$  que nous souhaitons tester.

$\mathcal{H}_0$  : La variable aléatoire  $X$  suit la loi normale d’espérance mathématique  $\mu$  et de variance  $\sigma^2$ .

La densité de probabilité théorique  $\phi$  de  $X$  est fournie par l’expression 3.18.

$$\phi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (3.18)$$

On définit  $p_j$  comme étant la probabilité que la variable  $X$  appartienne à l’intervalle  $I_j$ .

$$p_j = \mathcal{P}(X \in I_j) = \int_{I_j} \phi(x) dx \approx \delta \cdot \phi(\xi_j) \quad (3.19)$$

Soit la variable  $K$  définie comme suit :

$$K = \sum_{j=1}^m \frac{(\nu_j - n \cdot p_j)^2}{n \cdot p_j} \quad (3.20)$$

Si la variance et l'espérance mathématique de  $X$  sont connues, alors  $K$  suit une loi du  $\chi^2$  à  $m - 1$  degrés de libertés [Pelat, 2006]. Si ces deux paramètres sont *a priori* inconnus et qu'ils sont, de ce fait, calculés à partir des réalisations  $x_i$  de  $X$ , alors l'adéquation est facilitée. Le nombre de degrés de liberté de  $K$  à partir duquel le test est fait est alors réduit à  $m - 3$ .

Dans notre cas de figure où  $\mu$  et  $\sigma$  sont inconnus, nous allons vérifier si  $K$  se trouve dans un intervalle correspondant à la loi du  $\chi_{m-3}^2$  selon la probabilité  $p$ . Dans les tests faits par la suite,  $p = 95\%$ .

$$\begin{cases} \frac{1-p}{2} = \mathcal{P}(\chi_{m-3}^2 \leq \gamma_1) \\ \frac{1+p}{2} = \mathcal{P}(\chi_{m-3}^2 \leq \gamma_2) \end{cases} \quad (3.21)$$

Si  $\gamma_1 \leq K \leq \gamma_2$ , alors la probabilité que l'hypothèse  $\mathcal{H}_0$  soit vraie — c'est-à-dire que  $X$  suive la loi normale — est  $p$ .

Désormais, les outils mathématiques associés aux simulations de Monte-Carlo sont définis. Ils ont le mérite d'apporter plus de rigueur à un simple calcul de moyenne ou de variance, simplement par le biais du test d'adéquation visant à s'assurer de la normalité des variables. Le simple calcul, *in fine*, reste le même, mais au moins il est démontré qu'il s'agissait de la bonne formule à appliquer.

#### 3.2.4 Méthodes de simulation

Le pré-alignement du CLIC, et plus particulièrement la partie qui concerne le réseau métrologique de référence, est composé de nombreuses étapes. Il est nécessaire d'estimer les incertitudes de mesures qui interviennent à la dernière d'entre elles, lorsqu'il s'agit de se servir des fils tendus pour définir la position d'un objet. Un calcul de propagation des erreurs est donc absolument nécessaire.

Soit  $X \in \mathbb{R}^n$  un vecteur de  $n$  variables aléatoires corrélées. Soient une fonction  $F$  allant de  $\mathbb{R}^n$  à  $\mathbb{R}^m$  et  $Y \in \mathbb{R}^m$  un vecteur tels que  $Y = F(X)$ .

## 3.2 Définition des outils mathématiques

---

Une étude de propagation des erreurs requiert le calcul de l'espérance mathématique de  $Y$ ,  $\mathbb{E}(Y)$ , et de la matrice de variance-covariance de ce vecteur,  $\Sigma_{YY}$ , et ce, à partir de  $F$ ,  $\mathbb{E}(X)$  et  $\Sigma_{XX}$ .

Selon le bureau international des poids et mesures (BIPM), il existe deux méthodes pour résoudre ce problème, en fonction de l'un ou l'autre des cas suivants :

- La matrice jacobienne des dérivées partielles de  $F$ ,  $J_F$ , est connue,
- La densité de probabilité  $\Phi_X$  du vecteur  $X$  est connue.

Dans le premier cas, la méthode à adopter est la propagation des erreurs telle qu'elle est décrite dans le *Guide to the expression of uncertainty in measurement* (GUM), édité par le BIPM [JCGM, 2008a]. Dans le second cas, la méthode est celle des simulations de Monte-Carlo décrites dans le complément au GUM [JCGM, 2008b]. Plus généralement, lorsque les variables impliquées ne suivent pas la loi normale, les simulations de Monte-Carlo sont la seule méthode qui permet de déterminer l'incertitude de mesure.

### 3.2.4.1 Propagation des erreurs

Cette méthode est basée sur la propagation linéaire de la matrice de variance-covariance (voir la relation 3.22).

$$Y = A \times X + B \quad \Longrightarrow \quad \Sigma_{YY} = A \times \Sigma_{XX} \times A^t \quad (3.22)$$

Dans le cas de figure où  $Y = F(X)$ , la relation 3.22 est obtenue en linéarisant la fonction  $F$ . Autrement dit la matrice Jacobienne de  $F$  va remplacer  $A$ .

$$\begin{aligned} Y = F(X) &\approx F(X_0) + J_F(X_0) \times (X - X_0) \\ &\quad \downarrow \\ \Sigma_{YY} &= J_F(X_0) \times \Sigma_{XX} \times J_F(X_0)^t \end{aligned} \quad (3.23)$$

Les termes de la matrice de variance-covariance de  $Y$  peuvent ainsi être déduits de ceux de  $X$  et de la jacobienne. La formule 3.24 est obtenue.

$$\Sigma_{YY} \{i, j\} = \sum_{\mu=1}^n \sum_{\nu=1}^n \frac{\partial f_j(X_0)}{\partial x_\mu} \cdot \frac{\partial f_i(X_0)}{\partial x_\nu} \cdot \Sigma_{XX} \{\mu, \nu\} \quad (3.24)$$

Si le calcul des dérivées partielles d'une fonction est en général assez simple, il peut devenir extrêmement fastidieux lorsque celle-ci fait intervenir un grand nombre de variables. Ensuite ce modèle n'est valide que dans le cas où un modèle linéarisé du système suffit selon l'ordre de grandeur des incertitudes.

#### 3.2.4.2 Propagation des distributions

Si l'espérance mathématique, la matrice de variance-covariance et la densité de probabilité de  $X$  sont connues, ainsi que la fonction  $F$ , alors il est possible de générer  $p$  réalisations de  $X$  et d'obtenir, pour chacune d'entre elles, une valeur simulée de  $Y$ .

Le principe de la méthode de Monte-Carlo, définie comme la méthode de propagation des distributions, est d'obtenir, à partir des  $p$  réalisations simulées de  $Y$ , la densité de probabilité de ce vecteur (voir le schéma en figure 3.2).

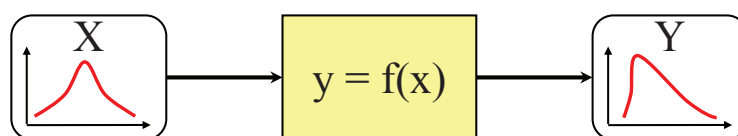


FIG. 3.2 – Monte-Carlo ou la propagation des distributions

Une fois les  $p$  réalisations de  $Y$  obtenues, il est aisé d'en extraire l'espérance mathématique, les variances et les covariances. Quant à la densité de probabilité, la première hypothèse est qu'il s'agit d'une loi normale. A l'issue des simulations de la fonction en question, un test d'adéquation du  $\chi^2$  s'assure de la normalité de la densité de probabilité empirique obtenue.

#### 3.2.4.3 Méthode choisie

Par la suite, tous les calculs de propagation des erreurs ont été effectués en utilisant la méthode de Monte-Carlo. Comme il sera démontré, tous les paramètres en jeu suivront une loi normale. Les variables primaires étant normales et la linéarisation des fonctions étant amplement suffisante, tester la normalité des paramètres simulés revient à redémontrer qu'une combinaison linéaire de variables gaussiennes suit la loi normale.

En ce sens, se servir de Monte-Carlo n'est pas absolument requis. Néanmoins, c'est plus simple à mettre en place. La fonction  $F$  n'a pas à être linéarisée et les calculs sont extrêmement simples avec le logiciel de calcul MATLAB. En effet, générer les  $p$  réalisations de  $X$  selon la loi normale, connaissant son espérance et sa matrice de covariance, se fait avec l'unique commande `mvnrnd`<sup>1</sup>.

D'une manière plus générale, ce débat n'a de sens qu'à partir du moment où la distribution du résultat est prévisible. Il est simple, *a posteriori*, de constater que le calcul de propagation des erreurs suffisait. Les étapes simulées requérant les simulations de rotations, de paramètres de fils tendus, *et cætera*, il n'était pas forcément intuitif d'anticiper la normalité des résultats. Dans ce contexte, la méthode de Monte-Carlo permet de ne pas avoir à se

---

<sup>1</sup><http://www.mathworks.com/help/toolbox/stats/mvnrnd.html>

---

### 3.2 Définition des outils mathématiques

---

poser cette question. Les paramètres sont simulés et leurs distributions respectives sont testées par rapport à la loi normale. Ils étaient positifs, mais l'important, fondamentalement, était d'être en mesure de détecter s'ils ne l'étaient pas.

Enfin, il existe une autre méthode qui pouvait être appliquée pour obtenir les matrices de variance-covariance. Un ajustement par la méthode des moindres carrés fait intervenir cette matrice [Touzé, 2010b] (voir l'équation 3.25).

$$\begin{aligned}\hat{X} &= (A^t \times P \times A)^{-1} \times (A^t \times P \times B) \\ &= \Sigma_{XX} \times (A^t \times P \times B)\end{aligned}\tag{3.25}$$

La matrice  $\Sigma_{XX} = (A^t \times P \times A)^{-1}$  de variance-covariance sur les paramètres ajustés est fonction de  $P$ , la matrice de pondération des observations.  $P$  est l'inverse de la matrice de variance-covariance des observations. Pour la plupart des ajustements, les observations sont considérées comme étant indépendantes. De ce fait,  $P$  est diagonale.

Ainsi, lors d'un ajustement par moindres carrés, il est inutile d'effectuer une simulation de Monte-Carlo de ce calcul pour juger de la possibilité de déformation du réseau. La matrice de variance-covariance sur les paramètres intervenant dans le calcul est largement suffisante.

Malgré cette possibilité, Monte-Carlo a été la seule méthode utilisée. L'erreur  $\varepsilon$  à l'issue des simulations est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée du nombre de tirages  $n$  [JCGM, 2008b]. De ce fait, multiplier le nombre de réalisations par cent permet d'obtenir un résultat dix fois plus précis.

$$\varepsilon \propto \frac{1}{\sqrt{n}}\tag{3.26}$$

Le nombre standard de réalisations adopté pour les simulations était de cent mille. Par défaut, le générateur de nombres pseudo-aléatoires de MATLAB est l'algorithme de MERSENNE-TWISTER<sup>2</sup> dont la période est égale à  $2^{19937} - 1 \approx 10^{6000}$ . En excellente approximation, la qualité de ce générateur est amplement suffisante par rapport au nombre de variables à simuler.

#### 3.2.5 Conclusion

La définition de ces différents outils mathématiques va se révéler fort utile dans la mesure où les étapes du réseau métrologique de référence, qui vont être présentées par la suite, font, pour la plupart, intervenir les mêmes types de calculs. Comme il peut être déduit de la description de la chaîne

---

<sup>2</sup><http://www.math.sci.hiroshima-u.ac.jp/~m-mat/MT/emt.html>

## 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

métrologique du MRN au paragraphe 2.4, ces calculs correspondent majoritairement à la détermination des translations et des rotations relatives aux changements de repère.

Les simulations selon la méthode de Monte-Carlo permettent, une fois les réalisations faites, d'extraire les espérances mathématiques de ces paramètres de même que leur matrice de variance-covariance. Ainsi, pour une étape donnée de la chaîne métrologique devant être simulée, pour importer les résultats des simulations des précédentes, il suffit de charger les vecteurs contenant les espérances mathématiques des paramètres et les matrices de variance-covariance associées. La commande MATLAB *mvnrnd* permet alors de générer rigoureusement des valeurs simulées des paramètres d'entrée, pour peu que la normalité de ces derniers ait été démontrée.

### 3.3 Métrologie et calibrations

#### 3.3.1 Introduction

Dans la partie qui va suivre, il s'agit d'étudier les deux premières étapes de la chaîne métrologique du MRN. Plus précisément, il s'agit d'exprimer les lectures des capteurs dans le repère euclidien de la plaque métrologique à laquelle ils appartiennent. Selon la figure 2.43, cela revient à définir les transformations permettant, d'une part, de définir les axes de mesures des capteurs par rapport à leurs repères de centrage respectifs, puis, d'autre part, de connaître chacun de ces derniers dans le repère de la plaque. Ces deux opérations distinctes correspondent respectivement à la calibration absolue des capteurs et à la métrologie de leurs supports.

Ces deux opérations sont étroitement liées du fait qu'elles font intervenir les systèmes de centrage des capteurs. Avant de penser aux méthodes de calibration, il fallait réfléchir à un centrage susceptible de matérialiser efficacement un système d'axe auquel il faudrait se rattacher.

Cette partie traite donc des réflexions qui ont conduit au centrage forcé isostatique sur trois billes de précision, selon le principe trait-point-plan. Une fois que les interfaces des capteurs ont été adaptées à ce système, il a fallu s'atteler à la détermination de leurs axes de mesures par rapport aux billes. Des bancs de calibration ont été conçus à cet effet. Finalement, ces repères de centrage, matérialisés par les centres de trois billes, sont mesurés les uns par rapport aux autres, une fois qu'ils sont définitivement fixés à une plaque métrologique.

Les résultats obtenus expérimentalement, ainsi que ceux des simulations, seront présentés. Ils sont basés sur le développement des plaques métrologiques fait pour l'expérience du TT1. Celle-ci a pour but de mettre à l'épreuve le principe de recouvrement des fils qui est crucial pour le fonctionnement du réseau métrologique de référence. Elle sera plus largement décrite au paragraphe 4.2.



### 3.3.2 Centrage et calibration des WPS

#### 3.3.2.1 Centrage forcé des WPS

Les capteurs WPS forment un système biaxial, s'il y a une erreur dans l'orientation du capteur, au mieux elle n'est négligeable que dans un des deux axes de mesure. Un centrage isostatique, selon le principe trait-point-plan, a été créé, ainsi que le banc de calibration idoine permettant de déterminer la transformation allant du système d'axes du capteur à ceux de son support (voir la figure 3.3).

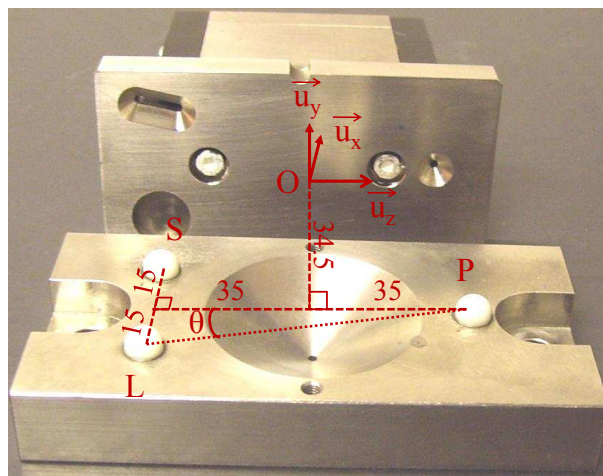


FIG. 3.3 – Centrage isostatique des WPS (cotes en mm)

Le capteur WPS repose sur trois billes de précision en céramique. Celles-ci, produites par la firme SCERAM<sup>3</sup>, ont un diamètre de 8 mm qui a été vérifié par des mesures CMM LEITZ [Glaude et Griffet, 2010]. Selon le fabricant, les billes choisies, de grade 40, ont une tolérance de sphéricité et de diamètre de 1  $\mu\text{m}$ . Le choix du matériau (la céramique ou plus précisément l'oxyde de zirconium) est dû au principe capacitif de mesure des capteurs WPS de FOGALE qui requiert que ce dernier soit isolé électriquement. Plutôt que d'usiner un support complexe dans un matériau isolant, la solution la plus simple consistait à assurer l'isolation avec les billes elles-mêmes.

Avant de s'atteler à la calibration de la transformation du capteur à son support, il faut définir le système d'axes des trois billes. Soient  $P$ ,  $L$  et  $S$  les centres des billes qui fixent respectivement la position, l'orientation et le roulis du WPS (voir la figure 3.3). Ces trois points forment un triangle isocèle en  $P$  de base 30 mm et de hauteur 70 mm.

Le premier axe de la base orthonormée directe qui est construit est le vecteur normé orthogonal au plan formé par les trois points  $P$ ,  $L$  et  $S$ . Il est calculé à l'aide du produit vectoriel 3.27.

<sup>3</sup><http://www.sceram.com/>

$$\vec{u}_y = \frac{1}{\|\vec{PS} \wedge \vec{PL}\|} \cdot \vec{PS} \wedge \vec{PL} \quad (3.27)$$

L'orientation du capteur sur son support est mécaniquement définie par la droite passant par les points  $P$  et  $L$ . L'axe longitudinal de la base orthonormée va donc être construit par rapport à ces points. Du fait de l'angle  $\theta$  entre cet axe matérialisé par deux billes et la vraie direction longitudinale (voir la figure 3.3), il va falloir passer par une base orthonormée directe temporaire définie dans la formule 3.28.

$$\begin{cases} \vec{n} = \frac{1}{\|\vec{PL}\|} \cdot \vec{PL} \\ \vec{p} = \vec{u}_y \wedge \vec{n} \end{cases} \quad (3.28)$$

Il est alors possible de définir le vecteur directeur de l'axe longitudinal  $\vec{u}_z$  en fonction de  $\theta$ ,  $\vec{n}$  et  $\vec{p}$ , puis d'en déduire le dernier vecteur de la base orthonormée (voir la formule 3.29).

$$\begin{cases} \theta = \tan^{-1} \frac{15}{70} \\ \vec{u}_z = -\cos \theta \cdot \vec{n} + \sin \theta \cdot \vec{p} \\ \vec{u}_x = \vec{u}_y \wedge \vec{u}_z \end{cases} \quad (3.29)$$

Les trois vecteurs  $\vec{u}_x$ ,  $\vec{u}_y$  et  $\vec{u}_z$  forment une base orthonormée directe. Pour achever le repère de centrage, il ne reste qu'à lui définir un centre  $O$ . Pour minimiser les effets des rotations sur les lectures des capteurs, celui-ci doit être au plus près de leurs zéros. Le centre  $O$  est définie à partir du point  $P$  qui fixe la position du capteur et du système d'axe nouvellement créé (voir la formule 3.30). Les dimensions sont en millimètres. Elles sont déduites des valeurs théoriques d'usinage des pièces.

$$O = P - 35\vec{u}_z + 34.5\vec{u}_y \quad (3.30)$$

#### 3.3.2.2 Calibration des WPS

La définition de l'interface ayant été faite, il est désormais possible de s'atteler à la calibration absolue du capteur. Le système d'axes de mesures d'un capteur WPS peut être exprimé dans celui de son repère de centrage

### 3.3 Métrologie et calibrations

par une similitude 3D à six paramètres : trois translations et trois rotations. Il n'y a aucune raison de considérer un facteur d'échelle.

La direction longitudinale, pour les capteurs WPS, est d'importance moindre que le transversal et le vertical. Il a été démontré que la translation longitudinale, le lacet et le tangage peuvent être négligés, pour peu qu'ils aient des valeurs raisonnablement petites ( $1^\circ$  pour les angles, 1 mm pour la translation longitudinale) [Becker, 2003]. Il reste ainsi trois degrés de liberté significatifs devant être calibrés pour connaître la transformation des axes de mesure au repère de centrage : les translations transversale et verticale  $\tau_x$  et  $\tau_y$ , ainsi que le roulis  $\rho_z$  (voir le schéma en figure 3.4).

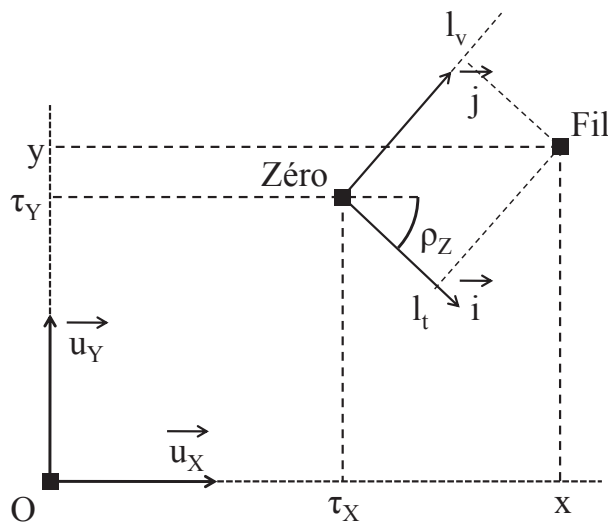


FIG. 3.4 – Degrés de liberté devant être déterminés

La calibration des trois degrés de libertés restants requiert de connaître les coordonnées de plusieurs points dans les deux systèmes. Grâce aux lectures transversales et verticales du capteur, les coordonnées du fil dans le système des axes de mesure sont directement obtenues (voir la figure 3.4). Malheureusement, le fil n'est pas connu dans le système de centrage.

La solution adoptée contourne le problème en considérant plusieurs repères de centrage, dans un plan orthogonal à l'axe du fil, et dont les transformations vers un repère général sont connues (voir la figure 3.5). Ainsi, si les coordonnées des points mesurés du fil sont inconnues, et si l'usage des repères est parfait, alors ces points observés sont identiques dans le repère général. En partant de ce principe, le nombre d'observations s'élève à deux par repère de centrage (lectures transversale et verticale) tandis que le nombre de paramètres inconnus est de six (les trois degrés de libertés et les coordonnées du point mesuré du fil dans le repère général). Soit  $n$  le nombre de fois où cette opération est réalisée, avec les fils dans des positions différentes. Il y a  $8n$  observations pour  $3(n+1)$  paramètres. Si  $n = 3$ , alors le

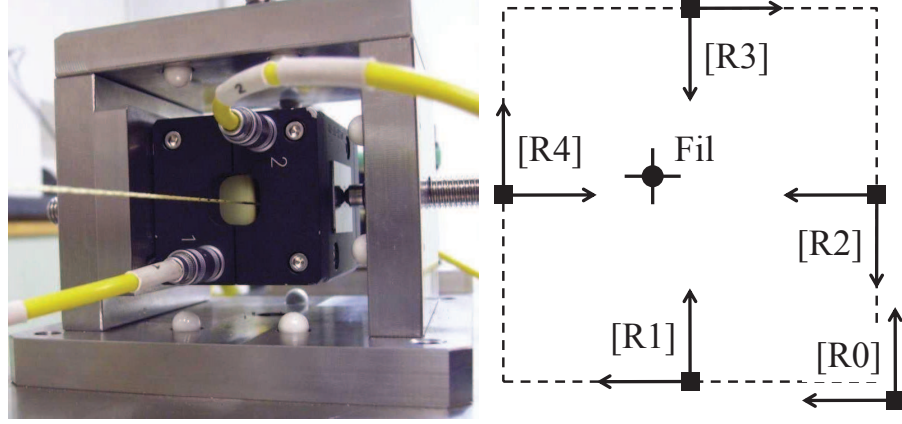


FIG. 3.5 – Calibration du système d'axe des WPS

rapport entre les nombres d'observations et d'inconnues est égal à deux.

$$\forall i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad M = t_i + r_i \times (\tau + \rho \times L) \quad (3.31)$$

L'équation d'observation utilisée pour calculer la solution ajustée est basée sur les deux changements de repère successifs en formule 3.31 : du système d'axe au centrage (matrices  $\tau$  et  $\rho$ ) et de ce dernier au repère général du banc (matrices  $t_i$  et  $r_i$ ).  $M$  contient les coordonnées du point mesuré du fil dans le repère du banc.  $L$  contient les lectures du capteur (voir les définitions en 3.32).

$$M = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} l_t \\ l_v \\ 0 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

$$\rho = Rot_z(\rho_z) = \begin{bmatrix} \cos \rho_z & \sin \rho_z & 0 \\ -\sin \rho_z & \cos \rho_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

L'équation d'observation est obtenue en isolant les observations, c'est-à-dire en écrivant la transformation inverse en formule 3.33. Les références utilisés dans cet ajustement sont les lectures des capteurs. La précision considérée est  $1 \mu\text{m}$ . Les matrices de translation et de rotations,  $t_i$  et  $r_i$ , sont calculées à partir de la mesure du banc de calibration par une CMM LEITZ, en Allemagne, dont l'incertitude de mesure est de  $0.6 \mu\text{m} \pm 1.6 \text{ppm}$  (voir la figure 3.6).

### 3.3 Métrologie et calibrations

$$L = \rho^t \times (r_i \times (M - t_i) - \tau)$$

$$\left[ \begin{array}{c} l_t \\ l_v \\ 0 \end{array} \right] = [Rot_z(\rho_z)]^t \times \left( r_i^t \times \left( \left[ \begin{array}{c} x \\ y \\ z \end{array} \right] - t_i \right) - \left[ \begin{array}{c} \tau_x \\ \tau_y \\ 0 \end{array} \right] \right) \quad (3.33)$$

#### 3.3.2.3 Résultats des calibrations des WPS



 <b>Quindos Messprotokoll</b> 							
<b>Hexagon Metrology GmbH      Sigmund-Hiepe-Str. 2-12      D-35578 Wetzlar</b> <b>Abteilung : Anwendungstechnik UHA</b>							
Bezeichnung	Bank etalonnage	Hersteller	CERN				
Zeichnungs-Nr.		Seriennummer					
Bemerkung	Temperature: 20.94°C	Sachnummer					
Laufende Nummer		Auftrag					
Prüfer	A. Reinus	Abteilung	Application dep. Leitz				
Messgerät	PMC 16 12 10 #329	Prüfdatum	11-MAY-2010, 12:19:17				
Text	Ausw.	Istmaß	Nennmaß	o.Tol.	u.Tol.	Ist-So11	Grafik
Uncertainty of measurement: 0.6µm + L / 600							

FIG. 3.6 – Paramètres des mesures du banc d'étalonnage par la CMM

En effectuant exactement les mêmes calculs vectoriels que ceux vus précédemment, les quatre repères orthonormés directs, définis chacun par un centre et trois vecteurs, sont déterminés. Les matrices de translations et de rotations sont directement obtenues à partir de ces quatre objets (voir la formule 3.34).

$$\left\{ \begin{array}{l} t_i = [O_i] \\ r_i = [\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z] \end{array} \right. \quad (3.34)$$

Les trois angles de rotations élémentaires autour de chacun des trois axes sont calculés. Pour chacun des quatre repères de centrage, six paramètres sont obtenus. A partir des vraies mesures de calibration, ce calcul a été simulé par la méthode de Monte-Carlo en considérant un écart-type CMM de 1 µm. Les écarts-types des six paramètres définissant chacun des quatre repères sont présentés dans la table 3.1.

Malheureusement, cette méthode de calibration s'est avérée incapable d'ajuster avec précision, à la fois les translations et le roulis des capteurs

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

TAB. 3.1 – écarts-types des repères de centrage du banc

Repère	Longitudinal	Transversal	Vertical
$\{R_1\}$	1.2 $\mu\text{m}$	1.2 $\mu\text{m}$	1.2 $\mu\text{m}$
$\{R_2\}$	1.2 $\mu\text{m}$	2.0 $\mu\text{m}$	2.0 $\mu\text{m}$
$\{R_3\}$	1.2 $\mu\text{m}$	3.5 $\mu\text{m}$	1.2 $\mu\text{m}$
$\{R_4\}$	1.2 $\mu\text{m}$	2.0 $\mu\text{m}$	2.0 $\mu\text{m}$

Repère	Roulis	Tangage	Lacet
$\{R_1\}$	66 $\mu\text{rad}$	18 $\mu\text{rad}$	20 $\mu\text{rad}$
$\{R_2\}$	67 $\mu\text{rad}$	20 $\mu\text{rad}$	18 $\mu\text{rad}$
$\{R_3\}$	67 $\mu\text{rad}$	18 $\mu\text{rad}$	20 $\mu\text{rad}$
$\{R_4\}$	67 $\mu\text{rad}$	20 $\mu\text{rad}$	18 $\mu\text{rad}$

WPS. Ce problème est vraisemblablement dû à des défauts de linéarité et d'orthogonalité des mesures obtenues en appliquant les polynômes de calibration de FOGALE NANOTECH. Ceux-ci seront plus largement décrits dans le paragraphe 4.4.2.2.

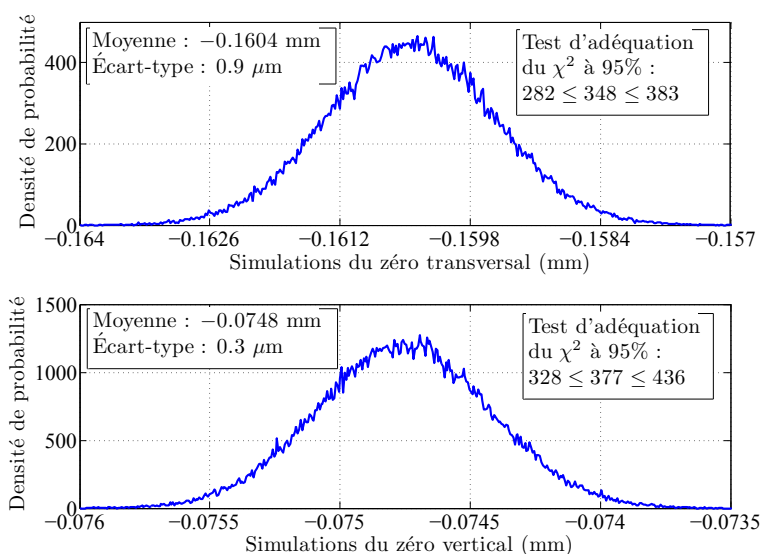


FIG. 3.7 – Calibration du zéro du WPS W96-002

Les calculs d'ajustement de la calibration des WPS ont ainsi été faits en fixant le roulis des capteurs à une valeur de  $\pi$  (et non pas zéro du fait que le système d'axe des WPS est inversé par rapport à celui du repère de centrage, voir le schéma en figure 2.37). Le calcul a été simulé selon la méthode de Monte-Carlo. Les offsets calculés ont d'excellents écarts-types : 0.9  $\mu\text{m}$  en

### 3.3 Métrologie et calibrations

TAB. 3.2 – Résultats des calibrations de 17 WPS

Capteur	$\tau_x$ (mm)	$\tau_y$ (mm)	$\sigma_x$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_y$ ( $\mu\text{m}$ )	Corrélation
W96-002	-0.1604	-0.0748	0.90	0.33	-0.7 %
W96-003	-0.0125	0.0102	0.92	0.33	-0.6 %
W96-007	-0.0140	-0.5039	0.91	0.32	-0.4 %
W96-008	-0.0031	-0.5247	0.90	0.33	-1.3 %
W96-009	-0.3975	-0.0620	0.91	0.33	-1.3 %
7D4-005	-0.0729	-0.0542	0.91	0.35	-0.7 %
7D4-044	-0.0804	0.1223	0.92	0.39	-0.2 %
7D5-036	-0.1774	-0.0562	0.91	0.32	-1.5 %
7D7-006	-0.3514	0.0183	0.91	0.32	-1.0 %
7D7-007	-0.1307	-0.0037	0.94	0.35	-0.1 %
7D7-008	-0.4932	-0.0045	0.93	0.32	-0.8 %
7D7-009	-0.2242	0.0196	0.94	0.33	0.0 %
7D7-010	-0.5224	-0.0306	0.91	0.32	-0.4 %
7D7-012	-0.0837	-0.0027	0.90	0.33	-0.8 %
7D7-013	-0.1010	-0.0190	0.90	0.33	-0.6 %
7D7-015	-0.0598	-0.0075	0.90	0.33	-0.8 %
7D7-021	-0.1025	-0.0103	0.89	0.33	-1.0 %

transversal et  $0.3 \mu\text{m}$  en vertical (voir la figure 3.7 et la table 3.2).

En contrepartie de la non-détermination du roulis du capteur, un calcul de robustesse, incluant un test de détection de faute et le calcul de la plus grande faute non détectable, a été effectué. Parmi les 17 capteurs WPS calibrés, aucune faute certaine n'a été détectée (empiriquement, la faute certaine correspond à une observation pour laquelle la valeur absolue du résidu normé est supérieure à 4 [Durand, 2004]). La moitié des capteurs ont présenté un risque de faute potentielle (la valeur absolue du résidus normé est comprise entre 2.5 et 4 [Durand, 2004]). Cependant, pour aucun d'entre eux le risque ne se présentait dans les réalisations des simulations à une fréquence supérieure à 2 %. En toute rigueur, la détection de faute sur les résidus normés s'effectue à l'aide d'un test statistique basé sur la loi de Student selon une probabilité fixée, par exemple, à 95% [Durand, 2004]. Comme la détection de fautes prenait place dans un processus de simulations, sur 100 000 tirages, la mise en évidence de 5% d'entre eux au-dessus du seuil de la loi de Student ne présentait pas grand intérêt. C'est la raison pour laquelle un seuil empirique de détection de faute a été retenu.

Les plus grands résidus des 17 capteurs calibrés sont situés entre  $24 \mu\text{m}$  et  $48 \mu\text{m}$ . La médiane est de  $26 \mu\text{m}$ . Parmi les 17 capteurs, le pire effet de la plus grande faute non-détectable sur les zéros est de  $6.2 \mu\text{m}$  en transversal et de  $4.7 \mu\text{m}$  en vertical.

Ces résultats représentent la limite actuellement impossible à franchir



### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

pour la calibration absolue des WPS. Elle est due au problème du roulis qui, selon les résidus, a un ordre de grandeur de quelques milliradians. Fort heureusement, une solution existe. Comme il s'agit d'une rotation, ce paramètre a aussi un effet sur la linéarité du capteur, qui elle-même doit être calibrée indépendamment. Ainsi, si la calibration de la linéarité s'effectue dans le même système d'axe que celui des trois billes de centrage forcé, alors le polynôme obtenu intègrera nécessairement le roulis du capteur.

Le CERN est actuellement en train de développer son propre banc de calibration de la linéarité des capteurs WPS. La nécessité d'inclure le roulis a été ajoutée aux spécifications du banc. Le problème de la justesse de ces capteurs devrait ainsi être résolu prochainement.

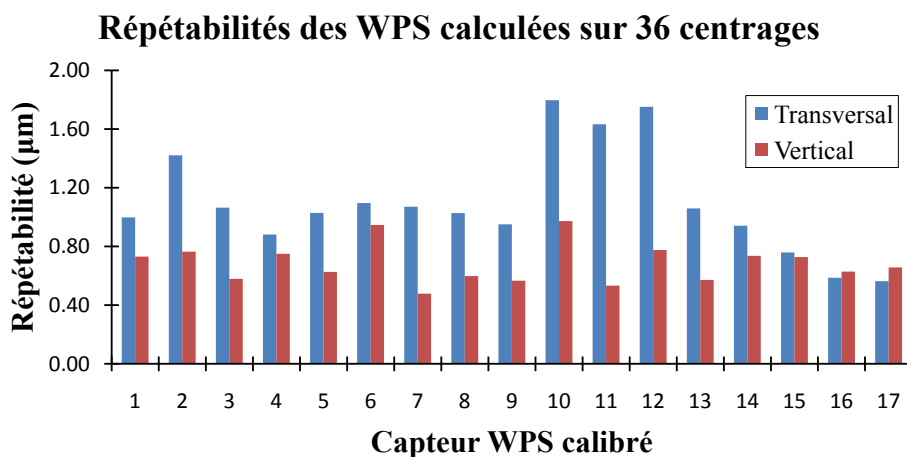


FIG. 3.8 – Répétibilités du centrage de 17 capteurs WPS, calculées lors de la calibration de leurs zéros

Accessoirement, lors de la calibration du zéro des WPS, il a fallu répéter le centrage des capteurs sur les différents repères du banc. Pour chaque calibration, 36 centrages ont été faits. Il a été possible d'en extraire la répétabilité. Celle-ci allait, en fonction du WPS calibré, de  $0.6\ \mu\text{m}$  à  $1.8\ \mu\text{m}$  en transversal, et de  $0.5\ \mu\text{m}$  à  $1.0\ \mu\text{m}$  en vertical, avec des valeurs médianes respectives de  $1.0\ \mu\text{m}$  et  $0.7\ \mu\text{m}$  [Touzé, 2010a] (voir la figure 3.8). Ce résultat valide l'hypothèse faite de considérer les incertitudes des lectures des WPS à  $1\ \mu\text{m}$ .

### 3.3.3 Centrage et calibration des autres capteurs

#### 3.3.3.1 Calibration des HLS

Le capteur HLS, produit par FOGALE NANOTECH, mesure la distance depuis son zéro électrique jusqu'à la surface d'eau selon un principe capacitif. Il fournit un signal analogique, compris entre 0 et 10 V qui correspond à des distances allant de 5 à 10 mm [Herty, 2009]. La linéarité du capteur est

étalonnée. Un polynôme de degré 3, fournit par le fabricant, permet d'avoir des résidus d'écart-types égaux à  $1\ \mu\text{m}$  [Herty, 2009].

La section des géomètres du CERN s'est dotée de son propre banc de calibration de la linéarité des HLS. En effet, le taux de radiation auquel les capteurs seront soumis lors de l'activité du LHC à pleine puissance, interdira de les sortir de l'enceinte du CERN. Si une nouvelle calibration d'un capteur s'avère nécessaire, il faudra qu'elle ait lieu sur place.

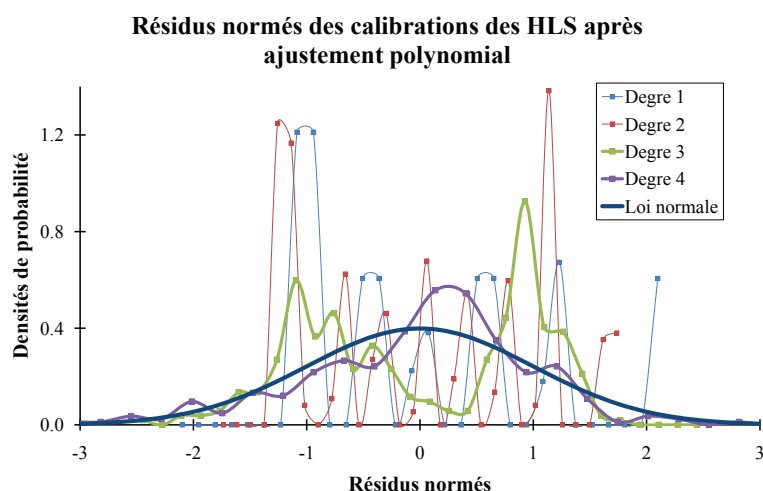


FIG. 3.9 – Distribution des résidus normés des HLS

En mai 2008, lors de la finalisation de ce banc, les distributions des résidus ont été étudiées dans le but de déterminer le polynôme de calibration le plus adapté. Il ne s'agissait pas seulement d'optimiser l'écart-type des résidus, mais aussi de supprimer tout signal déterministe dans les résidus, c'est-à-dire d'obtenir des résidus suivant, au plus près, une loi normale. En appliquant un polynôme de degré 3, l'écart-type obtenu était de  $0.4\ \mu\text{m}$ . Cependant la courbe des résidus normés (voir la figure 3.9) montre deux pics de part et d'autre de l'espérance mathématique. Ce phénomène est dû aux effets de bords.

Le polynôme de degré 4, quant à lui, permet d'obtenir un écart-type encore meilleur,  $0.1\ \mu\text{m}$ , mais aussi une distribution des résidus visuellement plus proche de la loi normale. A l'issue de ces calculs, il a été décidé d'utiliser un polynôme du quatrième degré pour calibrer la linéarité des capteurs HLS.

Si la linéarité des capteurs HLS est excellente, elle n'est pas la seule composante de la précision de ces systèmes de mesures. Comment déduire de la lecture du capteur l'altitude du niveau d'eau en ce lieu ? Celle-ci est obtenue en mesurant la distance entre le zéro électrique du capteur jusqu'au centre de la sphère TAYLOR HOBSON qui se loge sur le dessus de ce dernier (voir la figure 3.10). Pour ce faire une jauge de mesure verticale TRIMOS 0-700 est utilisée. Cette dernière, contrôlée au laboratoire de métrologie du

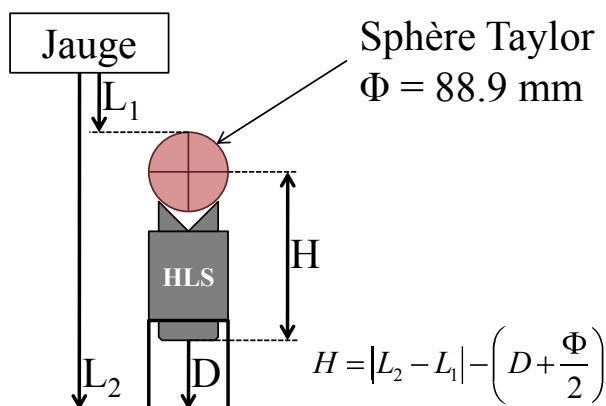


FIG. 3.10 – Calibration du zéro des HLS

CERN, a une précision de  $0.6 \mu\text{m}$  (écart-type des différences entre les mesures de la jauge et les hauteurs des cales calibrées utilisées) [Pugnat, 2010].

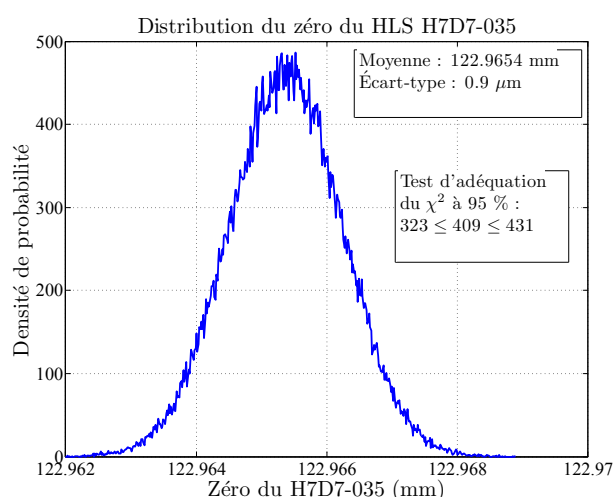


FIG. 3.11 – Simulations de la calibration du zéro d'un HLS

Sept capteurs utilisés au TT1 ont vu leurs zéros calibrés selon cette méthode. A partir des lectures de la jauge et des capteurs, ces différentes calibrations ont été simulées selon la méthode de Monte-Carlo de propagation des distributions. Les sept écarts-types obtenus étaient similaires et égaux à  $0.9 \mu\text{m}$  (voir la distribution en figure 3.11 et la table 3.3).

Comme la procédure de calibration impliquait trois serrages successifs du capteur sur son support, ce résultat inclut la répétabilité du centrage, même si cette dernière n'a pas été quantifiée. Les incertitudes considérées pour ces simulations étaient distribuées selon une loi normale d'écart-type égal à  $1 \mu\text{m}$ , que ce soit pour les lectures de la jauge que pour celles des HLS.

### 3.3 Métrologie et calibrations

TAB. 3.3 – Résultats des calibrations des sept HLS du TT1

Capteur	Moyenne	écart-type	$\gamma_1$	$\chi^2$	$\gamma_2$
H7D7-035	122.9654 mm	0.86 $\mu\text{m}$	323	409	431
H7D7-037	122.9765 mm	0.87 $\mu\text{m}$	311	353	417
H7D7-005	122.9690 mm	0.87 $\mu\text{m}$	302	339	406
H7D7-004	122.9720 mm	0.87 $\mu\text{m}$	315	367	421
C01R01C7	122.9885 mm	0.87 $\mu\text{m}$	333	367	442
H7D7-039	122.9883 mm	0.86 $\mu\text{m}$	324	352	432
I04R03C1	123.0240 mm	0.87 $\mu\text{m}$	297	378	401

Même si ces incertitudes sont conservatives par rapport aux valeurs fournies précédemment, ce résultat de la calibration des HLS est vraisemblablement optimiste. En effet, le contact entre la jauge et la partie supérieure de la sphère (voir la figure 3.10), ainsi que la sphéricité et le diamètre de cette même sphère sont sans doute des sources d'erreur. Or cela n'a pas été pris en considération dans le calcul.

Enfin, aucune nouvelle interface n'a été développée pour optimiser le centrage des HLS. Comme ceux-ci ne mesurent que selon un axe, ils sont peu sensibles au roulis et au tangage qui n'engendrent qu'une erreur de second ordre sur la mesure.

Soit  $H$  la distance calibrée entre le centre de la sphère Taylor et le zéro électrique du capteur (voir la figure 3.10). Du fait des tolérances d'assemblage du HLS, la distance  $H$  est égale à  $123 \text{ mm} \pm 50 \mu\text{m}$ .  $D$  est la distance mesurée par le capteur allant de son zéro à la surface observée. La longueur maximale observable est 10 mm. En considérant  $\gamma$  comme étant l'erreur de verticalité du capteur, quelle est la limite que cet angle ne doit pas dépasser pour engendrer une erreur de distance  $\varepsilon$  inférieure à  $2 \mu\text{m}$  ?

$$\varepsilon = (D_{max} + H) \cdot (1 - \cos \gamma) \quad (3.35)$$

Selon la formule 3.35,  $\varepsilon$  est inférieur à  $2 \mu\text{m}$  si  $\gamma$  ne dépasse pas  $0.3^\circ$ . Ainsi, pour l'utilisation des HLS, il est certes nécessaire de verticaliser le capteur sur sa plaque métrologique, puis d'horizontaliser cette dernière, cependant, la précision à atteindre ne requiert pas d'instrumentation autre que les systèmes de nivellement standards. En d'autres termes, le développement d'un nouveau système de centrage pour les HLS n'est pas requis.

#### 3.3.3.2 Centrage forcé des inclinomètres

Du fait de l'efficacité du système isostatique à centrage forcé des WPS, il a été décidé de l'adapter à des inclinomètres. Comme ces derniers étaient de taille plus réduite et qu'il fallait être en mesure de les fixer sur les plaques

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

invar du TT1 à l'aide de taraudages déjà percés, les dimensions sont à celles pour les WPS.

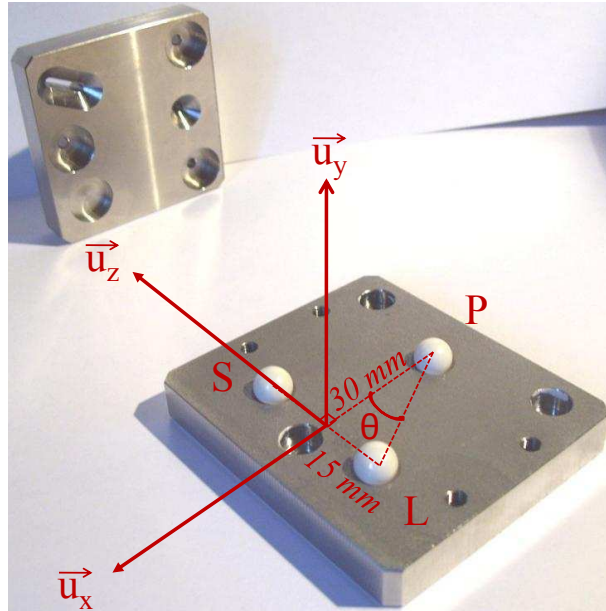


FIG. 3.12 – Interface isostatique des inclinomètres

La manière de définir le système d'axes du repère de centrage est similaire à celle des WPS (voir la figure 3.12). Le point  $P$  est le centre de la bille fixée en position.  $L$  est celui de la bille couissant le long d'un axe.  $S$  est le centre de la fixe au contact contre une surface.

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{u}_y = \frac{1}{\|\vec{PS} \wedge \vec{PL}\|} \cdot \vec{PS} \wedge \vec{PL} \\ \vec{n} = \frac{1}{\|\vec{PL}\|} \cdot \vec{PL} \\ \vec{p} = \vec{u}_y \wedge \vec{n} \end{array} \right. \quad (3.36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \tan^{-1} \frac{1}{2} \\ \vec{u}_x = \cos \theta \cdot \vec{n} - \sin \theta \cdot \vec{p} \\ \vec{u}_z = \vec{u}_x \wedge \vec{u}_y \end{array} \right. \quad (3.37)$$

### 3.3 Métrologie et calibrations

Initialement, aucun inclinomètre n'était à disposition pour les expériences visant à démontrer la faisabilité du pré-alignement du CLIC, notamment au TT1. Néanmoins quelques capteurs ont été démontés des anciennes expériences du groupe. Huit inclinomètres biaxiaux *tilt measuring system* (TMS), produits par Fogale Nanotech, et cinq monoaxes JA5L<sup>4</sup> ont été ainsi récupérés. Leurs fichiers de calibration ayant été perdus, il fallait avant tout s'atteler à l'étalonnage de leurs linéarités respectives.

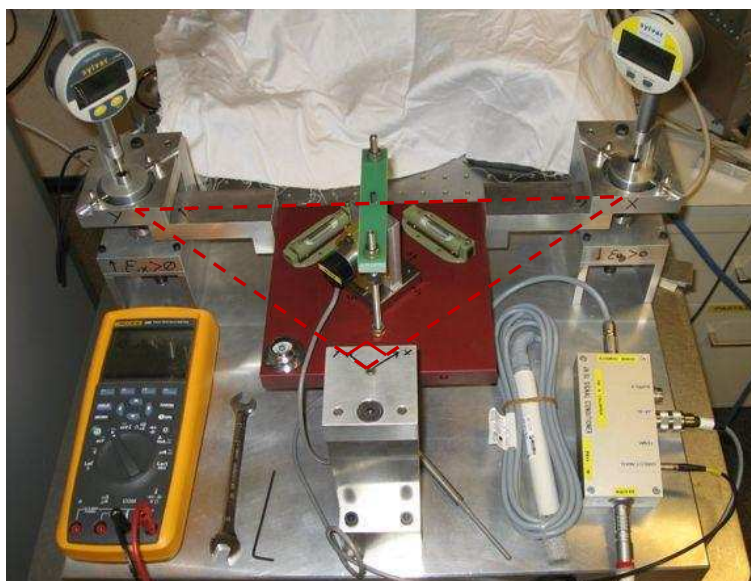


FIG. 3.13 – Un inclinomètre JA5L en cours de calibration

Pour ce faire, un banc de calibration pour inclinomètre biaxial a été conçu (voir la figure 3.13). La référence angulaire pour la calibration est constituée par un plateau triangulaire basculant dont les trois sommets sont des sphères mesurées en métrologie qui forment un triangle rectangle isocèle de 30 cm de côté avec une précision de 3  $\mu\text{m}$ . Le basculement de ce plateau est contrôlé par deux capteurs de déplacement dont la résolution est 1  $\mu\text{m}$ .

Les capteurs TMS de FOGALE se sont avérés inutilisables. Ayant été soumis à des radiations par le passé, leurs électroniques étaient hors service. Il ne restait que les cinq JA5L qui ont été calibrés. Un polynôme de degré trois permettait d'atteindre un écart-type sur les résidus de 9.8  $\mu\text{rad}$  tout en assurant une distribution satisfaisante (voir la figure 3.14).

Sur la figure 2.39 au paragraphe 2.4.3.1, la définition générale de la mesure d'un inclinomètre est schématisée. Le capteur mesure les angles de la projection de la direction de la verticale  $\zeta$  contre deux plans orthogonaux. La relation 3.38 est obtenue.

<sup>4</sup>Inclinomètre produit par SENSOREX.

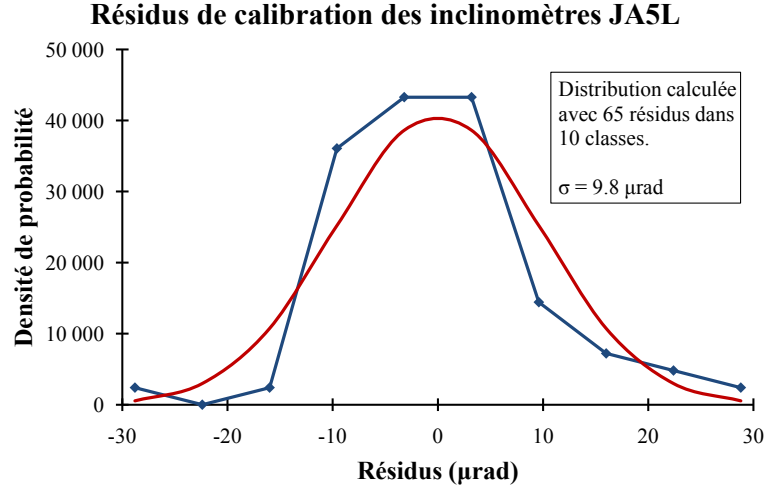


FIG. 3.14 – Résidus des calibrations de la linéarité des JA5L

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \vec{\zeta} \right]_{\text{Incl}} = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \omega \end{bmatrix} = \omega \cdot \begin{bmatrix} \tan \theta_x \\ \tan \theta_y \\ 1 \end{bmatrix} \\ \text{avec} \\ \omega = \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2} = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}} \end{array} \right. \quad (3.38)$$

L'objectif de l'utilisation des inclinomètres dans le pré-alignement du CLIC est de déduire des lectures de ces capteurs l'orientation des objets desquels ils sont solidaires. Pour ce faire, il faut connaître l'orientation du repère de mesures de chaque inclinomètre par rapport au système d'axe des trois billes. La calibration de cette orientation consiste à déterminer les trois angles d'une matrice de rotation  $\rho$  selon l'équation matricielle 3.39.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \vec{\zeta} \right]_{3 \text{ billes}} = r \times \rho \times \begin{bmatrix} \omega \cdot \tan \theta_x \\ \omega \cdot \tan \theta_y \\ \omega \end{bmatrix} \\ \text{avec} \\ r = [ \vec{u}_x \quad \vec{u}_y \quad \vec{u}_z ] \end{array} \right. \quad (3.39)$$

D'après les propriétés des matrices de rotations, la matrice  $r$  dans l'équation 3.39 se calcule à l'aide des trois vecteurs du repère euclidien des trois billes de centrage forcé. De ce fait, si le repère de centrage est connu, par des méthodes métrologiques par exemple, l'équation 3.39 correspond à une relation ayant trois observations pour six inconnues, en l'occurrence les coordonnées de la direction de la verticale et les trois angles de la matrice de



### 3.3 Métrologie et calibrations

---

rotation  $\rho$ . En supposant qu'il y ait à disposition un objet comportant un minimum de trois repères connus de centrage d'inclinomètre, suffisamment proches les uns des autres pour supposer la direction de la verticale comme étant constante dans l'espace, alors il devient possible de calibrer l'orientation absolue de l'inclinomètre. Cependant, une restriction apparaît dans cette équation. Pour déduire une orientation absolue avec un inclinomètre, celui-ci doit être biaxial. Sans cela le problème ne peut être résolu.

De ce fait, un problème apparaît avec les inclinomètres à disposition pour la validation expérimentale du pré-alignement dans le tunnel du TT1. Ceux-ci ne mesurant que selon un seul axe, il est exclu d'obtenir des orientations absolues à l'aide de leurs mesures. Cela tient au fait que la compréhension rigoureuse des mesures des inclinomètres a nécessité une longue maturation. Le temps que celle-ci aboutisse, ces capteurs avaient déjà été calibrés en linéarité puis installés sur leurs supports dans l'expérience du TT1 (voir la figure 3.15). Ce manquement peut s'expliquer par le fait que les recherches sur le pré-alignement du CLIC se soient focalisées par le passé sur les systèmes de mesure les plus importants, à savoir les WPS et les HLS, au détriment des inclinomètres.

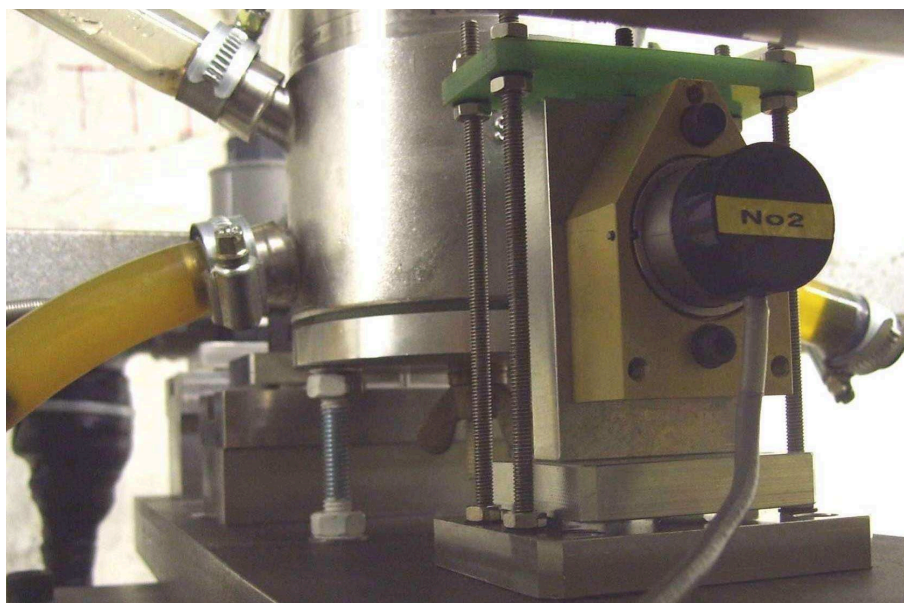


FIG. 3.15 – Inclinomètre JA5L installé au TT1

Pour calibrer l'orientation absolue d'inclinomètres biaxiaux avec redondance, selon l'équation 3.39, il faut disposer d'un minimum de trois repères de centrages connus les uns par rapport aux autres. Un tel banc n'ayant pas encore été réalisé, les tests ont été faits à partir du matériel à disposition, notamment celui développé pour la linéarité des inclinomètres. Celui-ci dispose de deux repères de centrage calibrés en métrologie (voir la figure 3.16).

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

Les simulations ont été menées en considérant un inclinomètre biaxial ayant pour incertitude de mesure sur chacun de ses axes celle constatée pour les JA5L, à savoir  $9.8 \mu\text{rad}$ . Pour pouvoir résoudre le système, composé de fait par six observations, un des six paramètres à ajuster — le lacet — a été fixé à zéro.



FIG. 3.16 – Repères de centrage du banc de calibration

Les calibrations des orientations des inclinomètres ont été simulées selon la méthode de Monte-Carlo en faisant varier l'incertitude de mesure de la CMM, de  $1 \mu\text{m}$  à  $6 \mu\text{m}$ . La CMM OLIVETTI utilisée par la métrologie pour la vraie mesure du banc avait une incertitude de  $3 \mu\text{m}$ <sup>5</sup>. Une incertitude de  $1 \mu\text{m}$  sera bientôt atteignable au CERN (lire le paragraphe 3.3.4).

TAB. 3.4 – Résultats des calibrations des cinq inclinomètres JA5L

Capteur	Roulis	écart-type	Tangage	écart-type
JA5L-01	-2.898 mrad	29 $\mu\text{rad}$	-0.100 mrad	33 $\mu\text{rad}$
JA5L-02	-4.401 mrad	29 $\mu\text{rad}$	-0.100 mrad	33 $\mu\text{rad}$
JA5L-03	-2.419 mrad	29 $\mu\text{rad}$	-0.100 mrad	33 $\mu\text{rad}$
JA5L-09	-4.619 mrad	29 $\mu\text{rad}$	-0.100 mrad	33 $\mu\text{rad}$
JA5L-10	-5.762 mrad	29 $\mu\text{rad}$	-0.100 mrad	33 $\mu\text{rad}$

La table 3.4 apporte les incertitudes des orientations des inclinomètres en considérant une incertitude de CMM de  $1 \mu\text{m}$ . Celles-ci sont de l'ordre de  $30 \mu\text{rad}$ , ce qui correspond à une erreur de  $1 \mu\text{m}$  à  $30 \text{mm}$ , la longueur de la base du système des trois billes employé. Si cette incertitude doit être améliorée, il faut alors rallonger au maximum la longueur de cette base.

<sup>5</sup>Valeur déduite du fait que sa tolérance est donnée, à  $2\sigma$ , à  $6 \mu\text{m}$

### 3.3.4 Métrologie et mesures CMM

#### 3.3.4.1 Laboratoire de métrologie du CERN

Le laboratoire de métrologie du CERN, dirigé par M. Ahmed Chérif, est attaché au groupe d'ingénierie mécanique et des matériaux, lui-même inclus au département d'ingénierie<sup>6</sup>. Ce laboratoire est en charge du contrôle dimensionnel des différentes pièces nécessitant de très grandes qualités d'usinage pour le bon fonctionnement des accélérateurs et des expériences du CERN.

En plus de disposer d'une large gamme d'instrumentation pour le contrôle des pièces de dimensions modestes, le laboratoire de métrologie du CERN est doté de CMM permettant de mesurer des objets beaucoup plus importants avec une incertitude de mesure micrométrique. Jusqu'à présent, seule un CMM OLIVETTI, d'incertitude de mesure de  $6\ \mu\text{m}$  à  $2\sigma$ , était disponible. Du fait des contraintes d'usinage particulièrement audacieuses des cavités accélératrices du CLIC, ce laboratoire a récemment fait l'acquisition d'une CMM INFINITY fournie par la filiale LEITZ du groupe HEXAGON (voir la figure 3.17).



FIG. 3.17 – La CMM Leitz, opérationnelle au CERN le 9 novembre 2010

L'incertitude de mesure à  $2\sigma$  de cette machine est de  $0.3\ \mu\text{m} + 1\ \text{ppm}$ . Cette CMM est capable de fournir les coordonnées de points dans un volume de  $1200\ \text{mm} \times 100\ \text{mm} \times 700\ \text{mm}$ . La mesure s'effectue par contact, à l'aide d'un palpeur. De telles incertitudes de mesure impliquent une utilisation dans

<sup>6</sup>CERN EN-MME

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

un environnement adapté. De ce fait, les métrologues du CERN ont créé, dans leur laboratoire climatisé, une enceinte spéciale au sein de laquelle la température est contrôlée dans le temps et dans l'espace à  $\pm 0.1$  °C par heure et par mètre. Cette CMM est opérationnelle depuis le 9 novembre 2010.

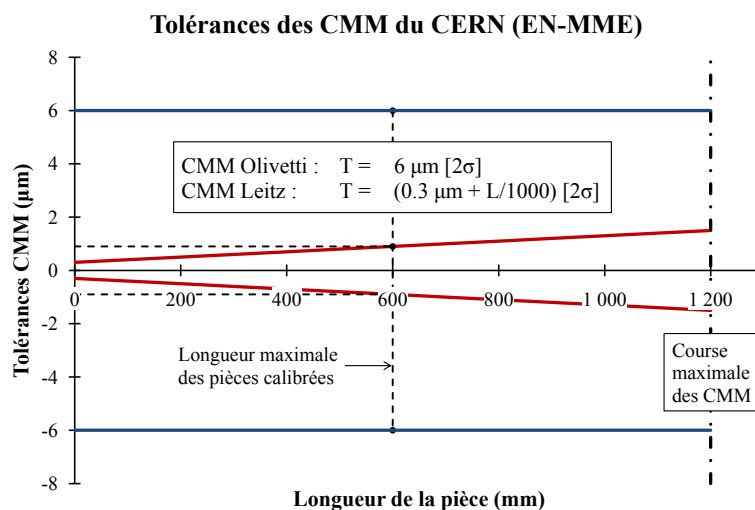


FIG. 3.18 – Tolérances des CMM du laboratoire de métrologie du CERN

Les pièces nécessaires aux recherches sur le pré-alignement du CLIC qui ont été contrôlées par le laboratoire de métrologie du CERN, à savoir les plaques métrologiques en invar et les divers bancs de calibration, avaient au maximum des dimensions de 600 mm. De ce fait, la comparaison des incertitudes de mesures pouvant être atteintes avec les CMM OLIVETTI et LEITZ sont sans appel : 6  $\mu\text{m}$  contre 0.9  $\mu\text{m}$  (voir le graphique en figure 3.18). Ces valeurs sont des *maximum permissible error* (MPE), c'est-à-dire les plus grandes erreurs permises.

De ce fait, dans les différentes étapes des simulations du pré-alignement du CLIC, les calculs ont été menés en faisant varier l'écart-type des mesures CMM de 1  $\mu\text{m}$  à 6  $\mu\text{m}$ . De cette manière, il était possible de mettre en évidence la situation actuelle et celle qui pourra être atteinte prochainement. La limite inférieure a été volontairement choisie à 1  $\mu\text{m}$ . En effet, les conditions météorologiques n'étant pas aussi contrôlées dans les expériences que dans le laboratoire de métrologie, un écart-type sub-micrométrique n'aurait aucun sens.

#### 3.3.4.2 Construction des systèmes de coordonnées

Les plaques métrologiques ont été apportées au laboratoire de métrologie pour être mesurées à l'aide d'une CMM. Les points observés sont les centres des billes de 8 mm constituant les systèmes de centrage des WPS et des inclinomètres. De plus, le centre de la sphère TAYLOR HOBSON de diamètre

88.9 mm, constituant la référence externe des capteurs HLS, est mesuré. A cela s'ajoute des réflecteurs sphériques de 38.1 mm, utilisés par les tachéomètres et les *lasers trackers*, qui se logent dans l'alésage conique au centre des interfaces des WPS (voir la vue conception assistée par ordinateur (CAO) en figure 3.19).

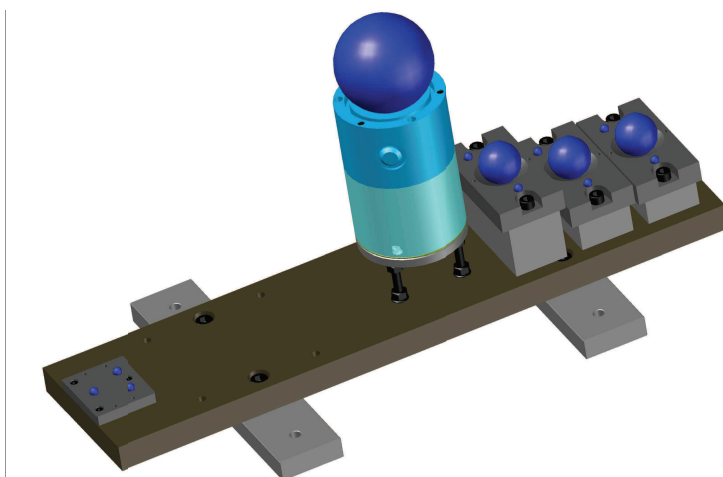


FIG. 3.19 – Vue des points d'une plaque, mesurés en métrologie

Ces réflecteurs servent à assurer le lien entre la topométrie de précision et la plaque. L'objectif, à terme, est de définir la transformation permettant d'aller du repère de la plaque au repère général. Certains degrés de liberté de cette transformation vont être fournis par la topométrie de précision. Pour ce faire, il est nécessaire de disposer d'un minimum de trois points connus dans le repère euclidien général et celui de chaque plaque. C'est là le rôle des réflecteurs de 38.1 mm et aussi celui de la sphère TAYLOR HOBSON.

De manière à minimiser l'influence de l'incertitude des mesures CMM sur les coordonnées de tous ces points dans le système de la plaque, ce dernier doit être construit à l'aide des points les plus distants les uns des autres. Sur la figure 3.19, il est possible de deviner lesquels vont être choisis pour construire le repère de la plaque. La sphère centrale du repère de l'inclinomètre, la boule TAYLOR HOBSON et le réflecteur de 38.1 mm sur l'interface WPS au bord de la plaque appartiennent, à peu de choses près, au plan transversal passant par le milieu de la plaque. De plus leurs centres sont situés aux extrêmes de la plaque.

Soit  $I$  le centre de la sphère centrale du repère de l'inclinomètre de la plaque (voir la figure 3.20).  $T$  est le centre de la sphère TAYLOR HOBSON se logeant sur le dessus du capteur HLS. Enfin,  $R$  est le centre du réflecteur de 38.1 mm se logeant au centre de l'interface du WPS au bord de la plaque. Le point  $R'$  est obtenu en attribuant la coordonnée verticale de  $I$  à  $R$ . L'axe longitudinal  $\vec{u}_z$  du repère de la plaque est le vecteur normé orthogonal au

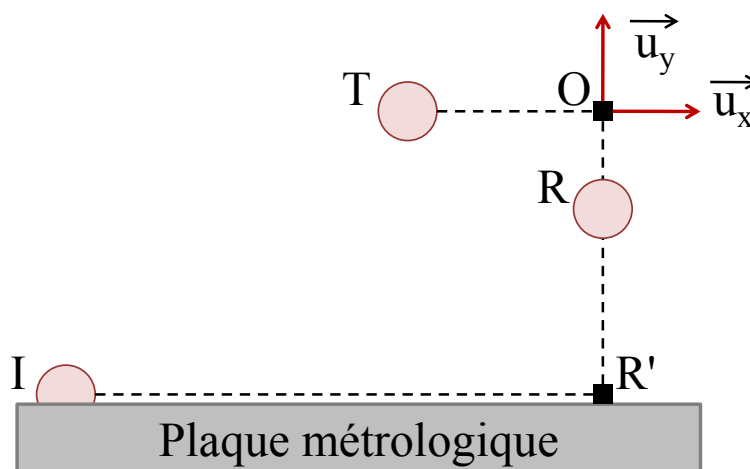


FIG. 3.20 – Construction du repère de la plaque

plan passant par  $I$ ,  $T$  et  $R'$  (voir l'équation 3.40).

$$\vec{u}_z = \frac{1}{\|\vec{IR}' \wedge \vec{IT}\|} \cdot \vec{IR}' \wedge \vec{IT} \quad (3.40)$$

L'axe transversal est donné par l'axe passant par les points  $I$  et  $R'$ . Le dernier axe est obtenu par produit vectoriel de manière à former une base orthonormée directe. L'origine du repère  $O$  est obtenu en projetant, par un produit scalaire, le point  $T$  sur l'axe vertical passant par  $R'$  (voir les relations en 3.41). De ce fait, l'origine de la plaque est déterminée, en transversal, par un des WPS et, en vertical, par le réseau hydrostatique.

$$\begin{cases} \vec{u}_x = \frac{1}{\|\vec{IR}'\|} \cdot \vec{IR}' \\ \vec{u}_y = \vec{u}_z \wedge \vec{u}_x \\ O = R' + (\vec{R'T} \cdot \vec{u}_y) \cdot \vec{u}_y \end{cases} \quad (3.41)$$

Une fois les repères des plaques définis, les coordonnées des points mesurés par la CMM sont exprimées dans ces derniers. Les opérations vectorielles présentées aux paragraphes 3.3.2.1 et 3.3.3.2 sont appliquées de manière à construire les repères euclidiens de centrage des capteurs.



#### 3.3.4.3 Résultats expérimentaux et simulés

La plaque métrologique représentée en figure 3.21 est issue du développement effectué pour l'expérience du TT1. Il s'agit de la plaque qui assure le recouvrement des trois fils tendus de cette expérience. Elle correspond, de ce fait, à la configuration maximale du réseau métrologique de référence, celle qui implique le plus de capteurs (voir le schéma en figure 2.28 au paragraphe 2.3.3.3).

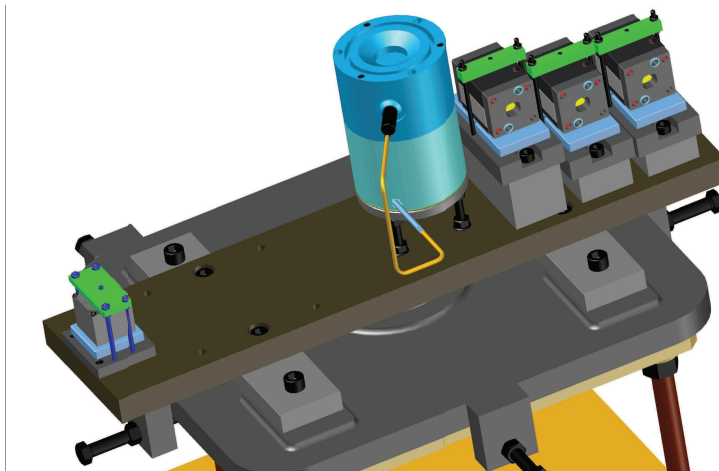


FIG. 3.21 – Vue de la même plaque avec ses capteurs

Partant de ce principe, sur chaque plaque métrologique, un minimum de quatre repères de centrage devront être définis — celui du HLS, celui de l'inclinomètre et ceux de deux WPS. Lorsqu'il s'agira d'une plaque assurant le recouvrement des fils, il faudra ajouter un cinquième repère correspondant à un troisième WPS.

Les résultats présentés ci-après proviennent des mesures CMM des plaques métrologiques en invar, utilisées dans l'expérience du TT1, par le laboratoire de métrologie du CERN en avril 2010. A ces mesures ont été attribuées une erreur aléatoire gaussienne dont l'écart-type est égal à la précision de la CMM OLIVETTI employée, en l'occurrence  $3\ \mu\text{m}$  (voir la figure 3.18). De cette manière, des simulations de Monte-Carlo ont été réalisées, ce qui a permis de déduire les écarts-types des translations et rotations définissant chaque repère de centrage dans celui de la plaque. L'espérance mathématique des simulations converge, au fur et à mesure que le nombre de réalisations augmente, vers le résultat du vrai calcul, celui qui n'attribue pas d'erreurs aux mesures.

Les plaques peuvent supporter cinq repères de centrage. Mathématiquement, quinze translations et quinze rotations doivent être calculées. Toutefois ce nombre peut être réduit. Ainsi, il a été vu que les effets des rotations sur les mesures des HLS étaient négligeables (lire le paragraphe 3.3.3.1). De plus,



### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

par construction du système euclidien des plaques (lire le paragraphe précédent), ses translations longitudinales et verticales sont nulles, de même que leur écart-type. Il n'y a donc qu'un seul paramètre influent pour définir le repère des HLS, à savoir la translation transversale. Il en est de même pour les inclinomètres, pour lesquels aucune translation n'intervient dans le traitement des mesures (lire le paragraphe 3.3.3.2). De ce fait, il reste vingt-deux paramètres à prendre en considération pour définir les incertitudes sur les positions et orientations des différents repères de centrage dans le système de coordonnées de chaque plaque.

Paramètres des repères de centrage des plaques pour  $\sigma_{\text{CMM}} = 3 \mu\text{m}$

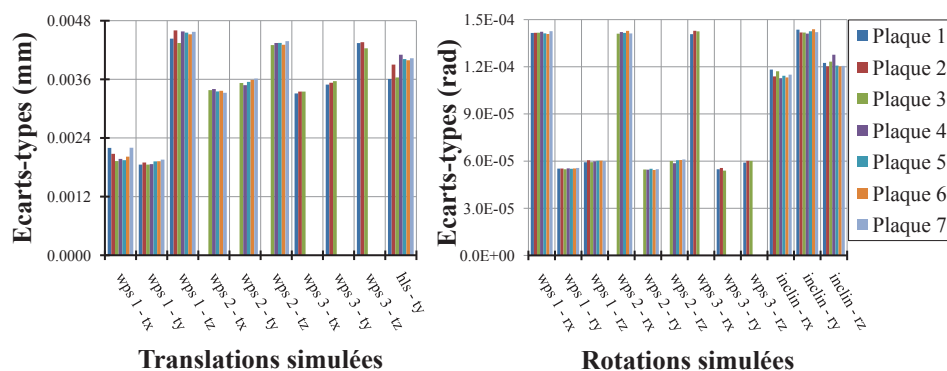


FIG. 3.22 – Simulations des plaques pour une CMM à  $3 \mu\text{m}$

Pour chacune des sept plaques métrologiques en invar du TT1, les écarts-types calculés à l'issue des simulations sont représentés sur le graphique en figure 3.22. Ils correspondent aux précisions qui peuvent être attendues compte-tenu de l'incertitude de la CMM employée par les métrologues du CERN. Les précisions des translations sont comprises entre  $2.4 \mu\text{m}$  et  $4.8 \mu\text{m}$ . L'étude des écarts-types des rotations montre des disparités plus grandes, allant de  $60 \mu\text{rad}$ , pour les tangages et lacets des WPS, à  $150 \mu\text{rad}$  pour le roulis des WPS et les angles des inclinomètres. Cela tient aux dimensions des repères à centrage forcé, et plus précisément aux distances entre les billes. Si cet état de fait est négligeable pour les WPS — en considérant une course du capteur de  $1 \text{ cm}$ , un défaut angulaire de  $150 \mu\text{rad}$  engendre une erreur de  $1.5 \mu\text{m}$  — il est beaucoup plus problématique pour ce qui est attendu des inclinomètres. Ceux-ci doivent fournir le roulis des plaques qui sont longues de  $600 \text{ mm}$ , or sur cette distance, un défaut angulaire de  $150 \mu\text{rad}$  engendre une erreur de  $90 \mu\text{m}$ .

La première amélioration qui peut être envisagée est relative à l'incertitude de la CMM employée. Il sera bientôt possible au CERN de disposer de mesures CMM sub-micrométriques. Les simulations, basées sur les mêmes observations, ont été faites en considérant une précision de  $1 \mu\text{m}$  sur les coordonnées fournies. Les résultats sont exposés dans le graphe en figure 3.23.

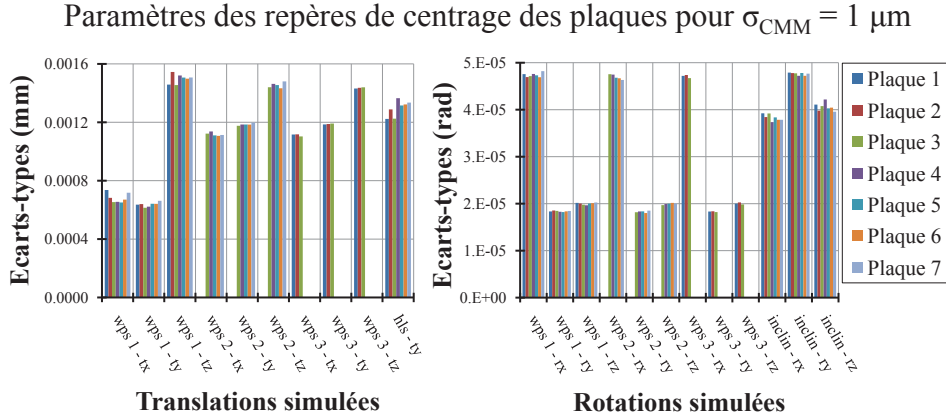


FIG. 3.23 – Simulations des plaques pour une CMM à  $1 \mu\text{m}$

Ceux-ci sont rigoureusement les mêmes que précédemment, divisés par trois. Les précisions des paramètres sont linéairement liées à celles des mesures CMM. Les écarts-types des translations sont alors compris entre  $0.8 \mu\text{m}$  et  $1.6 \mu\text{m}$ . Les écarts-types des rotations, compris entre  $20 \mu\text{rad}$  et  $50 \mu\text{rad}$ , ne sont cependant toujours par suffisants pour déduire précisément le roulis de la plaque avec les inclinomètres.

La distance transversale entre les billes du système actuel de centrage des inclinomètres est de  $3 \text{ cm}$  (voir la figure 3.12). En supposant que cette incertitude angulaire soit inversement proportionnelle à cette distance, il faudrait que celle-ci atteigne  $15 \text{ cm}$  pour obtenir une précision de  $10 \mu\text{rad}$  sur les rotations du repère de centrage des inclinomètres.

### 3.3.5 Conclusion

Les méthodes mises en place dans ce doctorat pour répondre aux enjeux de la calibration des capteurs et de la métrologie de leurs supports n'ont pas encore résolu l'ensemble des problèmes. Cependant, en comparaison de la situation antérieure, elles représentent un progrès considérable, ne serait-ce que par l'existence d'une solution quantifiable.

En dehors des capteurs HLS, pour qui le problème était plus simple, les calibrations des WPS et des inclinomètres ne sont pas encore des questions réglées. Le roulis des axes de mesure des capteurs WPS doit encore être déterminé. Le problème est clairement identifié et peut être résolu en intégrant à l'étalonnage de la linéarité des WPS, ce qui est actuellement en cours chez les géomètres du CERN.

Il en est de même pour les inclinomètres. L'analyse du problème montre qu'il ne peut être résolu sans l'emploi d'inclinomètres biaxiaux. De plus l'interface actuelle à centrage forcé, de par ses dimensions, ne peut aboutir à une solution suffisamment précise. Enfin, un banc de calibration de l'orientation

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

absolue de ces capteurs doit être réalisé. Certes, il reste beaucoup de travail, mais il existe une solution qui est, elle aussi, clairement identifiée.

Enfin, l'emploi systématique des mesures métrologiques, obtenues par une CMM sur les bancs de calibration et sur les plaques, se montre extrêmement efficace, tant dans la rigueur de construction des repères euclidiens de coordonnées que dans la précision des résultats. Ceux-ci prouvent qu'une incertitude de l'ordre du micromètre peut être obtenue dans la chaîne partant des lectures des capteurs et allant jusqu'aux plaques métrologiques. Plus particulièrement, dès que la nouvelle CMM LEITZ sera disponible au CERN, l'incertitude des mesures métrologiques sera négligeable pour les translations. Les seules limites seront dues aux problèmes liés aux capteurs et à leurs centrages respectifs, énumérés précédemment.

## 3.4 Compensation des réseaux

### 3.4.1 Introduction

Même si tous les problèmes ne sont pas encore résolus, une solution qui permet d'exprimer les lectures des capteurs HLS et WPS, ainsi que celles des inclinomètres, dans les repères euclidiens des plaques métrologiques existe. Autrement dit les coordonnées des points observés des surfaces hydrostatiques et des fils tendus par les capteurs HLS et WPS, exprimées dans les repères des plaques, sont à ce stade considérées comme étant connues.

Il reste la dernière étape de la chaîne métrologique à résoudre, à savoir la définition de la transformation pour aller des plaques au repère général. Pour ce faire, il va être nécessaire, d'une part de modéliser les références d'alignement dans le repère général. D'autre part il va falloir mettre en place une stratégie permettant de déduire les paramètres de cette dernière transformation en s'appuyant sur les modèles des fils et surfaces d'eau, ainsi que sur les coordonnées dans les systèmes des plaques.

Ces deux points vont être abordés dans la partie qui va suivre. Tout d'abord, il va s'agir de décrire les modèles adoptés des fils tendus et des surfaces d'eau. Ensuite, la méthode aboutissant à l'écriture des équations d'observations servant à la compensation des paramètres de transformation va être expliquée. Ces points vont mettre en évidence des défis, notamment liés aux aspects gravimétriques, qui devront être relevés pour obtenir une solution.

### 3.4.2 Modélisation des fils tendus

#### 3.4.2.1 Méthode usuelle

La forme qu'adopte un fil tendu entre deux points  $O$  et  $L$  correspond à une situation d'équilibre statique. Autrement dit, la somme des forces appliquées au fil est égale au vecteur nul. En considérant un quelconque point  $D$

appartenant au fil, un triangle de forces est obtenu (voir la figure 3.24). Ce triangle traduit, pour la section considérée du fil, l'équilibre entre son poids  $\vec{Q}$  et les tensions  $\vec{T}$  et  $\vec{S}$  qui lui sont appliqués à chacune de ses extrémités [Timoshenko et Young, 1937].

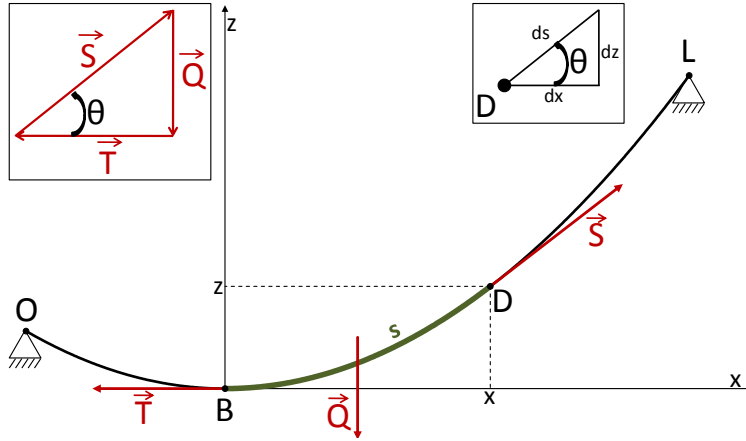


FIG. 3.24 – Équilibre des forces appliquées à un fil tendu

La méthode usuelle de modélisation d'un fil tendu, exposée brièvement au paragraphe 2.3.3.2, correspond à la résolution de cet équilibre selon les hypothèses suivantes :

- La tension du fil est constante en tout point  $\|\vec{T}\| = \|\vec{S}\| = \text{constante}$ ,
- La masse linéaire  $q$  du fil et l'accélération de la pesanteur  $g$  sont constantes,
- La direction de la verticale locale est constante le long du fil et est confondue avec le vecteur directeur de l'axe des  $z$ .

De ce fait, le fil est modélisé, dans le plan horizontal, par une ligne droite et par une chaînette en vertical [Timoshenko et Young, 1937]. Cette dernière peut être approchée par un polynôme de second degré (voir la relation 3.42). Compte-tenu de la masse linéaire des fils employés,  $q = 2.35 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ , et de la tension appliquée,  $T = 150 \text{ N}$ , l'erreur due à l'approximation est inférieure à  $1 \mu\text{m}$  tant que la distance entre le point bas  $B$  du fil et chacune de ses extrémités ne dépasse pas 281 m.

$$z(x) = \frac{T}{gq} \left( \cosh \frac{gqx}{T} - 1 \right) \approx \frac{gqx^2}{2T} \quad (3.42)$$

Soit  $l$  la distance longitudinale entre les deux extrémités  $O$  et  $L$  du fil. Quelle que soit la pente du fil, l'écart maximal entre le fil et la ligne droite passant par  $O$  et  $L$  est obtenu au milieu du fil, à la distance  $\frac{l}{2}$  de  $O$  et de  $L$  [Mainaud, 1996]. Soit  $f$  l'écart en ce point (voir la figure 2.26). Il

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

peut être exprimé en fonction des paramètres du fil [Mainaud, 1996] (voir la relation 3.43).

$$f = \frac{gql^2}{8T} \quad (3.43)$$

Le paramètre  $f$  est désigné comme la flèche du fil tendu. En l'introduisant dans l'équation 3.42, les paramètres de la physique du fil sont remplacés par des distances mesurables. En effectuant un changement de repère, il est ensuite possible de s'affranchir de la connaissance de  $B$ , le point bas du fil. La modélisation du fil obtenue, à laquelle a été ajoutée la convention des systèmes de coordonnées des accélérateurs de particules<sup>7</sup>, est exprimée analytiquement en 3.44.

$$M(x, y, z) \in \{\mathcal{FIL}\} \quad \Downarrow \quad \begin{cases} x = x_0 + \frac{p(z - z_0)}{l} \\ y = y_0 + \frac{4f(z - z_0)^2}{l^2} + \frac{(h - 4f)(z - z_0)}{l} \\ z_0 \leq z \leq z_0 + l \end{cases} \quad (3.44)$$

Dans le modèle de fil en 3.44, sept paramètres définissent le fil tendu. Les trois premiers sont les coordonnées de  $O(x_0, y_0, z_0)$ , son point origine. Les trois suivants sont celles de la seconde extrémité du fil,  $L(x_l, y_l, z_l)$ , définies selon le système 3.45. Le dernier paramètre est la flèche  $f$  du fil.

$$\begin{cases} x_l = x_0 + p \\ y_l = y_0 + h \\ z_l = z_0 + l \end{cases} \quad (3.45)$$

Dans ce modèle, si chacun de ces sept paramètres est connu, alors il suffit de connaître la position longitudinale d'un point du fil pour en déduire ses coordonnées transversales et verticales.

#### 3.4.2.2 Résolution de la chaînette avec gradient

L'étude des résultats des expériences impliquant des fils tendus a montré un certain nombre de failles dans la modélisation des fils tendus en équation 3.44. Les phénomènes physiques en jeu dans l'équilibre statique du fil ne sont constantes, ni dans le temps, ni dans l'espace. La première mise en évidence de ce phénomène a consisté à étudier la corrélation entre les flèches des fils et l'humidité relative mesurée en un point.

---

<sup>7</sup> $z$  correspond à la direction longitudinale,  $x$  au transversal et  $y$  au vertical.

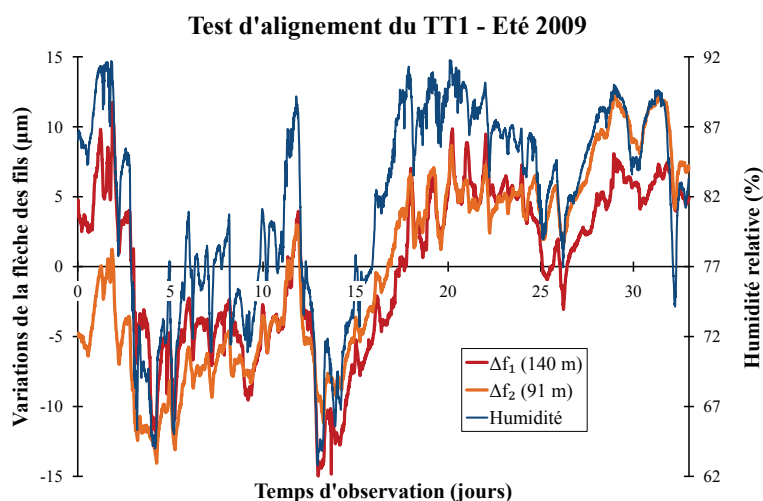


FIG. 3.25 – Variations des flèches des fils et de l'humidité relative

En été 2009, du 22 juillet au 23 août, les observations de l'expérience du TT1 ont été traitées afin de mettre en évidence la dispersion des mesures au cours d'une période de temps conséquente [Touzé, 2010b]. La figure 3.25 représente les variations des flèches des fils de 140 m et de 91 m qui ont été observées pendant ces 33 jours de mesure. Dans les deux cas, les flèches varient dans un intervalle large de 27  $\mu\text{m}$ . De plus, les variations des flèches semblaient suivre la courbe de l'humidité relative. La corrélation avec l'humidité a été calculée (voir la figure 3.26).

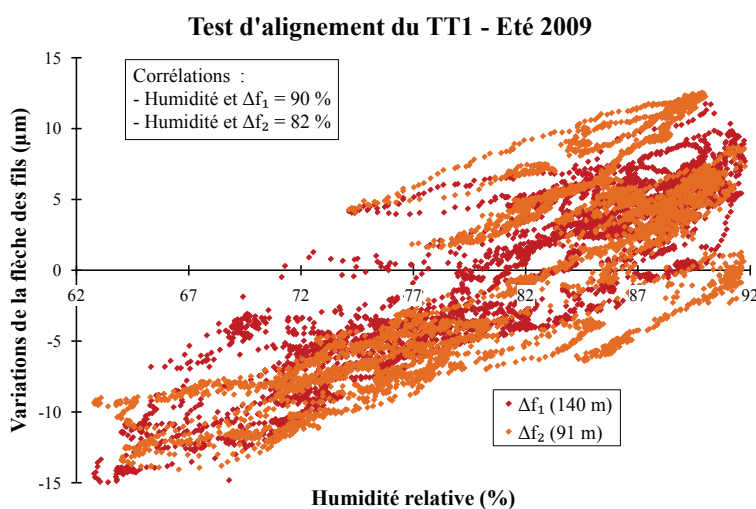


FIG. 3.26 – Corrélations entre les flèches des fils et l'humidité

Le tunnel du TT1 est un ouvrage ancien au CERN. Depuis la cessation des activités des ISR, il ne sert plus qu'au stockage de câbles faiblement

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

radioactifs et aux tests d'alignement. La ventilation ne fonctionne plus et le système d'évacuation des eaux pluviales des ISR, qui passe sous le radier du TT1, devient chaque année plus déficient. Le tunnel est régulièrement inondé et l'humidité peut être anormalement élevée par rapport aux autres ouvrages du CERN. Cependant, ces conditions exceptionnellement mauvaises ont permis de mettre à l'épreuve la modélisation des fils. Leurs flèches sont fortement corrélées à l'humidité, respectivement à 90 % et 82 % pour les fils de 140 m et de 91 m.

Le phénomène est relativement simple à saisir. Avec l'humidité croissante, le fil se charge en eau. Sa masse linéaire  $q$  augmente ce qui influe linéairement sur la valeur de la flèche (voir l'expression 3.43). Toutefois, les corrélations observées en figure 3.26 montrent qu'une éventuelle correction ne serait pas si simple.

Supposons que la masse linéaire du fil soit linéairement liée à l'humidité relative. Si l'humidité, à un instant donné, est constante dans l'espace, alors il en est de même pour la masse linéaire. Les deux fils étudiés du TT1 sont issus de la même bobine. Ils devraient avoir le même comportement, d'autant plus que leurs systèmes de tension sont similaires (mêmes accrochages, contrepoids égaux à quelques grammes près). Leurs variations de flèches devraient suivre la relation 3.46.

$$\frac{\Delta f_1}{l_1^2} = \frac{\Delta f_2}{l_2^2} \quad (3.46)$$

En prenant la variation du fil de 140 m comme référence, qui est de 27  $\mu\text{m}$ , celui de 91 m devrait varier de 11  $\mu\text{m}$ . Or lui aussi varie de 27  $\mu\text{m}$ . L'enchaînement d'idées aboutit à un résultat faux. Au moins une des hypothèses de départ est fautive. L'humidité relative n'est pas constante le long des fils. Le gradient d'humidité engendre un gradient de la masse linéaire.

Soient  $H$  l'humidité relative et  $q$  la masse linéaire du fil. Le gradient de la masse linéaire est défini par la relation 3.47.

$$\begin{aligned} \exists \{q_0, \Delta q\} \in \mathbb{R}^2 \quad q &= q_0 + \Delta q \cdot H \\ &\Downarrow \\ \overrightarrow{\text{grad}}q &= \Delta q \cdot \overrightarrow{\text{grad}}H \end{aligned} \quad (3.47)$$

Avant même de réfléchir au calcul de ce gradient, il a fallu s'atteler au modèle de fil. Les hypothèses préalables à la résolution de l'équation de la chaînette stipulent que les normes des forces sont constantes dans l'espace. Manifestement, ce n'est pas le cas. Il a été démontré par le passé que les variations de la direction de la verticale et de l'accélération de la pesanteur étaient négligeables [Becker, 2003]. Les résultats précédents montrent que la masse linéaire du fil n'est pas constante dans l'espace et que les conséquences



### 3.4 Compensation des réseaux

à une échelle micrométrique ne sont pas négligeables. Et qu'en est-il de la tension le long du fil ? Est-elle constante ?

Il est extrêmement délicat de déterminer indépendamment les valeurs de la tension appliquée au fil et de sa masse linéaire. L'incertitude de mesure nécessaire sur ces paramètres est trop difficile à atteindre — ( $4 \cdot 10^{-3}$  N sur la tension pour modéliser à  $1 \mu\text{m}$  un fil de 140 m) — compte tenu de la complexité du modèle nécessaire (frottements sur les accrochages des fils). En revanche le rapport entre la masse linéaire et la tension peut être obtenu par une mesure de la fréquence  $\phi$  d'oscillation du fil [Mainaud, 1996].

$$\phi = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{q}} = \sqrt{\frac{g}{32f}} \quad (3.48)$$

En disposant le long des fils des sondes d'humidité, il serait possible d'en déduire le gradient et la valeur moyenne. La mesure de fréquence permettrait alors de déduire la valeur du rapport entre la masse linéaire et la tension correspondant. En répétant cette opération dans différentes conditions, il serait possible de déduire les coefficients de la régression linéaire de  $\frac{q}{T}$  selon  $H$ . Dès lors le gradient de ce rapport le long du fil pourrait être déduit de celui de l'humidité.

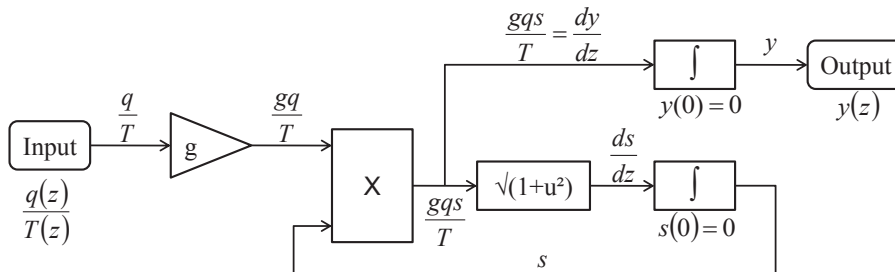


FIG. 3.27 – Schéma de la résolution de la chaîne

Le diagramme 3.27 représente l'algorithme de résolution de l'équation de la chaîne. A l'aide de l'outil SIMULINK du logiciel MATLAB, la résolution de la chaîne a été faite numériquement en tenant compte du gradient d'humidité mesuré au TT1 par sept sondes. Les coefficients permettant de déduire le gradient du rapport entre la masse linéaire et la tension, à défaut de mesure de fréquence, ont été déduits des mesures en figure 3.25. De cette manière, il a été possible de calculer les corrections à apporter au modèle en équation 3.44 au niveau de chaque capteur. Elles atteignaient  $10 \mu\text{m}$  aux extrémités du fil de 140 m.

#### 3.4.2.3 Fréquence d'oscillation des fils

La mesure de la fréquence d'oscillation des fils tendus a plusieurs avantages. Le premier provient de la nécessité de disposer du gradient du rapport entre la masse linéaire et la tension des fils. Les corrections apportées à la modélisation des fils tendus proviendraient ainsi de mesures indépendantes et non d'un ajustement comme c'est le cas actuellement. Des premiers tests ont été effectués en enregistrant en continu les observations de capteurs WPS à l'aide d'un oscilloscope. La vibration des fils a été réalisée en les frottant simplement telle une corde de guitare. Les spectres obtenus sont exposés en figure 3.28.

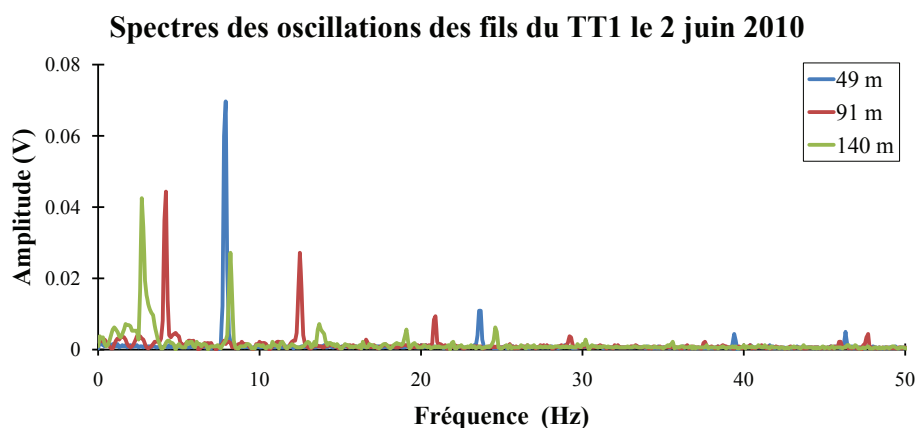


FIG. 3.28 – Spectres des oscillations transversales des trois fils tendus dans le TT1

Le protocole expérimental était des plus simples. La résolution de l'oscilloscope utilisé était de 50 mHz. Pourtant les spectres obtenus étaient répétables (voir la figure 3.29). De plus, les premières harmoniques impaires étaient clairement visibles (voir la figure 3.29). Cela a permis de pallier la faible résolution de l'oscilloscope en ajustant la valeur de la fréquence fondamentale à l'aide de l'observation des harmoniques. La précision des fréquences ajustées était, pour chaque fil et pour chaque test, de 2 mHz.

Selon la relation 3.48, la mesure de la fréquence d'oscillation permet de déduire la flèche totale du fil, entre ses points d'accrochage. La valeur utilisée dans le modèle en équation 3.44 est celle calculée entre les deux capteurs aux extrémités. Connaissant les distances avec une précision millimétrique, il est possible de la déduire. Les incertitudes sur ces flèches, calculées à partir des mesures de fréquence, sont, respectivement pour les fils de 140 m, 91 m et 49 m, de 65  $\mu\text{m}$ , 18  $\mu\text{m}$  et 2,5  $\mu\text{m}$  (voir le tableau en figure 3.30).

Avec une telle instrumentation, cette mesure a une incertitude suffisante pour le fil le plus court. Ce paramètre qui auparavant était inconnu, peut désormais être considéré comme une observation. Ce n'est malheureusement

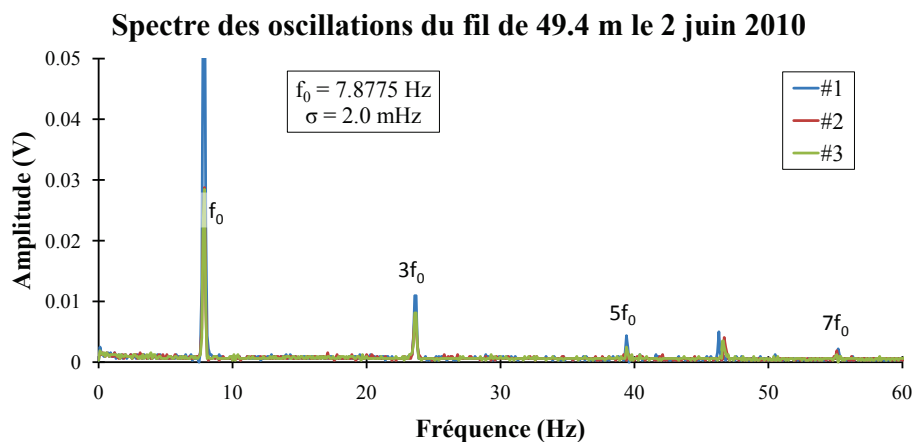


FIG. 3.29 – Répétabilité de l'oscillation du fil de 49.4 m

	Distances WPS		Distances tenseurs		Longueur fil		Pesanteur	
	$\Delta x$ (m)	$\sigma x$ (m)	d (m)	$\sigma d$ (m)	l (m)	$\sigma l$ (m)	g ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	$\sigma g$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
Fil #1	139.9798	0.0004	2.340	0.003	142.320	0.003	9.8057655	1.E-07
Fil #2	91.3450	0.0004	2.261	0.003	93.606	0.003	9.8057655	1.E-07
Fil #3	48.6345	0.0004	0.810	0.003	49.444	0.003	9.8057655	1.E-07

	Fréquences fils		Flèche fil		Coeff Modélisation		Flèche WPS	
	f (Hz)	$\sigma f$ (Hz)	s (m)	$\sigma s$ (m)	$\zeta$ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ )	$\sigma \zeta$ ( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ )	sw (m)	$\sigma sw$ (m)
Fil #1	2.7327	0.0022	0.041034	6.6E-05	605026	974	0.039696	6.4E-05
Fil #2	4.1758	0.0021	0.017573	1.8E-05	611148	616	0.016735	1.7E-05
Fil #3	7.8775	0.0020	0.004938	2.5E-06	606837	316	0.004778	2.5E-06

FIG. 3.30 – Calcul des flèches et des incertitudes

pas encore possible pour les fils plus longs. L'incertitude sur la flèche dépasse 10  $\mu\text{m}$ . De ce fait, les effets de l'humidité ne sont pas visibles, ils sont dans le bruit des mesures. Toutefois, le protocole expérimental était des plus rudimentaires. Il peut certainement être optimisé. La flèche des fils ne serait plus une inconnue. C'est le second avantage des mesure de fréquence.

Enfin, il y a un dernier avantage qui est celui de connaître l'état physique du fil. En effet, parfois ceux-ci se brisent. Dans la majorité des cas, cela est dû à des actes involontaires de la part des personnes travaillant à proximité. Mais parfois, le fil se casse sans aucune explication. Mesurer régulièrement la fréquence d'oscillation du fil permettrait de connaître l'évolution de sa masse linéaire et de sa tension. Or si celle-ci ne s'explique pas par l'humidité, ou un quelconque paramètre météorologique, alors il pourra en être déduit que l'état du fil est compromis et qu'il faut s'attendre à ce qu'il casse. Ce serait la première fois que les géomètres du CERN seraient en mesure d'anticiper un tel évènement.

Cet aspect est loin d'être négligeable. Lors de leurs fonctionnements, du

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

fait des champs magnétiques et des forts rayonnements ionisant, les accélérateurs de particules représentent des environnements hostiles dans lesquels il est interdit de pénétrer. L'anticipation des dommages sur les fils permettrait de les remplacer lors d'un arrêt technique planifié, avant qu'ils ne se cassent.

#### 3.4.3 Modélisation des réseaux hydrostatiques

##### 3.4.3.1 La surface d'eau dans l'espace et le temps

Les capteurs HLS mesurent la distance qui sépare leur électrode d'une surface d'eau. La calibration du zéro des HLS permet de connaître la distance allant de cette électrode jusqu'au centre d'une sphère TAYLOR HOBSON qui se loge sur le haut du capteur.

Lors du lever de l'expérience du TT1, en mai 2010, les centres de ces sphères ont été mesurés à l'aide d'une station totale LEICA TDA 5005, d'un *laser tracker* LEICA LTD 500 et d'un niveau WILD NA2 avec micromètre. La compensation des mesures a permis d'obtenir les coordonnées des centres de ces sphères dans un repère euclidien local connu par rapport au CCS.

En soustrayant aux coordonnées verticales les distances calibrées et les lectures des capteurs à un instant donné, les positions des points mesurés par les HLS de la surface d'eau sont obtenues dans le repère du TT1 à la précision des mesures topométriques. Les mesures enregistrées par les HLS le 13 juillet 2010, à 11h 45min 58s, sont représentées sur la figure 3.31.

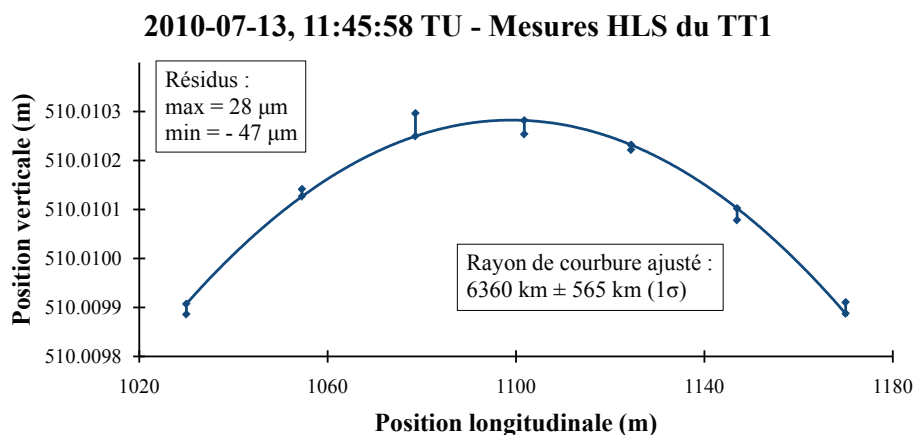


FIG. 3.31 – La surface d'eau, à la précision des mesures topométriques

La surface d'eau, à un instant donné, suit une équipotentielle de pesanteur. En première approximation, cette surface, observée au TT1 en sept points sur 140 m, correspond à une sphère d'un rayon proche de 6400 km. Un ajustement, par la méthode des moindres carrés, de la meilleure sphère passant par ces sept points a été effectué. La valeur du rayon calculé est de 6360 km avec une précision *a posteriori* de 565 km (voir la figure 3.31).

Les résidus de cet ajustement sont compris entre  $-47\ \mu\text{m}$  et  $28\ \mu\text{m}$ . Un tel résultat met en évidence la qualité des coordonnées issues des mesures topométriques dont les précisions sont, en longitudinal, transversal et vertical, respectivement de  $0.11\ \text{mm}$ ,  $0.06\ \text{mm}$  et  $0.07\ \text{mm}$  (lire la table 3.7). Le calcul de la meilleure sphère laisse supposer l'absence de fautes dans les coordonnées.

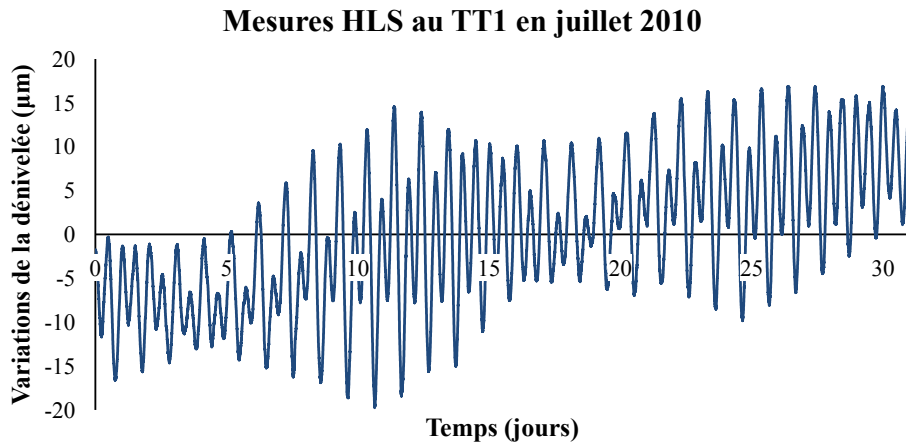


FIG. 3.32 – Variations de la dénivellée entre les HLS aux extrémités

Lorsque les lectures des capteurs HLS sont observées sur de grandes périodes de temps, il est possible de constater l'influence des marées sur la surface d'eau. Plusieurs phénomènes sont en jeu. La croûte terrestre et la surface équipotentielle de pesanteur varient périodiquement du fait de l'attraction des astres et des déplacements de masses induits [Melchior, 1966]. C'est la combinaison de ces deux phénomènes qui est observée dans la variation sur un mois de la dénivellée entre les deux pots HLS aux extrémités de l'expérience du TT1 en figure 3.32.

La longueur d'onde du déplacement de la croûte du fait des marées est trop grande pour avoir un effet sensible sur  $200\ \text{m}$  [Becker, 2003]. Sans cela, elle serait visible sur les mesures WPS, ce qui n'est pas le cas. Ces variations ne sont vues que par les longs réseaux HLS et correspondent à une variation périodique de l'inclinaison de l'équipotentielle de pesanteur dans le temps.

#### 3.4.3.2 Modélisation sphérique

Lorsque le système de coordonnées, auquel les mesures HLS sont rattachées, est euclidien, la surface hydrostatique observée par les capteurs semble être modélisable par une sphère oscillant autour d'un point, selon une inclinaison soumise aux marées.

Si le réseau hydrostatique est parallèle à l'axe longitudinal, comme c'est le cas dans l'expérience du TT1, alors le modèle peut être simplifié par le

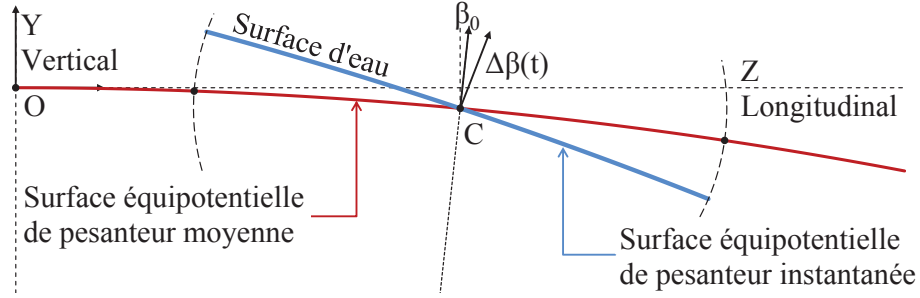


FIG. 3.33 – Modélisation de la surface d’eau par un cercle qui oscille autour d’une position moyenne, selon une inclinaison due aux effets des marées.

calcul d’un cercle qui oscille autour d’un point (voir la figure 3.33).

Soit  $C (X_C, Y_C, Z_C)$ , le point au centre de la surface d’eau considérée. Le défaut de verticalité en  $C$  à un instant donné, c’est-à-dire l’écart entre l’axe vertical du repère euclidien et la normale à la surface équipotentielle de pesanteur passant par ce point, est défini par une composante statique, l’angle  $\beta_0$ , et une composante due aux marées  $\Delta\beta(t)$  (voir la figure 3.33).

La surface d’eau, à un instant donné  $t$ , est modélisée par le cercle de rayon  $R_T$  passant par  $C$  et dont la normale en ce point est définie par le défaut angulaire de verticalité  $\beta_0 + \Delta\beta(t)$ . Soit  $M (X, Y, Z)$  un point appartenant au réseau d’eau. Sa position verticale  $Y$  peut être déduite de sa coordonnée longitudinale  $Z$  selon la formule 3.49.

$$\begin{cases} Y = Y_C - R_T \cos \beta + \sqrt{R_T^2 - (\Delta Z + R_T \sin \beta)^2} \\ \text{avec} \\ \beta = \beta_0 + \Delta\beta(t) \quad \text{et} \quad \Delta Z = Z - Z_C \end{cases} \quad (3.49)$$

Le modèle choisi pour représenter la surface hydrostatique dans le temps et l’espace dans un repère euclidien est justifié par les observations et la réalité physique du problème. Cette surface suit la surface équipotentielle de pesanteur qui elle-même s’incline au cours du temps du fait de l’effet des marées. Compte-tenu de la longueur du réseau hydrostatique à modéliser, la surface équipotentielle est localement considérée comme une sphère.

Les données HLS acquises en juillet 2010 ont été traitées selon ce modèle. Les informations longitudinales ayant été obtenues depuis les coordonnées issues des mesures topométriques, il restait trois paramètres à ajuster, en l’occurrence le rayon  $R_T$  du cercle, le défaut de verticalité  $\beta$  et l’ordonnée  $Y_C$  du point pivot  $C$  du réseau. Les mesures ont été réalisées toutes les deux minutes pendant 31 jours, soit 22 320 enregistrements. Pour chacun d’entre eux, les trois paramètres ont été ajustés à partir des mesures des sept capteurs HLS du TT1. Les valeurs des paramètres ajustés au cours du mois traité sont représentées sur la figure 3.34.

### 3.4 Compensation des réseaux

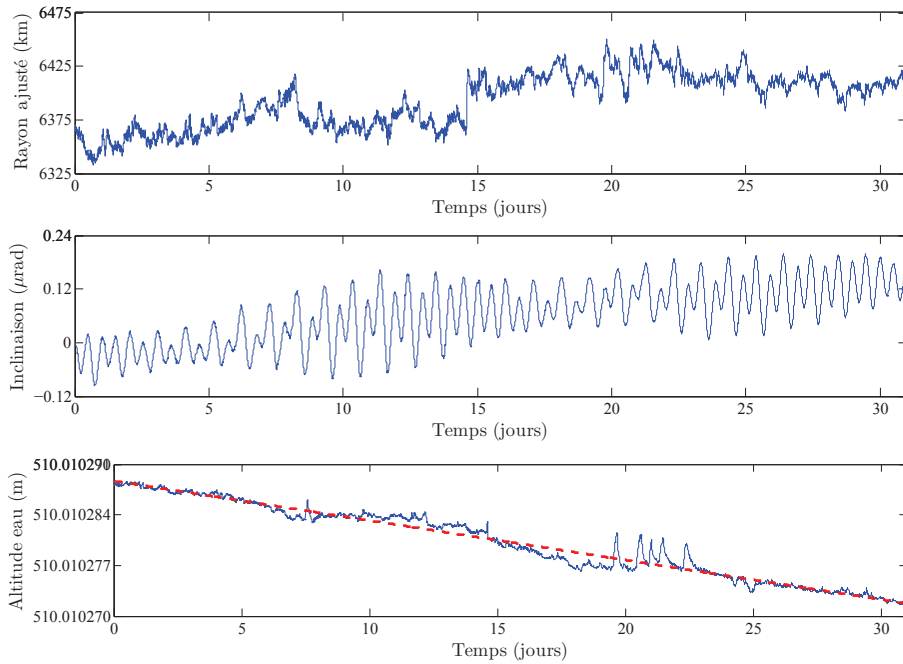


FIG. 3.34 – Compensation des mesures HLS de juillet 2010

Les valeurs calculées des rayons sont comprises entre 6333 km et 6450 km. La précision *a posteriori* sur ce paramètre varie de 469 km à 617 km. Une incertitude sur un tel rayon de courbure n'a qu'un effet minime sur les mesures.

L'inclinaison de la surface d'eau par rapport au plan horizontal du repère euclidien varie de  $-97$  nrad à  $202$  nrad. Les effets des marées sont nettement discernables dans le signal obtenu. Toutefois, la précision *a posteriori* sur ce paramètre est de l'ordre de 280 nrad; elle est supérieure à la valeur de l'angle. Le problème provient des observations utilisées dont l'incertitude est tributaire de celles des mesures topométriques, à savoir 0.05 mm (ce qui représente une valeur très satisfaisante).

Les résultats de l'ordonnée du point pivot  $C$ , en figure 3.34, ont une précision *a posteriori* de l'ordre de 20  $\mu\text{m}$ . Cette ordonnée a tendance à décroître linéairement. Ce phénomène est vraisemblablement dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le réseau. La dérive observée est de  $-0.55 \mu\text{m}$  par jour.

Les résidus sur les observations HLS sont sommairement analysés dans le tableau 3.5. Leurs moyennes et écarts-types sont calculés à l'issue des résultats des compensations des 22 320 enregistrements. Les moyennes sont relativement élevées, de  $-44 \mu\text{m}$  à  $28 \mu\text{m}$ . Elles sont essentiellement dues aux incertitudes des mesures topométriques. En revanche, leurs dispersions sont excellentes et inférieures à  $2 \mu\text{m}$ .



TAB. 3.5 – Étude des résidus de la compensation

Capteur	Abscisse	Moyenne	écart-type
HLS 1	−69.9899 m	21.1 $\mu\text{m}$	1.1 $\mu\text{m}$
HLS 2	−45.4487 m	−15.4 $\mu\text{m}$	1.1 $\mu\text{m}$
HLS 3	−21.3548 m	−44.2 $\mu\text{m}$	1.9 $\mu\text{m}$
HLS 4	1.7540 m	27.9 $\mu\text{m}$	1.1 $\mu\text{m}$
HLS 5	24.4613 m	8.7 $\mu\text{m}$	1.4 $\mu\text{m}$
HLS 6	46.9637 m	24.4 $\mu\text{m}$	1.7 $\mu\text{m}$
HLS 7	69.9899 m	−22.6 $\mu\text{m}$	1.3 $\mu\text{m}$

#### 3.4.3.3 Paramètres géophysiques et géodésiques

La méthode de modélisation des réseaux hydrostatiques présentée précédemment n'a pas pour but d'être appliquée comme telle. Les incertitudes des observations utilisées, tributaires de celles des coordonnées issues des mesures topométriques, sont bien trop grandes pour obtenir des précisions *a posteriori* satisfaisantes. L'objectif était de démontrer le bien fondé du modèle en lui-même.

La surface d'eau suit une équipotentielle de pesanteur. Lorsqu'elle est représentée dans un repère euclidien, cette surface semble être, en première approximation, une sphère dont il faut définir le rayon  $R_T$  et la direction normale en un point. Cette direction normale peut être caractérisée par le défaut de verticalité  $\beta_0$  auquel s'ajoute l'inclinaison périodique due aux marées  $\Delta\beta(t)$ .

Dans le cadre d'une démarche déterministe visant à s'appuyer sur la réalité physique des systèmes de mesure employés pour résoudre le réseau métrologique de référence, la connaissance de la surface équipotentielle de pesanteur est cruciale. En effet il s'agit d'une surface qui physiquement a un sens et sur laquelle les références d'alignement utilisées sont basées. Il est hors de question que les paramètres définissant cette surface équipotentielle soient des inconnues à ajuster par moindres carrés. Ceux-ci doivent être déterminés à l'aide de systèmes de mesure indépendants.

L'étude des marées terrestres représente une branche de la géophysique commune avec la géodésie physique. Si la littérature est relativement riche dans ce domaine pris dans sa globalité, son application aux systèmes inclinométriques l'est beaucoup moins. Ainsi les ondes intervenant dans les marées terrestres sont connues [Melchior, 1966] et détectables dans les mesures HLS (voir la figure 3.35 et la table 3.6), mais les amplitudes prédites n'atteignent actuellement que 80 % du signal mesuré [Jones *et al.*, 2010]. L'utilisation d'inclinomètres de très grande résolution serait certes une solution élégante, mais les tests actuels souffrent encore d'un trop faible rapport signal sur bruit.

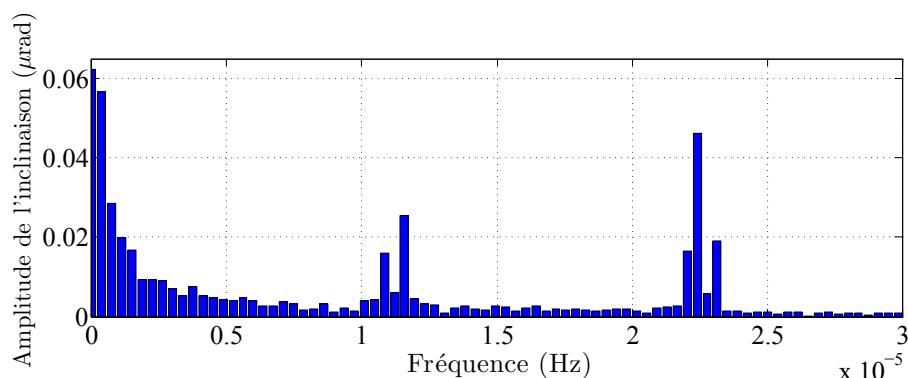


FIG. 3.35 – Spectre de l'inclinaison du réseau hydrostatique

Mais qu'en bien même ils en resteraient à la situation actuelle, la détermination des marées peut atteindre une incertitude de l'ordre du micromètre sur 140 m [Jones *et al.*, 2010].

TAB. 3.6 – Transformée de Fourier rapide de l'inclinaison du réseau

Onde	Période théorique	Période calculée	Amplitude
$\mathcal{O}1$	25 h 49 min	25 h 39 min	16 nrad
$\mathcal{S}1$	24 h 00 min	24 h 00 min	25 nrad
$\mathcal{N}2$	12 h 40 min	12 h 45 min	16 nrad
$\mathcal{M}2$	12 h 25 min	12 h 24 min	46 nrad
$\mathcal{S}2$	12 h 00 min	12 h 00 min	19 nrad

En ce qui concerne la modélisation statique de la surface équipotentielle de pesanteur, la question est, elle aussi, en suspens. Tout d'abord, est-ce qu'une modélisation sphérique est acceptable pour atteindre une incertitude de l'ordre du micromètre ? Cela revient à se demander à partir de quelle longueur d'ondulation de l'équipotentielle, l'erreur est inférieure au micromètre. Le problème est que la réponse à cette question n'est pas encore connue.

Les expériences menées au CERN ont permis d'établir un profil en long de la surface équipotentielle de pesanteur à l'altitude d'une zone du LHC sur une longueur de 800 m. D'une part, les différences constatées sur cette longueur entre les prédictions et le profil établi sont du même ordre de grandeur que les incertitudes des instruments employés. D'autre part, la véritable surface équipotentielle, qui permettrait de trancher entre le bruit de l'instrumentation et le signal gravimétrique, n'est évidemment pas connue [Jones *et al.*, 2010]. Ainsi, dans l'état actuel des recherches menées au CERN, il n'est pas possible de juger plus avant de la pertinence de la modélisation sphérique de l'équipotentielle sur 140 m.

Le dernier point consiste à déterminer le défaut de verticalité statique de

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

l'équipotentielle de pesanteur au niveau du point pivot du réseau hydrostatique, c'est-à-dire l'angle  $\beta_0$  de la figure 3.33. Les recherches gravimétriques menées au CERN, qui mettent à contribution la caméra astro-zénithale développée par l'*Eidgenössische Technische Hochschule Zürich* (ETHZ)<sup>8</sup>, montrent qu'une précision de 0.1 arcsec, ce qui équivaut à 0.5  $\mu$ rad, peut être atteinte [Jones *et al.*, 2010]. Il s'agit de l'incertitude de la déviation de la verticale et non de celle du défaut de verticalité. Cette valeur est de ce fait optimiste puisque la déviation de la verticale n'est pas rattachée en absolu à un système de coordonnées.

D'après l'ordre de grandeur constaté de l'inclinaison de la surface d'eau (202 nrad au maximum sur la figure 3.34), cette valeur n'est pas suffisamment précise. Toutefois, en extrapolant le réseau du TT1 à l'ensemble du CLIC, les 48 km du projet verront se succéder des réseaux hydrostatiques. Ne serait-il pas possible de les inclure dans l'instrumentation gravimétrique afin de s'en servir pour affiner la connaissance de la surface équipotentielle de pesanteur, qu'il s'agisse de déterminer les défauts de verticalité et l'ondulation du géoïde?

Dans ce cadre, un autre projet, en collaboration entre l'ETHZ et le CERN, consisterait à obtenir des valeurs de la déviation de la verticale par la comparaison entre un laser sous vide et un inclinomètre. Ce projet est actuellement en cours de développement [Jones *et al.*, 2010].

#### 3.4.4 Calcul de la dernière similitude

##### 3.4.4.1 Équations d'observation

Au cours du paragraphe 3.3, les méthodes permettant d'exprimer les lectures des capteurs HLS et WPS, dans le repère euclidien des plaques métrologiques, ont été présentées.

Soit  $L$  le vecteur des lectures d'un capteur HLS ou WPS.  $L$  correspond aux coordonnées du point observé de la surface d'eau ou du fil tendu dans le repère des axes de mesure du capteur considéré. Soient les matrices  $\tau$  et  $\rho$  de calibration des axes de mesure du capteur par rapport à son repère de centrage. Soient les matrices  $t$  et  $r$  exprimant respectivement les translations et rotations pour aller du repère de centrage du capteur à celui de la plaque métrologique à laquelle il est fixé. À l'aide de ces différents vecteurs et matrices, les coordonnées  $(x, y, z)$  du point observé de la surface d'eau ou du fil tendu peuvent être exprimées dans le repère euclidien de la plaque métrologique selon la relation 3.50.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = t + r \times (\tau + \rho \times L) \quad (3.50)$$

---

<sup>8</sup>École Polytechnique Fédérale de Zürich.

### 3.4 Compensation des réseaux

---

Quand les difficultés de calibration des capteurs arriveront à être surmontées, alors les coordonnées  $(x, y, z)$  de tous les points des références d'alignement observés par les capteurs seront connues dans les repères des plaques.

Il existe une similitude 3D qui permet d'aller de chaque plaque métrologique au repère euclidien général. Soient  $(X, Y, Z)$  les coordonnées du point observé d'une référence d'alignement par un capteur HLS ou WPS. Soit  $\mathcal{ROT}$  l'ensemble des matrices de rotation de l'espace euclidien à trois dimensions. Cette similitude s'écrit selon la relation 3.51. Le facteur d'échelle est fixé à 0.001 du fait que le repère général définit des coordonnées en mètres tandis que ceux en amont des plaques métrologiques ont comme unité le millimètre.

$$\exists T \in \mathbb{R}^3 \quad \exists R \in \mathcal{ROT}$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = T + 0.001 \cdot R \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Les coordonnées  $(X, Y, Z)$  sont *a priori* inconnues, de même que les matrices  $T$  et  $R$ . Cependant il existe une règle régissant la distribution des points considérés dans le repère général. En effet, ceux-ci appartiennent à des surfaces d'eau ou à des fils tendus dont des modèles ont été définis aux paragraphes 3.4.2 et 3.4.3. Il existe des fonctions  $f$  et  $g$  permettant d'exprimer les positions transversales et verticales des points appartenant aux fils tendus ou aux surfaces d'eau en fonction de leurs positions longitudinales  $Z$  selon la relation 3.52.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(Z) \\ g(Z) \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

L'équation d'observation qui va permettre de calculer la solution du réseau métrologique de référence va être construite à l'aide de l'égalité entre les relations 3.51 et 3.52. Il s'agit de calculer les paramètres de la similitude 3D et ceux modélisant les références d'alignement qui interviennent dans les fonctions  $f$  et  $g$ , en utilisant comme observation les coordonnées dans les systèmes des plaques. La formulation générale de cette équation d'observation est décrite dans l'équation 3.53.

$$T + k \cdot R \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(Z) \\ g(Z) \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

#### 3.4.4.2 Longitudinal et roulis

Afin de déduire les spécifications sur chacun des paramètres intervenant dans l'équation 3.53, la matrice  $R$  va exceptionnellement être linéarisée. Cette dernière correspond au produit de trois rotations élémentaires autour de chacun des axes du repère euclidien, et dont les angles  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  et  $\theta_z$  sont proches de zéro (lire le paragraphe 3.2.2). La linéarisation de la matrice  $R$  définie dans la formule 3.7 donne l'expression 3.54.

$$R \approx \begin{bmatrix} 1 & \theta_z & -\theta_y \\ -\theta_z & 1 & \theta_x \\ \theta_y & -\theta_x & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

De ce fait, la relation matricielle 3.53 devient le système de trois équations 3.55.

$$\begin{cases} f(Z) \approx T_x + 0.001 \cdot (x + \theta_z \cdot y - \theta_y \cdot z) \\ g(Z) \approx T_y + 0.001 \cdot (-\theta_z \cdot x + y + \theta_x \cdot z) \\ Z \approx T_z + 0.001 \cdot (\theta_y \cdot x - \theta_x \cdot y + z) \end{cases} \quad (3.55)$$

Les contraintes d'alignement en longitudinal sont moindres que celles pour les directions transversales et verticales. De ce fait, la translation longitudinale  $T_z$  peut être déterminée d'une manière moins précise. Ensuite, le tangage  $\theta_x$  et le lacet  $\theta_y$  interviennent dans la troisième équation qui est de moindre importance, ainsi que dans les deux premières multipliés chacun par la coordonnée longitudinale  $z$ . Or dans le paragraphe 3.3.4.2, il est décrit comment le repère de la plaque est construit de manière à ce que toutes les mesures soient dans le même plan transversal. Autrement dit, le repère de la plaque est conçu pour que  $z$  soit proche de zéro.

Donc, si tous les capteurs sont positionnés dans le même plan transversal de la plaque métrologique, les produits  $\theta_y \cdot z$  et  $\theta_x \cdot z$  sont proches de zéro. Leur influence dans le résultat étant moindre, les incertitudes requises le sont aussi. Dans le cas des plaques invar du TT1,  $z < 1$  mm. De ce fait, si la précision de ces deux angles est inférieure à 1 mrad, alors l'incertitude sur le résultat due à ces angles sera inférieure à 1  $\mu$ m.

Pour obtenir des valeurs de ces paramètres de moindres importances, la similitude 3D va être calculée par la méthode des moindres carrés en se servant des prismes mesurés en métrologie sur chacune des plaques et dans le tunnel lors du lever de précision. Les précisions a posteriori obtenues à l'issue de la compensation du réseau sont représentées dans la figure 3.36 et la table 3.7.

Les pires précisions obtenues sont, respectivement en longitudinal, transversal et vertical, de 0.11 mm, 0.06 mm et 0.07 mm (lire la table 3.7). Les mesures topométriques ont été réalisées en mai 2010 à l'aide d'une station

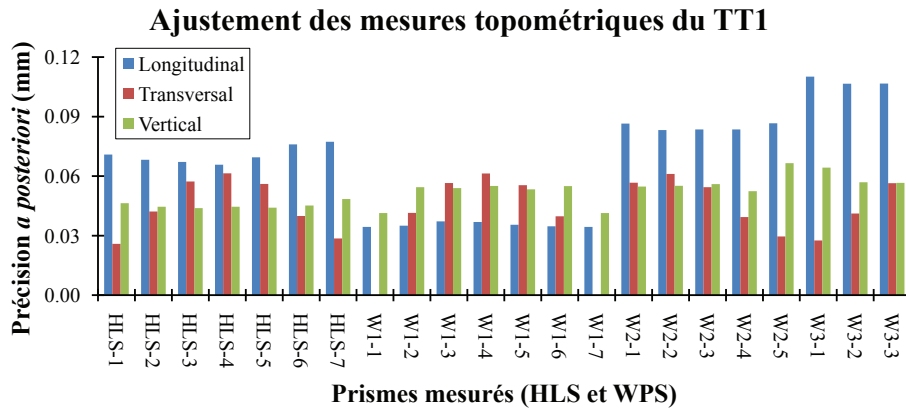


FIG. 3.36 – Précisions des mesures topométriques des plaques

totale LEICA TDA 5005, d'un *laser tracker* LEICA LTD 500 et d'un niveau WILD NA2 avec micromètre, selon la configuration de réseau en figure 3.37.

TAB. 3.7 – Statistiques des précisions *a posteriori* issues de la topométrie

Paramètre	Longitudinal	Transversal	Vertical
Minimum	0.03 mm	0.00 mm	0.04 mm
Maximum	0.11 mm	0.06 mm	0.07 mm
Médiane	0.07 mm	0.04 mm	0.05 mm
Moyenne	0.07 mm	0.04 mm	0.05 mm
Écart-type	0.02 mm	0.02 mm	0.01 mm

Les six stations réalisées pour ce lever étaient libres, à défaut de repère accessible. Les anciens piliers des ISR, servant jadis aux centrages des réflecteurs et des appareils de mesures topométriques, ont été également mesurés. Leurs coordonnées n'ont pas pu être retrouvées dans les archives du groupe des géomètres. L'intérêt de les lever consistait à élargir au maximum la partie observée du tunnel pour limiter les déviations transversales du résultat. Les mesures ont été traitées par le logiciel général de compensation (LGC) dans le système de coordonnées du CERN, le CCS. Un modèle de géoïde est intégré au logiciel pour appliquer les mesures, notamment le nivellement, dans un espace euclidien. Une fois les coordonnées obtenues dans le CCS, une transformation est appliquée vers un système de coordonnées propre au TT1 et adapté à l'expérience (lire le paragraphe 4.2.3.1).

Chaque plaque métrologique supporte un minimum de trois points communs, mesurés à la fois par la CMM en métrologie et par l'instrumentation utilisée lors du lever de l'expérience. Ces trois points sont suffisants pour calculer les six paramètres de la similitude 3D qui sont inconnus, les trois translations et les trois rotations. Les résultats de ce calcul, pour chacune

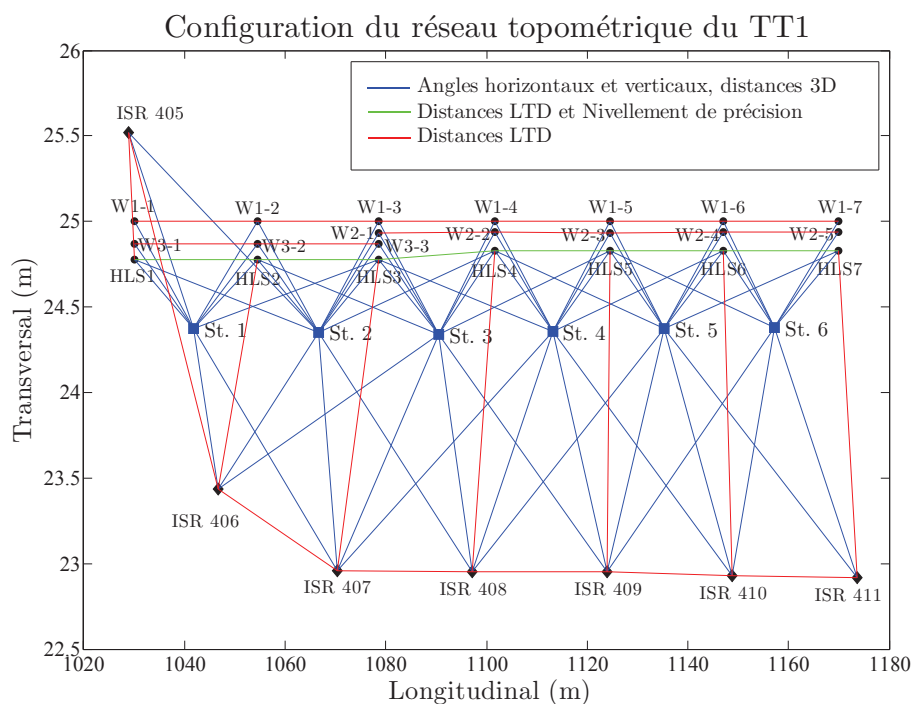


FIG. 3.37 – Configuration du réseau topométrique de précision du TT1

des plaques, sont exposés dans la table en figure 3.38.

Plaque	Tz (m)	Tx (m)	Ty (m)	$\theta_z$ (rad)	$\theta_x$ (rad)	$\theta_y$ (rad)
#1	1030.01010	24.99996	510.01010	-0.0014	0.0021	-0.0017
#2	1054.55213	24.99916	510.00889	0.0062	-0.0022	0.0046
#3	1078.64495	24.99948	510.01010	0.0004	-0.0011	-0.0007
#4	1101.75383	25.00033	510.01064	-0.0002	0.0033	-0.0042
#5	1124.46130	24.99986	510.00947	0.0045	-0.0003	-0.0004
#6	1146.96496	25.00084	510.01015	0.0004	0.0007	0.0065
#7	1169.98986	24.99998	510.01099	-0.0016	-0.0012	0.0004

FIG. 3.38 – Résultats de la transformation approchée

Connaissant les précisions *a posteriori* des coordonnées des points issues de l'ajustement des mesures topométriques, ainsi que celles issues des mesures CMM, le calcul des transformations des plaques a été simulé selon la méthode de Monte-Carlo. Les écart-types sur les translations et les rotations ont pu être déterminés (voir la table en figure 3.39).

Selon l'analyse sommaire de l'équation linéarisée 3.55, une incertitude de 1 mrad sur les tangages et lacets des plaques est suffisante pour ne pas affecter le résultat d'une erreur supérieure à 1  $\mu\text{m}$ . En se référant aux résultats du TT1, le calcul de ces paramètres en utilisant les mesures topométriques

### 3.4 Compensation des réseaux

Plaque	Tz (mm)	Tx (mm)	Ty (mm)	$\theta_z$ (mrad)	$\theta_x$ (mrad)	$\theta_y$ (mrad)
# 1	0.04	0.02	0.04	0.16	0.75	0.62
# 2	0.04	0.04	0.05	0.12	0.88	0.74
# 3	0.07	0.06	0.05	0.11	1.07	0.98
# 4	0.07	0.06	0.05	0.10	1.01	1.21
# 5	0.06	0.05	0.05	0.10	0.93	1.11
# 6	0.05	0.04	0.05	0.11	0.90	1.02
# 7	0.04	0.02	0.04	0.18	0.98	1.02

FIG. 3.39 – Précisions de la transformation approchée

est suffisant.

D'une manière plus générale, ce calcul permet d'obtenir des valeurs approchées de tous les paramètres de transformations des plaques. Il sont suffisamment précis pour déterminer les coordonnées longitudinales  $Z$  des points observés par les capteurs HLS et WPS dans le repère général, selon la relation 3.51. L'information longitudinale est absolument indispensable pour modéliser les fils et les surfaces d'eau. Mais une incertitude de plusieurs dixièmes de millimètres est suffisante pour assurer une précision micrométrique sur le résultat [Touzé, 2010a]. Dès lors, dans l'équation 3.53, les paramètres encore inconnus sont les translations transversales et verticales, le roulis et, bien évidemment ceux intervenant dans les fonctions  $f$  et  $g$  de modélisations des références d'alignement.

Le roulis de chaque plaque, quant à lui, peut être déduit des lectures des inclinomètres, pour peu que les orientations de ceux-ci soient calibrées et que les défauts de verticalité au niveau des plaques soient connus. En effet, au paragraphe 3.3.3.2, il a été expliqué que les lectures d'un inclinomètre biaxial correspondent aux coordonnées du vecteur de la direction de la verticale  $\vec{\zeta}$  dans le repère de mesure du capteur.

Soient  $\alpha_x$  et  $\alpha_y$  les deux angles fournis par l'inclinomètre. Soient les matrices de rotations  $\rho$  et  $r$ , respectivement de calibration de l'orientation de l'inclinomètre et de son repère de centrage. Le roulis  $\theta_z$  de la plaque, contenu dans la matrice de rotation  $R$ , peut être obtenu en résolvant l'équation matricielle 3.56.

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[ \vec{\zeta} \right]_{CLIC} = \omega \cdot R \times r \times \rho \times \begin{bmatrix} \tan \alpha_x \\ \tan \alpha_y \\ 1 \end{bmatrix} \\ \text{avec} \\ \omega = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha_x + \tan^2 \alpha_y}} \approx 1 \end{array} \right. \quad (3.56)$$



#### 3.4.4.3 Décomposition déterministe du MRN

En mettant bout à bout l'ensemble des définitions faites au cours du chapitre 3 de cette thèse, il est possible d'établir un algorithme décrivant sans aucune ambiguïté le fonctionnement du réseau métrologique de référence. Il permet de visualiser l'ensemble des paramètres qui entrent en jeu pour résoudre le MRN. Cet algorithme est schématisé sur la figure 3.40. Il est décomposé en dix étapes élémentaires, des mesures CMM des bancs de calibration des capteurs et des plaques métrologiques à la compensation finale, en passant par la calibration des capteurs et l'ajustement des mesures topométriques. Ces étapes sont décrites dans l'énumération ci-dessous.

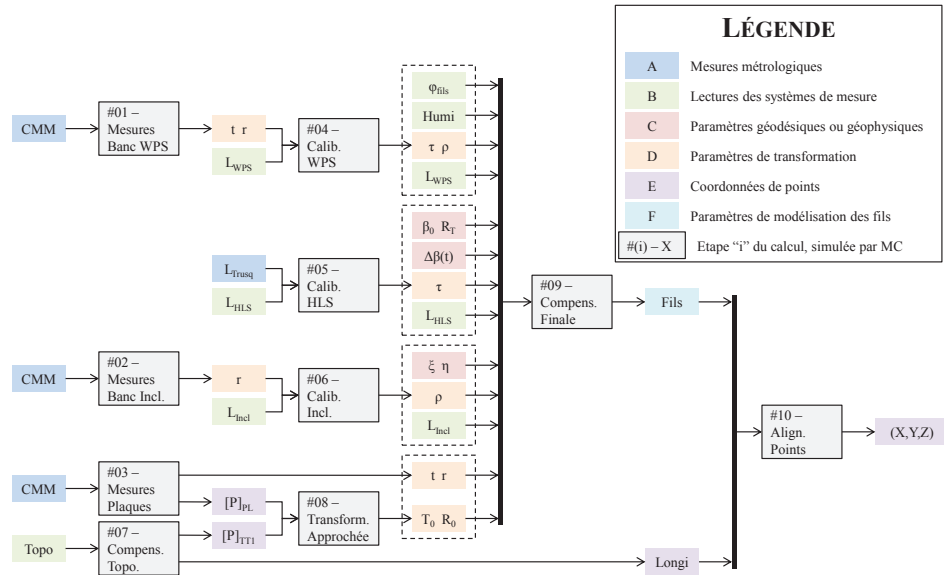


FIG. 3.40 – Diagramme des étapes de calcul du MRN

1. Mesures CMM du banc de calibration du zéro des capteurs WPS. Les paramètres des transformations des repères de centrage vers celui du banc sont déduits des coordonnées issues des mesures métrologiques. Lire le paragraphe 3.3.2.3.
2. Mesures CMM des plaques métrologiques en invar. Les paramètres des transformations des repères de centrage des capteurs vers celui de la plaque sont déduits des coordonnées issues des mesures métrologiques. Lire le paragraphe 3.3.4.2.
3. Mesures CMM du banc de calibration de l'orientation des inclinomètres. Les paramètres des transformations des repères de centrage vers celui du banc sont déduits des coordonnées issues des mesures métrologiques. Lire le paragraphe 3.3.3.2.

4. Calibration du zéro des capteurs WPS. À partir des paramètres de transformations des repères de centrage du banc et des lectures du capteur calibré, les matrices de translation et de rotation définissant les axes de mesure du WPS sont calculées. Lire le paragraphe 3.3.2.2.
5. Calibration du zéro des capteurs HLS. À partir des lectures du capteur calibré et de celles de la jauge employée, la distance entre le centre de la sphère TAYLOR HOBSON et le zéro électrique du HLS est calculée. Lire le paragraphe 3.3.3.1.
6. Calibration de l'orientation des inclinomètres. À partir des paramètres de transformations des repères de centrage du banc et des lectures du capteur calibré, la matrice de translation définissant l'orientation absolue de l'inclinomètre est calculée. Lire le paragraphe 3.3.3.2.
7. Ajustement des mesures topométriques par la méthode de compensation des moindres carrés. Lire le paragraphe 3.4.4.2.
8. Calcul approché des paramètres de la similitude 3D des plaques métrologiques au repère général. Le calcul, effectué par une compensation par moindres carrés, permet d'obtenir ces paramètres des coordonnées de mêmes points mesurés par des moyens topométriques et métrologiques. Lire le paragraphe 3.4.4.2.
9. Compensation finale du réseau métrologique de référence. En appliquant les matrices de calibrations des capteurs (HLS, WPS et inclinomètres) et celles de leurs repères de centrage, les mesures sont exprimées dans le système de coordonnées des plaques. Les positions longitudinales des capteurs sont obtenues en appliquant les paramètres de la transformation approchée. Dès lors, les références d'alignement peuvent être modélisées. Les fils tendus requièrent les lectures de l'humidité relative le long du tunnel, ainsi que les valeurs mesurées des fréquences d'oscillation (lire le paragraphe 3.4.2.3). La modélisation des surfaces d'eau nécessite un modèle de marée, ainsi que la connaissance du défaut de verticalité des centres du réseau et du rayon de courbure de l'équipotentielle de pesanteur en ce lieu (lire le paragraphe 3.4.3.3). Pour déduire le roulis des plaques des mesures inclinométriques, le défaut de verticalité au niveau de chaque plaque doit être connu (lire le paragraphe 3.4.4.2). A l'issue de ce calcul, les paramètres obtenus sont ceux qui définissent les similitudes 3D des repères des plaques au système général, les fils tendus et les surfaces d'eau.
10. Alignement par rapport aux fils tendus. Cette dernière étape n'est plus du ressort du MRN. La position d'un point quelconque appartenant à un fil tendu est obtenue à partir de sa coordonnée longitudinale et des paramètres modélisant le fil tendu en question (lire le paragraphe 3.4.2.1).

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

Cette manière de décomposer la résolution du MRN fait largement usage de la géodésie et de la géophysique alors qu'un an auparavant, il s'agissait de s'en affranchir autant que possible [Touzé, 2010b]. L'idée sous-jacente à ce radical changement de stratégie est, en quelque sorte, l'aboutissement de la quête de justesse plutôt que de précision. L'intérêt de s'appuyer sur la surface équipotentielle de pesanteur, et ce malgré les difficultés liées à sa détermination dans le temps et dans l'espace, correspond à la volonté de rester au plus près de la réalité physique des systèmes de mesure. La solution compensée du MRN ne peut pas diverger de sa vraie position, qui est inconnue, parce qu'elle est constamment liée au seul objet disponible doté d'une réalité physique, le géoïde.

#### 3.4.5 Conclusion

Là encore la conclusion consiste à dire qu'il existe une solution, même si tous les points soulevés n'ont pas encore de réponse. Ainsi les fils tendus peuvent être modélisés dans l'espace par un système d'équation qui nécessite la détermination de cinq paramètres dont un, la flèche, pourrait être déterminé par une mesure de fréquence. Cette modélisation pourrait également être renforcée par des corrections compensant les effets d'un éventuel gradient d'humidité.

Le modèle utilisé pour les réseaux HLS est construit de manière à être au plus près de la réalité physique du problème. Il consiste à modéliser localement l'équipotentielle de pesanteur, la surface d'équilibre statique de l'eau, par une sphère oscillant dans le temps. En intégrant à ce modèle les méthodes de mesure de déviation de la verticale et du gradient de pesanteur, ainsi que des prédictions de marées, il est possible de réduire le nombre de paramètres inconnus à la seule ordonnée du point pivot du réseau.

Ensuite, concernant les degrés de libertés des plaques métrologiques dans le repère général, l'utilisation des mesures topométriques, qui dans le cas du CLIC proviendraient du *geodetic reference network* (GRN) et des lectures des inclinomètres, leur nombre pourrait être réduit de six à deux, en l'occurrence les translations transversales et verticales des plaques.

En considérant qu'une plaque supporte au minimum un inclinomètre, un capteur HLS et deux WPS, les inconnues, pour  $n$  plaques, sont au nombre de  $2n + 9$  (deux par plaque, un pour la surface d'eau et deux fois quatre pour deux fils tendus). Le nombre d'observations serait alors égal à  $5n$  (pour chaque plaque, deux lectures par WPS et une pour le HLS). Comme la table 3.8 le montre, à partir de quatre plaques métrologiques de recouvrement, le système devient solvable et redondant.

L'objectif ici consiste à proposer une solution au problème général de la faisabilité du réseau métrologique de référence. Analytiquement, il existe une solution. En pratique ce n'est pas encore totalement possible, notamment en ce qui concerne les mesures de fréquence, les corrections dues à l'humidité

TAB. 3.8 – Degrés de liberté de la résolution du MRN

Nombre de plaques	Inconnues	Observations
1	11	5
2	13	10
3	15	15
4	17	20
5	19	25

sans oublier les plus audacieux d'entre tous ces enjeux, les prédictions de marées, la courbure de l'équipotentielle de pesanteur et la connaissance du défaut de verticalité.

### 3.5 Conclusion

La fin du chapitre 2 mettait en évidence le fait que considérer le pré-alignement actif du CLIC comme un problème de gestion de similitude 3D permettait de proposer une solution liant chacune de ses étapes. La fin du chapitre 3 montre que le développement de cette idée permet d'établir un algorithme complet, dans lequel tous les paramètres de la résolution du réseau métrologique de référence sont définis. De nombreux travaux doivent encore être menés pour déterminer chacun de ces paramètres avec une incertitude suffisante, certes, mais à défaut, les directions vers lesquelles des investigations doivent être faites sont connues désormais.

Tout d'abord, pour obtenir cette solution, il a fallu analyser chacun des capteurs employés afin de déduire les systèmes d'axes les plus appropriés pour pouvoir appliquer les mesures. Ensuite, il était nécessaire d'adapter les interfaces des différents capteurs, ne serait-ce que pour permettre une définition d'un repère de centrage pérenne. Ce travail a été nécessairement associé au développement d'outils permettant de mesurer la transformation des axes de mesures vers le repère de centrage : les bancs de calibration des zéros et des orientations des WPS et inclinomètres. Ces travaux ont été faits d'après le postulat que ces capteurs ne souffraient d'aucune dérive électronique, certes, mais l'objectif consistait à démontrer qu'une justesse de quelques micromètres ou de quelques microradians pouvait être atteinte. L'optimisation des électroniques ne devient rentable qu'à partir du moment où cette aptitude à la justesse est démontrée.

Grâce à l'apport des mesures CMM en laboratoire de métrologie, il est extrêmement aisé, d'une part de définir un système euclidien pour chaque plaque mesurée et, d'autre part de définir les différents repères de centrage des capteurs dans ce système. Là encore, une incertitude de mesure micrométrique peut être atteinte. Plus subtilement, les incertitudes de mesures

### 3 Gestion des systèmes de coordonnées

---

des CMM étant de plus en plus faibles, il a été démontré que cette étape sera prochainement une source d'erreur négligeable pour peu que les repères de centrage soient bien construits (par exemple la distance entre billes du centrage des inclinomètres).

Enfin, il est possible, à partir de la modélisation des références d'alignement que sont les fils tendus et les surfaces hydrostatiques, de définir une méthode permettant de calculer les positions et orientations des plaques métrologiques dans le repère euclidien général. Cette solution est au plus près de la réalité physique en se basant sur la surface de référence que représente l'équipotentielle de pesanteur. Cette approche déterministe est la grande force de la méthode proposée. Mais c'est également sa plus grande faiblesse parce qu'à ce niveau de précision, la connaissance de la surface équipotentielle de pesanteur et de ses variations dans le temps représente indéniablement un défi. La justesse et l'assurance de la justesse sont à ce prix.

# EXPÉRIENCES ET SIMULATIONS

---

## Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>118</b>
<b>4.2</b>	<b>Tests expérimentaux du MRN</b>	<b>119</b>
4.2.1	Introduction	119
4.2.2	Le test d'alignement du TT1	119
4.2.3	Dernières améliorations du TT1	125
4.2.4	Le TT83 et le fil de 500 m	134
4.2.5	Conclusion	141
<b>4.3</b>	<b>Simulations du pré-alignement du CLIC</b>	<b>142</b>
4.3.1	Introduction	142
4.3.2	Modèle proposé sur LGC	142
4.3.3	Simulations du MRN au TT1	146
4.3.4	Conclusion	154
<b>4.4</b>	<b>Futurs axes de recherche</b>	<b>154</b>
4.4.1	Introduction	154
4.4.2	Validation expérimentale du modèle	155
4.4.3	Alignement d'un système dynamique	161
4.4.4	Conclusion	164
<b>4.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>164</b>

---

### 4.1 Introduction

L'analyse de la chaîne métrologique du CLIC, à la fin du chapitre 2, a montré que les étapes constituant le pré-alignement actif, de la géodésie en surface au repositionnement dans le tunnel, ne formaient un ensemble cohérent qu'en les considérant comme un problème général de gestion de systèmes de coordonnées. En partant de ce constat, il a été possible d'aboutir, à la fin du chapitre 3, à une solution complètement déterminée s'arrêtant à la frontière entre le MRN et le SPN, lorsque les paramètres définissant les fils tendus dans un espace euclidien sont utilisés pour fournir les coordonnées de points rattachés aux composants à aligner.

Les aspects relatifs aux calibrations des capteurs et à la métrologie de leurs supports respectifs ont été présentés, de même que les résultats associés. Les modèles mathématiques des références d'alignement, à savoir les fils tendus, les surfaces d'eau et la direction de la verticale, qui interviennent dans la dernière étape de calcul du MRN, ont été décrits. Tous les outils nécessaires au calcul de l'incertitude de mesure du MRN sont en place. Il ne reste qu'à la mettre en évidence expérimentalement et théoriquement, par le biais de simulations de Monte-Carlo.

Au cours de ce chapitre, les expériences majeures qui ont été faites vont être présentées, de même que leurs résultats associés. La plus importante est sans conteste celle menée dans le tunnel du TT1 depuis 2006. Initialement conçue pour calculer l'incertitude de mesure du recouvrement des fils, cette expérience s'est transformée en maquette du MRN sur 140 m. La seconde expérience consistait à étudier un cas extrême des mesures d'écartométrie par rapport à un fil tendu. Un fil de 500 m avait été tendu pendant plusieurs mois entre 2007 et 2008.

La méthode de décomposition du pré-alignement qui est proposée a été soumise, en plus des expériences, à des simulations de Monte-Carlo. Un premier modèle, approximatif, avait été bâti en 2008 pour étudier la propagation des erreurs sur 22 km. Un second modèle, exhaustif mais limité à la taille du TT1, a été proposé en 2010. Il est complémentaire des validations expérimentales dans la mesure où il prend le relais du TT1 dont les résultats sont limités par plusieurs facteurs.

Les résultats issus des expériences et des simulations ne sont pas encore aptes à clore le débat sur la faisabilité du pré-alignement du CLIC. C'est pourquoi, dans la dernière partie de ce chapitre, les futurs axes de recherche seront brièvement décrits. Ils correspondent aux directions à suivre, à plus ou moins long terme, pour, non seulement finaliser la démonstration de la faisabilité, mais aussi rendre le pré-alignement actif capable de gérer le système dynamique que sera le CLIC.

## 4.2 Tests expérimentaux du MRN

### 4.2.1 Introduction

Les expériences liées aux études de faisabilité du pré-alignement du CLIC, qui vont être décrites dans cette partie, ont été initialement développées en 2006. La plus importante, celle menée dans le tunnel du TT1, est omniprésente dans cette thèse. En effet, ce sont ses résultats, et notamment leurs limitations, qui ont conduits aux différents développements aboutissant à ceux décrits au chapitre 3. Le test d’alignement du TT1 avait pour but initial le calcul de l’incertitude de mesure du recouvrement des fils. Désormais, il est considéré comme la reproduction sur 140 m du réseau métrologique de référence (MRN).

L’autre expérience, faite dans les *transfer tunnel 83* (TT83) et *transfer tunnel 84* (TT84), n’a duré que quelques mois. Elle avait pour but de mettre à l’épreuve les très longs fils en tant que référence d’alignement. Est-il possible de tendre un fil de 500 m ? Est-il possible d’atteindre une incertitude de mesure micrométrique ? Telles étaient les questions à son origine.

Dans cette partie, ces deux expériences vont être présentées, depuis leurs objectifs initiaux lors de leurs conceptions, jusqu’à leurs derniers résultats. Leurs évolutions respectives dans le temps vont être décrites et analysées. Elles seront révélatrices, notamment dans le cas du TT1, du changement de l’approche globale au problème du pré-alignement du CLIC qui s’est dirigée vers la gestion des systèmes de coordonnées

### 4.2.2 Le test d’alignement du TT1

#### 4.2.2.1 Genèse de l’expérience

Le TT1 servait jadis à amener le faisceau de particules du PS jusqu’aux ISR. Depuis le démantèlement des ISR, dans les années 1980, le TT1 ne sert plus au transfert de faisceaux. Il est dédié depuis au stockage de câbles faiblement irradiés dans les différents accélérateurs qui se sont succédés au CERN. Le TT1 est situé sur le site du CERN de Meyrin, en Suisse, entre les anneaux du PS et des ISR (voir l’extrait de plan en figure 4.1).

L’intérêt du TT1 est qu’il forme une ligne droite à pente nulle sur une distance de l’ordre de 120 m. De plus, son accès n’est pas limité dans le temps à cause du fonctionnement d’un accélérateur. Il est juste restreint aux personnes dotées d’un dosimètre afin de contrôler l’exposition aux radiations, qui, soit dit en passant, y sont très faibles. Enfin, du fait de l’utilisation du PS dans la chaîne de pré-injection des faisceaux de particules du LHC, son accès depuis le TT1 est interdit par une barrière de blindage en béton. Le TT1 est désormais une impasse. En dehors des géomètres et des responsables de la radio-protection<sup>1</sup> du CERN, personne n’y intervient plus. Les perturbations

---

<sup>1</sup>Le service de radio-protection du CERN, le groupe DGS-RP, est en charge de la



## 4 Expériences et simulations

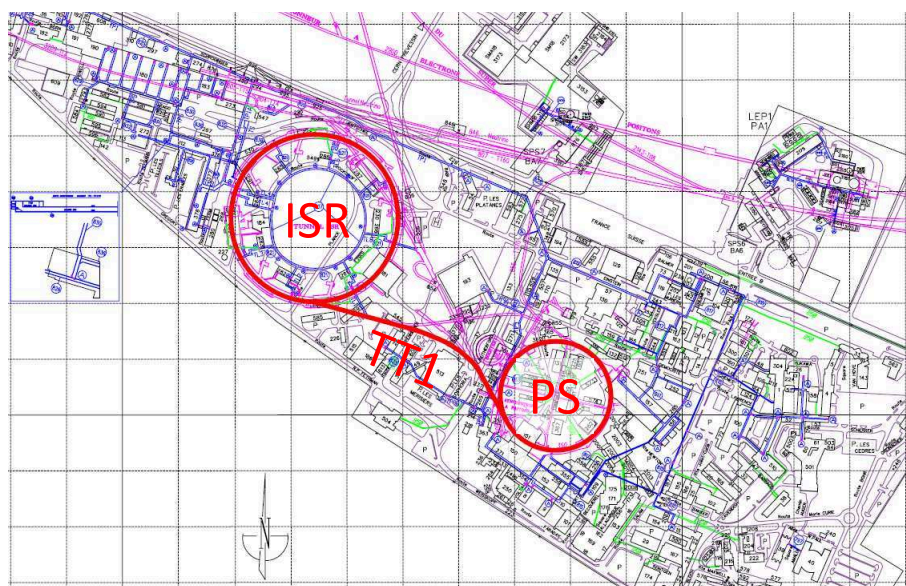


FIG. 4.1 – Localisation du TT1 sur le site de Meyrin du CERN

dues aux activités humaines y sont donc extrêmement faibles. Le niveau de bruit, à  $1\sigma$ , pour les fréquences supérieures à 1 Hz, a été mesuré, pendant un jour ouvrable, à 6 nm [Artoos *et al.*, 2009].

Au début des années 2000, les géomètres du CERN décidèrent d'utiliser ce tunnel pour étudier les phénomènes liés aux marées affectant les réseaux hydrostatiques mesurés par des capteurs HLS. Deux pots HLS, distants l'un de l'autre de 70 m, avaient été fixés à la paroi du tunnel [Becker, 2003].

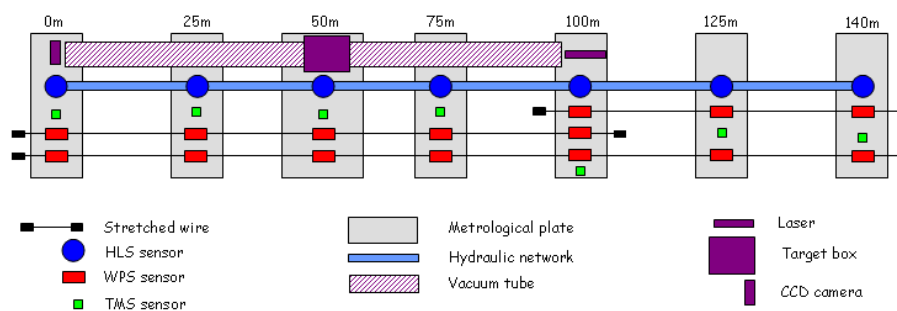


FIG. 4.2 – Schéma conceptuel du test d'alignement du TT1

En 2005, l'idée a germé au sein des géomètres du CERN de concevoir une expérience visant à démontrer l'aptitude du principe de recouvrement des fils pour aligner le CLIC selon les spécifications (voir le schéma en figure 4.2). Le TT1 et sa ligne droite disponible semblait particulièrement adapté pour

gestion des risques liés aux radiations et des déchets radioactifs.

---

## 4.2 Tests expérimentaux du MRN

accueillir une telle expérience. L'auteur a intégré l'équipe des études CLIC en janvier 2006 en tant qu'ingénieur responsable de la conception, mise en place et exploitation du test d'alignement au TT1.

La zone utile pour l'implantation d'un test d'alignement selon une ligne droite était limitée, dans la direction du PS, par la courbe du tunnel et, du côté des ISR, par la pente de ce dernier (voir l'extrait du plan de masse en figure 4.3 sur lequel le pas du carroyage est égal à 20 m).

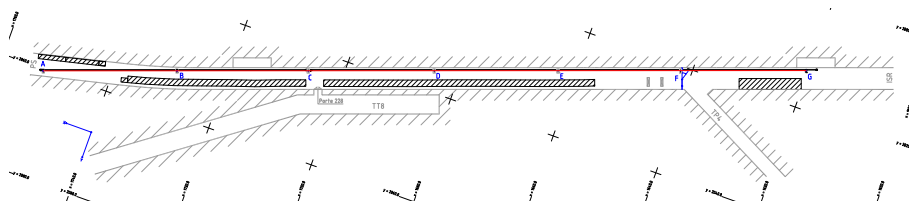


FIG. 4.3 – Plan de masse du test d'alignement du TT1

La conception a débuté en janvier 2006 avec comme seules données d'entrée le schéma en figure 4.2 et la ligne droite, matérialisant la direction longitudinale de l'expérience, peinte au sol. L'installation du matériel a commencé en avril 2006. Les premières acquisitions des capteurs ont été faites en août 2006. Une grande partie du matériel provient du démantèlement de la zone Est des expériences du SPS. Ainsi les piliers utilisés pour supporter les plaques métrologiques servaient aux quadrupôles de cette zone. Les nombreuses colonnes portant les protections des fils tendus, ainsi que le réseau hydrostatique, soutenaient les tubes du faisceau. Les capteurs HLS et WPS utilisés ont été commandés spécifiquement pour cette expérience.

### 4.2.2.2 Comparaison des systèmes de mesure

Du point de vue de l'instrumentation initiale, l'expérience a peu évolué depuis 2006. Sept plaques en invar, distantes les unes des autres d'environ 23 m se succèdent sur une longueur totale de 140 m (voir la figure 4.4). L'expérience est composée de trois fils tendus. Le premier, long de 140 m, est observé par un capteur WPS sur chaque plaque. Les seconds et troisièmes fils se succèdent au niveau de la troisième plaque invar. De ce fait, leurs longueurs sont respectivement de 49 m et 91 m. Un réseau hydrostatique est présent tout le long de l'expérience. Il est observé sur chaque plaque par un capteur HLS. Initialement, ce réseau était composé d'un tube de silicone, de 20 mm de diamètre, reliant chacun des pots HLS. Cette première configuration du TT1, désignée comme le « TT1 1.0 » comportait également la première version du système d'alignement laser sous vide par diffraction, le *red alignment system for CLIC* (RASCLIC), qui sera plus largement décrit au paragraphe suivant.

L'exploitation des données du TT1 a consisté, dans les premiers mois, à

## 4 Expériences et simulations

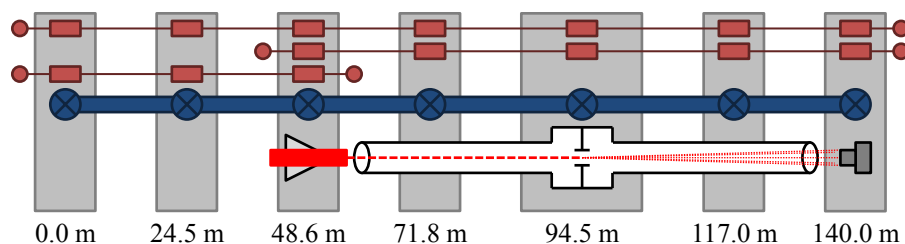


FIG. 4.4 – Première configuration du « TT1 1.0 »

étudier les corrélations entre les mesures des systèmes HLS et WPS. Du fait de la conception sommaire des systèmes de centrage des capteurs WPS, il était impossible d'effectuer autre chose que des comparaisons entre mesures relatives (voir la figure 4.5). Le réseau d'eau, notamment du fait du tube de silicone de faible diamètre, était extrêmement défaillant et avait besoin de seize heures pour se stabiliser après une vidange. En dehors de quelques rares périodes comme celle en figure 4.5, les mesures HLS n'étaient pas satisfaisantes car inexplicables par rapport à ce que les WPS observaient.

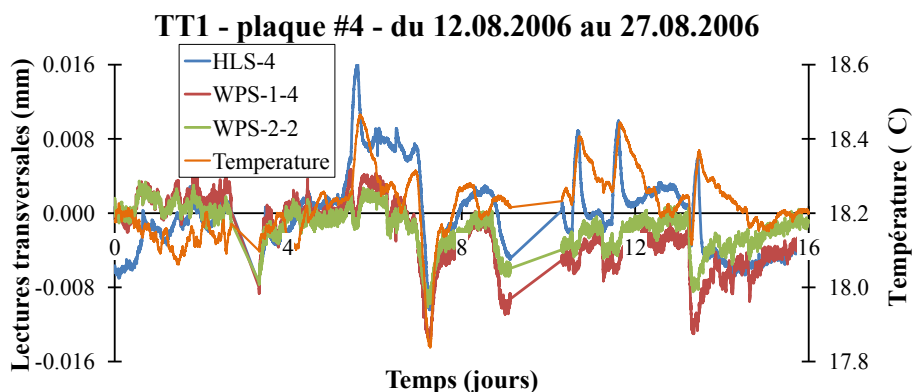


FIG. 4.5 – Premiers enregistrements en août 2006

À la fin de l'année 2007, des modifications majeures ont été effectuées, donnant naissance au « TT1 2.0 » (voir le schéma en figure 4.6). Les supports des WPS n'étaient plus des tiges filetées mais des cales en inox, le réseau HLS était déporté sur le côté et composé d'un tube en inox de 50 mm de diamètre intérieur et ce, sur toute la longueur de l'expérience. Le système RASCLIC avait lui-aussi été modifié et rallongé de 91 m à 140 m.

Cette mise à jour majeure avait été l'occasion d'introduire pour la première fois les mesures métrologiques. Les surfaces de référence en céramique des capteurs WPS avaient été mesurées au laboratoire de métrologie du CERN à l'aide de la CMM OLIVETTI. L'objectif consistait, naturellement, à dépasser les mesures relatives et à étudier la propagation des fils. Malheureuse-

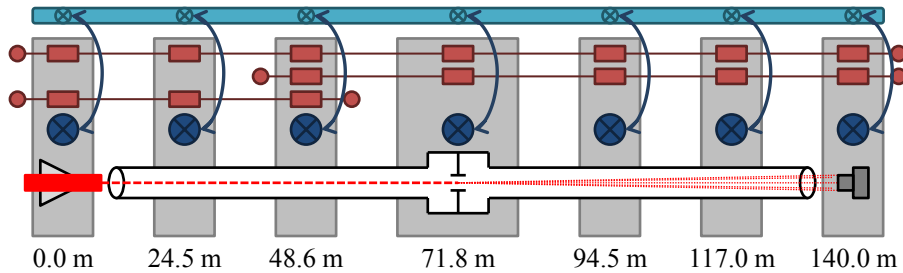


FIG. 4.6 – Configuration du « TT1 2.0 »

ment, chaque changement de capteur induisait la perte de cette calibration. Il était encore impossible de déterminer l'incertitude du recouvrement des fils. cet échec a conduit à la conception des systèmes de centrage forcé et au « TT1 3.0 » qui sera présenté au paragraphe 4.2.3.

#### 4.2.2.3 Le RASCLIC

Les géomètres d'accélérateurs de particules tentent d'utiliser des systèmes d'alignement laser depuis environs quarante années. Cependant le développement d'une telle solution requiert de s'affranchir d'une part, des problèmes de réfraction dus aux gradients de température et de pression et d'autre part, de la divergence inévitable des faisceaux lasers gaussiens [Schmid, 2010]. Pour résoudre ces deux inconvénients, la solution consiste à travailler avec un faisceau sous vide et à mesurer le maximum d'intensité d'un phénomène de diffraction plutôt que celui du spot dans son ensemble.

La première publication en ce domaine était basée sur la diffraction par des lentilles de Fresnel rectangulaires [Herrmannsfeldt *et al.*, 1968]. Ce système a été développé au *Stanford linear accelerator center* (SLAC) à San-Francisco pour des alignements d'une précision de l'ordre de 0.1 mm. Un autre système relativement abouti repose sur le principe de diffraction de Poisson, lorsqu'une sphère est placée dans l'axe d'un faisceau [Griffith, 1989]. Il est en cours de développement pour atteindre des incertitudes de mesures micrométriques au *Deutsches Elektronen Synchrotron* (DESY) à Hambourg.

Le système d'alignement RASNIK consiste à mesurer, sur quelques mètres, les déplacements d'une ligne droite matérialisée par une diode électroluminescente (DEL) et le centre d'une lentille et ce, à l'aide d'un *charge coupled device* (CCD) doté d'un masque codé [Dekker *et al.*, 1993]. Harry van der Graaf, de NIKHEF, a eu l'idée d'adapter le principe du RASNIK sur de plus grandes distances en remplaçant la DEL par une source laser et la lentille par une plaque avec un large trou. La matrice CCD n'a plus besoin de masque codé. Définir l'intersection de l'axe du faisceau dans le repère du capteur consiste à calculer la position du maximum d'intensité du phénomène de diffraction enregistré [Kea, 2006] (voir le schéma en figure 4.7).

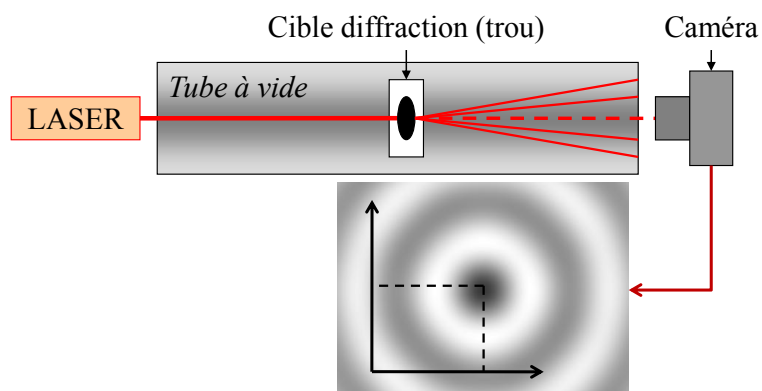


FIG. 4.7 – Principe de fonctionnement du RASCLIC

Le système de mesure obtenu a été baptisé *Red Alignment System for CLIC* ou RASCLIC. Une partie de sa conception, ainsi que son intégration dans l'expérience du TT1 ont directement été incluses au cahier des charges de la mise en place de ce test en 2006. Diverses améliorations ont été apportées à ce système. Il a été rallongé en 2007. Un deuxième faisceau a été ajouté peu après. De plus, les algorithmes de traitement d'images ont été optimisés ce qui a permis de considérablement augmenter la fréquence d'acquisition, jusqu'à 70 Hz. Le RASCLIC pouvait alors prétendre au titre de sismographe [Kea, 2006] [Becker, 2008].



FIG. 4.8 – Tests de déplacements transversaux des plaques invar



Des tests de linéarités ont été faits en mai 2007 pour comparer les résultats obtenus avec les WPS observant les fils de 91 m et de 140 m et le RASCLIC. Le protocole expérimental était relativement simple. Il s'agissait de déplacer légèrement en transversal la plaque invar supportant la cible de diffraction, en la tirant à l'aide d'un câble au bout duquel un contrepois était accroché (voir la figure 4.8, correspondant au même test sur une autre plaque invar).

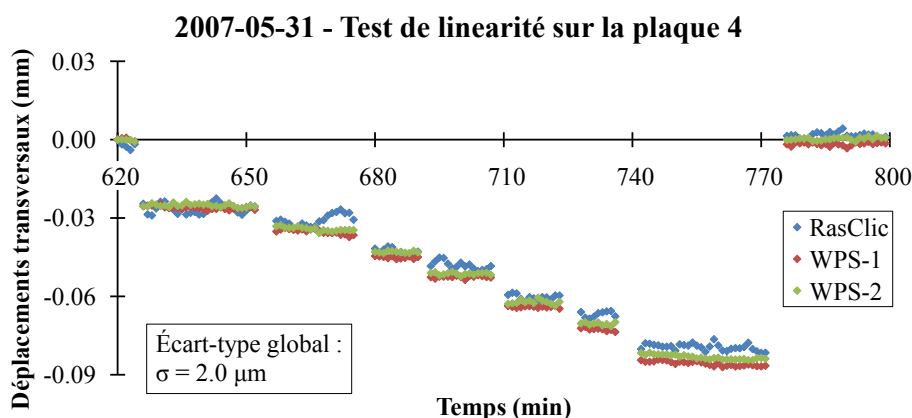


FIG. 4.9 – Comparaison des linéarités des WPS et RASCLIC

La figure 4.9 représente les déplacements mesurés par le RASCLIC et les capteurs des deux fils WPS de 91 m et de 140 m. La masse du contrepois a été augmentée par paliers. Le déplacement maximal atteignait presque 0.1 mm. L'absence d'hystérésis peut être constaté sur les résultats. L'écart-type des écarts entre les différentes mesures est de  $2 \mu\text{m}$ . Ce qui est intéressant dans ce résultat, c'est qu'il ne valide pas uniquement la linéarité du RASCLIC, mais aussi celle des WPS pour lesquels, en transversal, aucun étalon de mesures sur une centaine de mètres de longueur n'existe. La seule solution consiste à tenter d'obtenir des résultats identiques avec des systèmes de mesures qui sont basés sur des principes physiques radicalement différents.

### 4.2.3 Dernières améliorations du TT1

#### 4.2.3.1 Configuration actuelle

La dernière modification majeure du TT1 a eu lieu au cours de l'année 2008. Elle concernait essentiellement l'adaptation des plaques métrologiques en invar aux systèmes de centrage forcé des inclinomètres et des capteurs WPS (voir la photographie en figure 4.10). De l'instrumentation a été ajoutée tels cinq inclinomètres monoaxes JA5L ainsi qu'une sonde d'humidité au niveau de chacune des sept plaques (voir le schéma en figure 4.11).

Une autre spécificité du « TT1 3.0 » par rapport aux versions précédentes est son rattachement au système de coordonnées CCS du CERN. Comme il



FIG. 4.10 – Perspective du « TT1 3.0 »

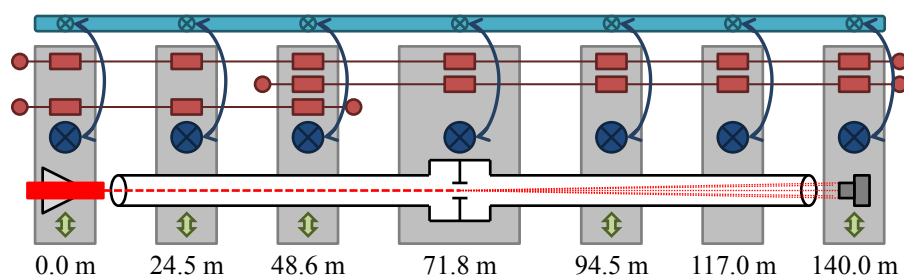


FIG. 4.11 – Configuration du « TT1 3.0 »

a été expliqué précédemment, les coordonnées des points mesurés lors du lever dans ce système n'étaient pas directement exploitables. En effet, pour modéliser les références d'alignement, un axe longitudinal est nécessaire. Un repère local a donc été construit spécifiquement pour cette expérience à partir du CCS.

Pour bâtir un repère local astronomique de manière rigoureuse, il est nécessaire de connaître les coordonnées géodésiques et astronomiques à l'origine [Jones, 2000b]. Sans cela, il est impossible d'assurer un défaut de verticalité nul à l'origine du nouveau repère. Le problème du TT1 est que les coordonnées des piliers ont disparu. Les seules informations à disposition pour placer le TT1 dans le CCS sont celles fournies par des plans de génie civil établis lors de la construction du projet. Sur ces plans figuraient des coordonnées de quelques points de l'axe du tunnel à partir desquels il a été possible de positionner et d'orienter les données levées et représentées sur celui en figure 4.3. Quand bien même ces plans de génie civil seraient de très bonne qualité, il est difficilement concevable que la précision du rattachement de l'expérience du TT1 soit meilleure que 20 cm. De plus des différences de l'ordre du mètre ont été constatées entre les mesures dans le TT1 et les

anciens plans, notamment pour ce qui concerne les installations techniques. Du fait des doutes légitimes sur la qualité des coordonnées du rattachement, il a été décidé de construire, à l'aide des outils trigonométriques, un repère approché basé sur une surface équipotentielle sphérique. Comme la qualité de ce repère s'est avérée largement suffisante par rapport à la méthode rigoureuse, il a été décidé de le conserver tel quel. Voici comment il a été construit.

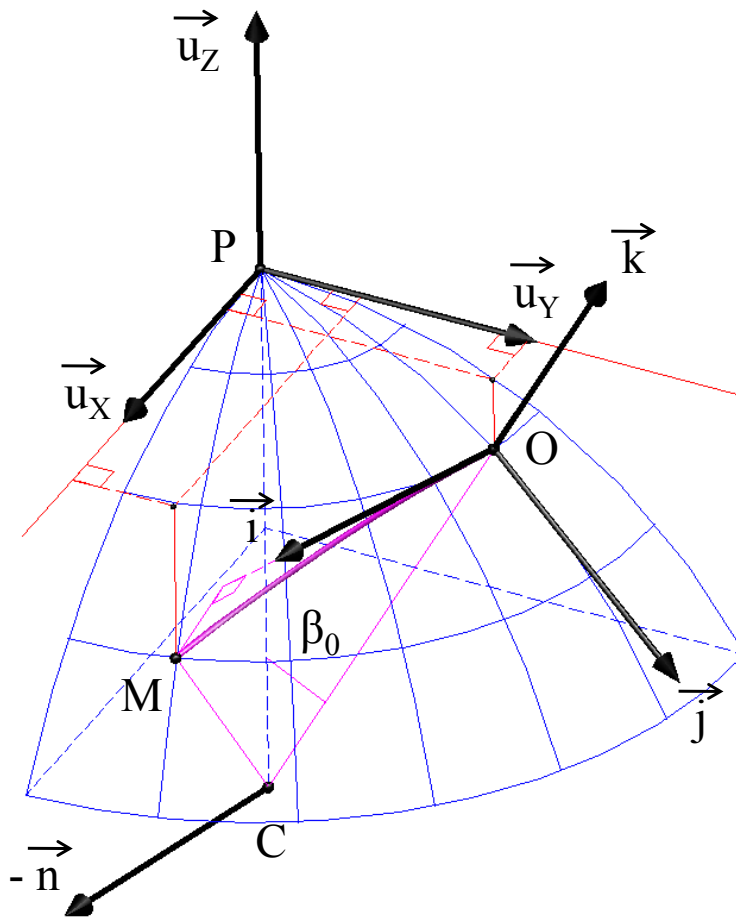


FIG. 4.12 – Construction du repère du TT1 par rapport au CCS

Soient les points de l'expérience du TT1 qui ont été mesurés lors du lever du tunnel en 2010 puis compensés de manière à obtenir leurs coordonnées dans le CCS. Les coordonnées des centres des prismes de topométrie de précision se logeant au centre des systèmes de centrage des WPS ont ainsi été obtenues. Le logiciel de compensation LGC fournit les coordonnées cartésiennes des points dans le CCS ainsi que leurs altitudes normales par rapport au géoïde.

Soit  $O$ , l'origine du repère du TT1. Il se situe à environ 300 m de l'origine



## 4 Expériences et simulations

---

du CCS, le pilier  $P_0$  au centre du PS.  $O$  correspond au milieu du fil de 140 m, c'est-à-dire, au centre de l'expérience. Soit  $N$  le centre du prisme correspondant au WPS de la dernière plaque invar du TT1. Les points  $P$  et  $M$  sont construits respectivement depuis  $P_0$  et  $N$  de manière à ce qu'ils aient les mêmes altitudes normales que  $O$ . De ce fait,  $O$ ,  $P$  et  $M$  appartiennent à la même surface équipotentielle de pesanteur qui va être considérée comme une sphère (voir la figure 4.12). Soit  $C$  le centre de cette sphère et  $r$  son rayon. Ce dernier est calculé à partir des définitions du CCS [Jones, 2000a] et de l'altitude normale de  $O$ . Sa valeur est  $r \approx 6371435$  m.

Soient  $\beta_0$  l'angle au centre  $C$  entre  $P$  et  $O$ , et  $\vec{n}$  le vecteur normal directeur au plan contenant  $C$ ,  $O$  et  $P$  (voir la figure 4.12).

$$\beta_0 = \sin^{-1} \frac{\sqrt{(x_0 - x_P)^2 + (y_0 - y_P)^2}}{r} \quad (4.1)$$

$$\vec{n} = \frac{1}{\|\vec{CP} \wedge \vec{CO}\|} \cdot \vec{CP} \wedge \vec{CO} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Soient les vecteurs  $\vec{u}_z$  et  $\vec{k}$  représentant les directions verticales respectivement dans le CCS et le repère du TT1.  $\vec{k}$  est l'image de  $\vec{u}_z$  par la rotation d'angle  $\beta_0$  autour du vecteur  $\vec{n}$ . La matrice  $R$  de cette rotation peut alors être calculée simplement en utilisant la méthode de l'axiateur [Kasser et Egels, 2001]. Soient les matrices  $\tilde{n}$ , obtenue depuis les coordonnées de  $\vec{n}$ , et  $I$ , la matrice identité.

$$\tilde{n} = \begin{bmatrix} 0 & -n_z & n_y \\ n_z & 0 & -n_x \\ -n_y & n_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$R = I + \sin \beta_0 \cdot \tilde{n} + (1 - \cos \beta_0) \cdot \tilde{n} \times \tilde{n} \quad (4.4)$$

La matrice de rotation étant définie par la relation 4.4, il est possible de calculer le vecteur  $\vec{k}$  à partir de  $\vec{u}_z$ .

$$\vec{k} = R \times \vec{u}_z \quad (4.5)$$

L'axe longitudinal  $\vec{i}$  du nouveau repère va être défini comme le vecteur unitaire du plan, contenant les points  $C$ ,  $O$  et  $M$ , et orthogonal au vecteur  $\vec{k}$ .

$$\begin{cases} \vec{j} = \frac{1}{\|\vec{k} \wedge \overrightarrow{CM}\|} \cdot \vec{k} \wedge \overrightarrow{CM} \\ \text{et} \\ \vec{i} = \vec{j} \wedge \vec{k} \end{cases} \quad (4.6)$$

Les vecteurs  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  et  $\vec{k}$  forme la base orthonormée directe du repère local du TT1. L'origine du repère est toujours le point  $O$ , auquel les coordonnées dans ce système sont arbitrairement choisies et fournies dans la formule 4.7.

$$[O]_{TT1} = \begin{bmatrix} 1100 \\ 25 \\ 510 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

La transformation pour aller du CCS vers le repère du TT1 est définie par les matrices de translation  $T_{TT1}$  et de rotation  $R_{TT1}$  dont les expressions sont fournies dans les relations en 4.8.

$$\begin{cases} R_{TT1} = [\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}]^t = \begin{bmatrix} -0.941148 & -0.337994 & -0.000050 \\ 0.337994 & -0.941148 & 0.000008 \\ -0.000049 & -0.000010 & 1.000000 \end{bmatrix} \\ \text{et} \\ T_{TT1} = [O]_{TT1} - R_{TT1} \times [O]_{CCS} = \begin{bmatrix} 3375.53422 \\ 1371.68641 \\ -1924.17019 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.8)$$

En appliquant les lectures des capteurs HLS dans le repère du TT1, comme il a été expliqué au paragraphe 3.4.3, il est possible de juger de la qualité de ce dernier. L'angle ajusté en figure 3.34, qui correspond au défaut de verticalité au centre du TT1, oscille entre  $-0.1 \mu\text{rad}$  et  $0.2 \mu\text{rad}$ , ce qui est de l'ordre du centième de seconde d'arc. C'est un résultat meilleur que ce que l'instrumentation actuelle permet [Jones *et al.*, 2010]. Le repère approché du TT1, construit initialement pour contrôler rapidement la justesse du rattachement de l'expérience dans le CCS, est tout à fait satisfaisant pour modéliser dans un repère euclidien les systèmes de mesures impliqués.

#### 4.2.3.2 Dispersion des mesures

En été 2009, du 22 juillet au 23 août, les principes de modélisation présentés dans le chapitre 3 ont été appliqués aux observations faites dans le TT1. Cependant, les résultats n'ont pu être exploités qu'au niveau du calcul de la dispersion des mesures, c'est-à-dire de la précision. En effet, si les interfaces de centrage forcé des capteurs avaient déjà été installées, le

## 4 Expériences et simulations

banc de calibration du zéro des WPS n'était pas encore achevé. De ce fait, il n'était pas possible d'estimer la justesse des mesures [Touzé, 2010b]. Les calculs associés aux résultats qui vont présentement suivre ont fait l'objet d'une publication dans la revue « XYZ », éditée par l'association française de topographie (AFT) [Touzé, 2010b].

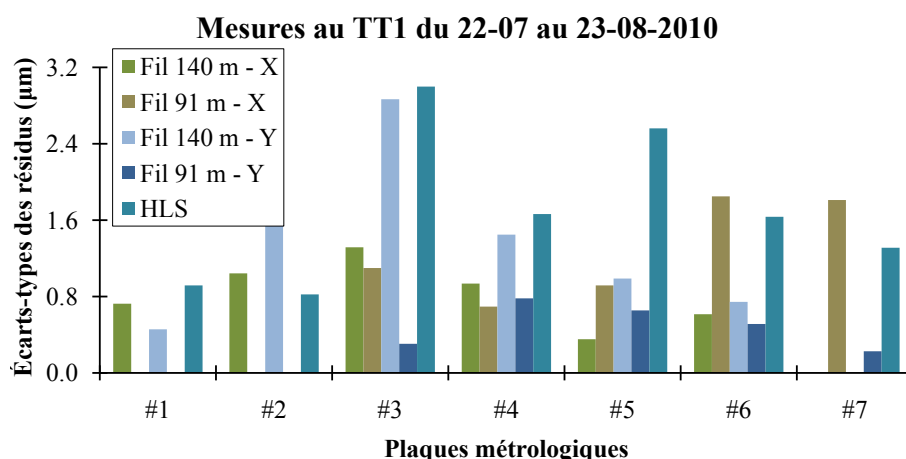


FIG. 4.13 – Écart-types des résidus après compensation

Les résidus obtenus à l'issue de la compensation finale ont été étudiés. Leurs moyennes respectives sur la période d'observation étaient élevées, de l'ordre du dixième de millimètre [Touzé, 2010b]. Cela est essentiellement dû à l'absence de paramètres de calibration des zéros des WPS qui, d'après les résultats obtenus en décembre 2009, peuvent atteindre 0.5 mm (voir la table 3.2). En revanche, leurs écart-types étaient tous compris entre 0.2  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ , qu'il s'agisse des mesures WPS, HLS, transversales ou verticales (voir la figure 4.13).

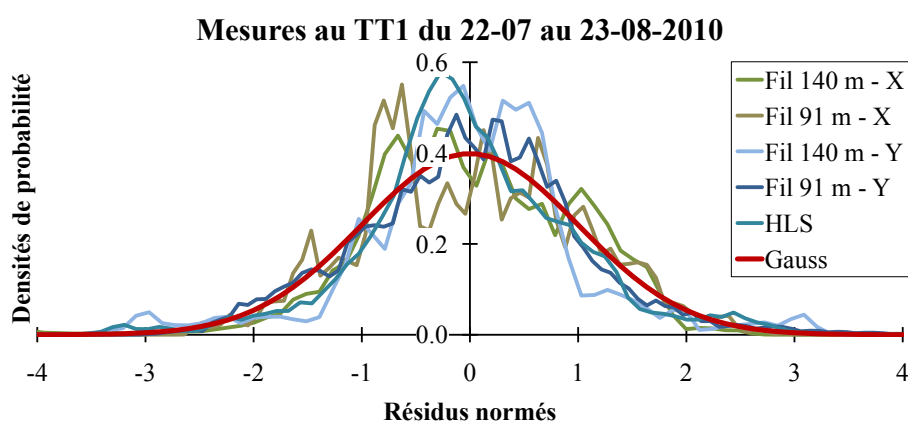


FIG. 4.14 – Distributions des résidus normés

---

## 4.2 Tests expérimentaux du MRN

Les résidus normés, dont les distributions respectives ont été étudiées par la suite, n'ont pas été calculés selon la méthode de la théorie des moindres carrés qui consiste à diviser le résidu par son écart-type correspondant dans la matrice de variance-covariance sur les résidus [Linnik, 1962]. En effet, en l'absence de paramètres de calibration des WPS, les moyennes des résidus étaient trop grandes pour que la comparaison des résidus normés, au sens des moindres carrés, soit significative. C'est pourquoi, des résidus, les moyennes respectives ont été déduites. Les valeurs obtenues ont ensuite été divisées par leurs écarts-types pour donner les résidus normés. Les distributions obtenues ont ensuite été comparées à la loi normale centrée réduite. Même si celles-ci sont visuellement satisfaisantes, les tests d'adéquation du  $\chi^2$ , sur chacune des séries de résidus normés, sont négatifs.

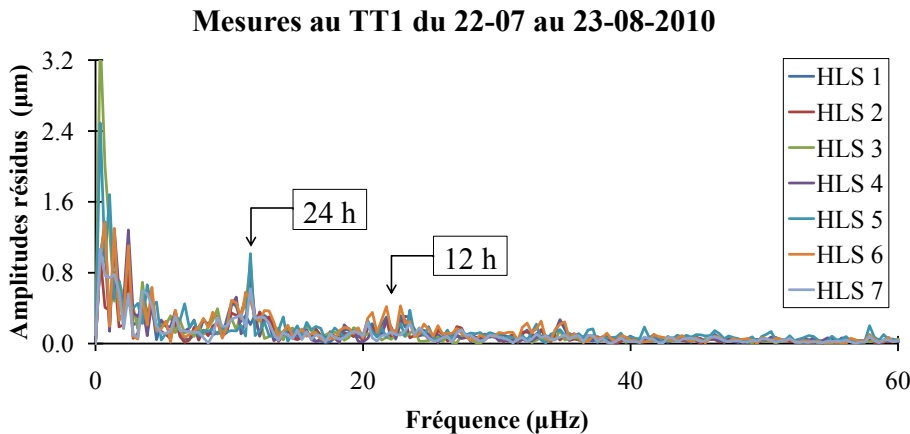


FIG. 4.15 – Spectre des résidus des mesures HLS

Une autre analyse a permis de mettre en évidence l'aptitude de la compensation finale à supprimer les signaux périodiques dus aux marées. Dans les résultats présentés dans cette partie, l'inclinaison due aux marées n'a pas été fournie par un inclinomètre ou des prédictions. Il s'agissait d'une inconnue devant être ajustée [Touzé, 2010b]. Une transformée de Fourier a été effectuée sur les résidus des observations HLS. Le spectre obtenu est représenté en figure 4.15. Le principal pic résiduel correspond à un signal de période égale à 24 h. Les amplitudes semi-diurnes, particulièrement révélatrices des phénomènes de marées [Melchior, 1966], sont inférieures à 0.4  $\mu\text{m}$ . L'amplitude du signal diurne atteint 1  $\mu\text{m}$ . Cependant, avant de pouvoir affirmer qu'il n'est pas dû à une modélisation incomplète des marées, il faudrait poursuivre le traitement des données afin de vérifier qu'il ne s'agit pas des effets d'une variation périodique quotidienne de la température.

## 4 Expériences et simulations

### 4.2.3.3 Justesse des mesures

Une fois que les zéros des capteurs WPS ont été calibrés, en décembre 2009, ils ont été installés à nouveau au TT1 pour tenter de calculer la justesse du réseau. Le graphique 4.16 représente les résidus transversaux et verticaux sur les observations des WPS et des HLS, obtenus après la compensation finale telle qu'elle est décrite au paragraphe 3.4. Il s'agit du résultat du TT1 obtenu à partir d'un seul enregistrement et non sur une longue période de temps comme au paragraphe précédent.

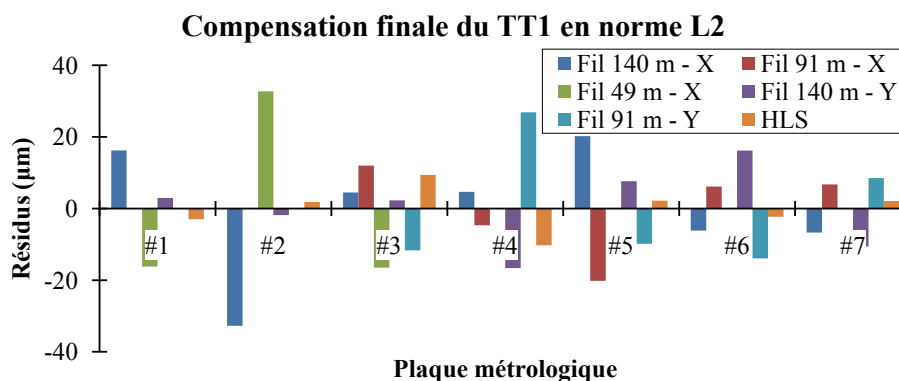


FIG. 4.16 – Résidus de l'ajustement par moindres carrés du TT1

Les écarts-types des résidus sont, respectivement en transversal et en vertical, de  $17\ \mu\text{m}$  et  $11\ \mu\text{m}$ . Ce résultat, bien qu'excellent par rapport à l'état de l'art en topométrie de précision, n'atteignait pas les attentes. La tolérance à  $3\sigma$  de  $10\ \mu\text{m}$  n'était pas atteinte. Au mieux, elle était frôlée en vertical à  $1\sigma$ . Il fallait alors savoir si la justesse intrinsèque du réseau du TT1 avait été atteinte ou si les observations étaient entachées de fautes. Il a été décidé d'utiliser une méthode de compensation plus efficace pour détecter les fautes que les moindres carrés, en l'occurrence la norme L1 [Durand, 2009].

Il s'agit, non plus de minimiser la somme des carrés des résidus mais celle de leurs valeurs absolues [Cornillon et ner Løber, 2007]. La résolution de ce type de problème relève de la programmation linéaire pour lequel il existe la méthode dite du « Simplexe » [Durand, 2009]. Si l'adaptation du système matriciel des équations normales, faites pour la compensation par moindres carrés, est assez simple [Durand, 2009], tout le problème repose dans l'implémentation du « Simplexe ». En utilisant le logiciel de calcul MATLAB, cet algorithme peut être utilisé à partir de la fonction *linprog*<sup>2</sup>. L'extrait de code MATLAB suivant permet d'obtenir le résultat de la compensation en norme L1 et ce, depuis les matrices  $A$  et  $B$  servant aux résolutions par moindres carrés.

```
% On cherche la matrice X telle B = A*X
```

<sup>2</sup><http://www.mathworks.com/help/toolbox/optim/ug/linprog.html>

## 4.2 Tests expérimentaux du MRN

```
% Le problème va être adapté pour pouvoir être ajusté en norme L1 sur
% MatLab en faisant appel à la méthode du simplexe.
[no,ni]=size(A); % Nombres d'observations et d'inconnues
% Calcul des matrices nécessaires à la résolution sur MatLab.
Beq=[B;-B];
Aeq=[[-eye(no),A,-A];[-eye(no),-A,A]];
Leb=zeros(no+2*ni,1); % Matrice ne contenant que des 0
F=[zeros(ni,1);ones(no,1);ones(no,1)]; % F contient des 1 et des 0
% On charge le "Simplexe"
options = optimset('LargeScale', 'off', 'Simplex', 'on');
% Calcul de l'optimisation
Yout=linprog(F,Aeq,Beq,[],[],Leb,[],[],options);
X=zeros(ni,1); % La matrice X des paramètres ajustés se déduit de Yout
for j=1 :ni
    X(j,1)=Yout(no+j,1)-Yout(no+ni+j,1);
end
```

Qualitativement, la compensation en norme L2, c'est-à-dire par moindres carrés, minimise les erreurs tandis qu'en norme L1, il s'agit plutôt de maximiser le nombre d'observations sans erreurs. Cela peut se comprendre comme la différence entre la moyenne et la médiane. S'il n'y a pas de faute présente, les résultats des deux compensations doivent être sensiblement identiques [Durand, 2009]. S'il y en a une, en norme L1, elle apparaît directement dans le résidu de l'observation impliquée tandis que par moindres carrés, elle est répartie sur plusieurs observations. Le graphique en figure 4.17 représente la compensation des mêmes données que celle en figure 4.16, effectuée cette fois-ci en norme L1.

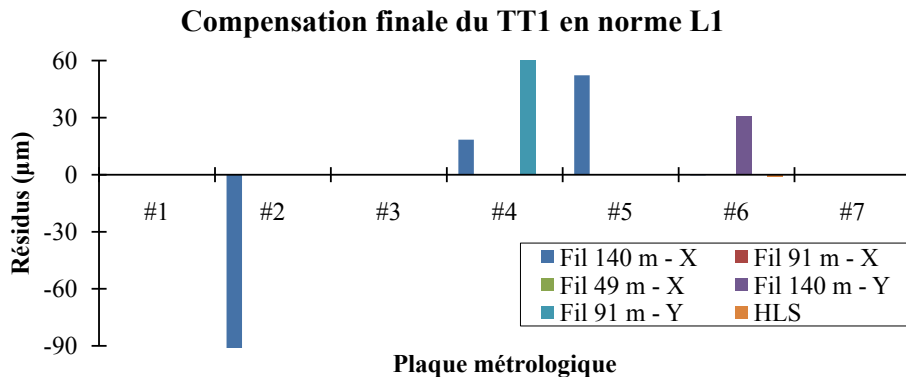


FIG. 4.17 – Recherche de fautes par compensation en norme L1

Cinq fautes supérieures à  $10\ \mu\text{m}$ , dont une atteignant  $92\ \mu\text{m}$ , sont mises en évidence. Cela fait, l'installation du TT1 a été inspectée pour tenter de comprendre d'où ces fautes pouvaient provenir. Toutes correspondaient à des billes des systèmes de centrage forcée qui s'étaient décollées. De ce fait, les transformations des repères de centrage vers ceux des plaques métrologiques avaient changé. Il a fallu démonter chaque plaque, coller les billes à la résine

## 4 Expériences et simulations

---

époxy, mesurer à nouveau les plaques en métrologie avant de les installer une fois de plus dans le tunnel.

En juin 2010, ces modifications ayant été faites, l'ajustement en norme L1 a été effectué de nouveau. Il restait encore des fautes, allant jusqu'à 31  $\mu\text{m}$ , et qui devaient vraisemblablement être imputées à l'absence de calibration absolue du roulis des capteurs WPS sur leurs systèmes de centrage forcé. Les résultats expérimentaux du test d'alignement du TT1 venaient d'atteindre leurs limites actuelles.

### 4.2.4 Le TT83 et le fil de 500 m

#### 4.2.4.1 Objectifs du test

L'expérience du TT1 a été conçue pour étudier les phénomènes intervenant dans le recouvrement des fils et pour tenter d'en déduire les incertitudes de mesure. Pour la conception du réseau métrologique de référence, il était également important de savoir jusqu'à quelle longueur il était possible de tendre un fil et de s'en servir pour des alignements micrométriques. Les plus longs fils servant effectivement à l'alignement des accélérateurs de particules au CERN mesurent 120 m. En 2006, le plus long fil jamais tendu au CERN était celui de 140 m au TT1.

Sous l'impulsion de l'ancien responsable des géomètres, M. Jean-Pierre Quesnel, est né le projet de tendre un fil de 500 m dans les tunnels TT83 et TT84, amenant les faisceaux de particules du SPS vers la zone d'expérience Nord, située sur le site français du CERN à Prévessin. Les études ont commencé à la fin de l'année 2006 [Touzé, 2006].

Ces deux tunnels, l'un à la suite de l'autre, forment une ligne droite dans le plan de près de 1 km. La partie à pente constante dépasse les 600 m. Contrairement au TT1, les TT83 et TT84 servent au transport des particules. Du fait des radiations, l'expérience ne pouvait être installée ni même fonctionner en dehors des périodes d'arrêts techniques annuels qui ont lieu l'hiver, en général de décembre à avril. Pour ne pas gêner les opérations de maintenance des aimants et autres composants, l'espace disponible pour installer l'expérience était situé au plafond des tunnels, entre les chemins de câbles (voir la photographie en figure 4.18).

L'expérience du fil de 500 m mettait en œuvre six capteurs WPS, aux positions longitudinales 0 m, 120 m, 240 m, 260 m, 385 m et 500 m (voir le schéma en figure 4.19). Chaque support de capteur était équipé d'une sonde de température. Ces supports devaient également pouvoir compenser la flèche du fil qui atteignait 50 cm, et être en mesure de corriger des erreurs d'implantation au plafond de l'ordre du centimètre [Touzé, 2006]. Un nouveau système de mise en tension, basé sur le principe de démultiplication du palan, a été conçu du fait de l'élongation du fil trop importante pour les méthodes traditionnellement employées au CERN.





FIG. 4.18 – Perspective du TT83 et du fil de 500 m

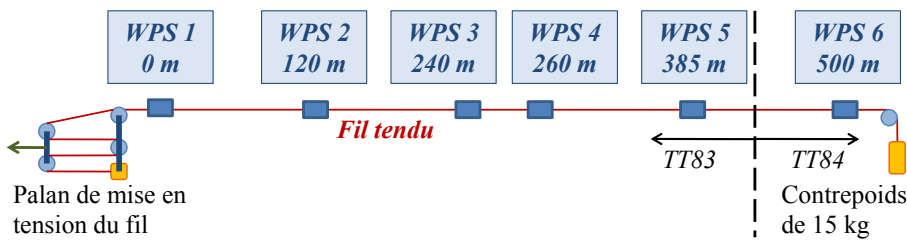


FIG. 4.19 – Schéma de l'expérience du fil de 500 m

Les protections du fil, qui peuvent être vues sur la figure 4.18, étaient des gaines flexibles en aluminium de 20 cm de diamètre et longues de 10 m une fois déployées. Elles ont été imposées à la conception de l'expérience, au détriment de protections rigides, pour des raisons de coût [Touzé, 2006]. Tous les 10 m, une tige filetée était fixée au plafond à l'aide d'un crochet métallique. Entre deux tiges, un câble, passant au travers d'une gaine, était tendu. Une fois la gaine déployée, le câble devait être suffisamment tendu pour que la flèche permette le passage du fil sans aucun contact. Ce travail s'est avéré fastidieux et les gaines beaucoup moins efficaces que prévu.

L'installation a commencé lors de l'arrêt technique entre décembre 2006 et avril 2007. Elle s'est achevée à l'arrêt technique suivant, lorsque le fil a été tendu avec succès en décembre 2007. L'expérience a été définitivement arrêtée en avril 2008, après plusieurs mois d'acquisition.



## 4 Expériences et simulations

---

### 4.2.4.2 Développements effectués

Les fils utilisés pour les mesures avec les capteurs WPS de FOGALE NANOTECH sont constitués d'une âme de carbone autour de laquelle se trouve une tresse de polymère en *peek*<sup>3</sup>. Le fil, fourni par FOGALE NANOTECH, a un diamètre de 0.4 mm et un module de Young de 294 GPa.

$$\sigma = \frac{F}{S} = E\varepsilon \quad (4.9)$$

Selon la loi de Hooke sur le comportement élastique linéaire des solides soumis à une contrainte  $\sigma$ , celle-ci est égale au module de young  $E$  multiplié par l'allongement relatif  $\varepsilon$  [Goldstein *et al.*, 2002] (voir la relation 4.9). La contrainte  $\sigma$  est égale à la force appliquée divisée par la surface d'application. Dans le cas des fils tendus utilisés pour les alignements, la tension appliquée est de 150 N. De ce fait, l'allongement relatif peut être estimé à  $\varepsilon = 0.4\%$ . Une telle valeur correspond à un allongement de 56 cm pour un fil de 140 m et de 2 m pour un fil de 500 m.

Pour mettre le fil en tension, la méthode utilisée consiste à poser le contre-poids sur un ascenseur dont la course est de l'ordre de 40 cm. Au fur et à mesure que le contre-poids est descendu avec l'ascenseur, le fil se tend. Quand la tension appliquée au fil atteint, aux frottements près, le poids engendré par la masse accrochée, celle-ci se soulève de l'ascenseur. Le fil est alors tendu. Si cette méthode est suffisante pour des fils d'une longueur de l'ordre de 100 m, elle n'était pas applicable à l'expérience du TT83. D'une part aucun ascenseur d'une course de 2 m n'était disponible. D'autre part, la hauteur sous plafond n'était pas assez grande pour une telle méthode. Un nouveau système de tension des fils devait être développé.

Dans un palan, la force nécessaire pour soulever une charge est divisée par le nombre de poulies employées. La tension appliquée au câble est constante. En revanche, pour soulever la charge d'une hauteur  $h$ , il faut tirer le câble sur une longueur égale à  $h$  multipliée par le nombre de poulies.

Le tenseur qui a été développé est l'inverse d'un palan. Un chariot se déplace pour tendre le fil. Grâce à la démultiplication, l'élongation du fil est égale au déplacement du chariot multiplié par le nombre de poulies. Le système développé, en figure 4.20, est démultiplié quatre fois. Le déplacement du chariot est assuré par une vis sans fin. Ce système, ayant une course de 1 m, est capable de mettre en tension un fil de 1 km.

Non seulement l'utilisation de ce nouveau système a été un franc succès, mais en plus il a permis de mener les premiers tests mettant en évidence le fait que la tension usuellement appliquée aux fils au CERN était en dessous de la limite élastique du carbone-*peek*. En effet, à l'aide d'un régleur, il était aisé de mesurer les déplacements faits par le chariot avec une précision de l'ordre

---

<sup>3</sup>Polyétheréthercétone

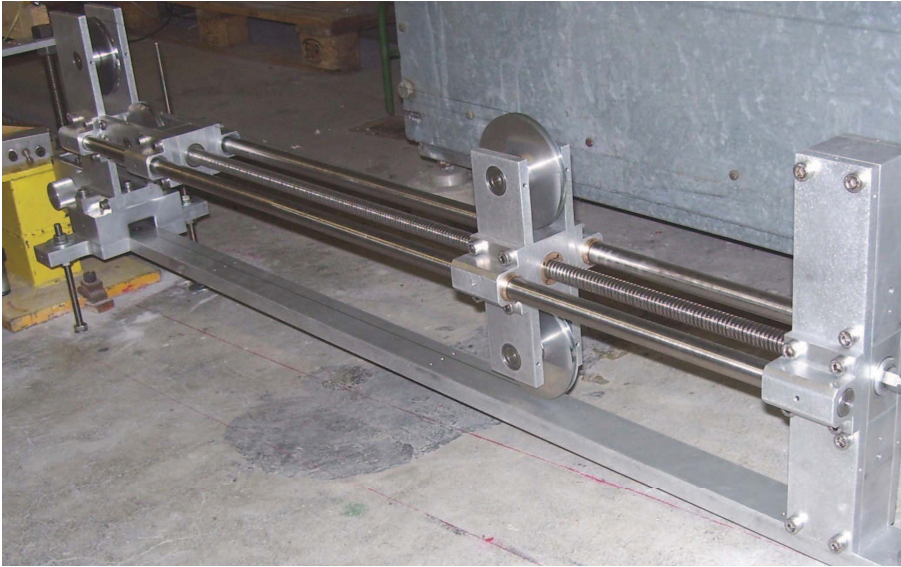


FIG. 4.20 – Le tenseur à poulies en test au TT1

du millimètre. En multipliant par quatre la valeur mesurée, l'élongation du fil à un instant donné  $t$  était ainsi connue. À l'autre extrémité du fil, le contrepois était posé sur un pèse-personne. Aux frottements près, la lecture de la balance à l'instant  $t$ ,  $m(t)$ , correspond à la résultante du poids de la masse accrochée et de la tension du fil  $T(t)$  (voir la relation 4.10).

$$T(t) = g \cdot (15 - m(t)) \quad (4.10)$$

De cette manière, il a été possible d'obtenir une courbe de la tension appliquée au fil lors de sa mise en place, en fonction de son élongation, et ce, jusqu'à ce que la tension atteigne le poids de la masse accrochée. Cette opération a été réalisée au TT1, en vue de valider le tenseur à poulie, puis au TT83, lors de la tension du fil de 500 m. La figure 4.21 représente les résultats de ces deux tests et les compare avec le comportement théorique du fil.

Les tensions déduites des lectures de la balance ne sont certes pas très précises, mais, dans les deux cas, elles évoluent linéairement aux élongations mesurées. Les écarts-types *a posteriori* des lectures de la balance, après les régressions linéaires, sont de 0.29 kg pour le test au TT1 comme celui au TT83. D'après la loi de Hooke, les coefficients directeurs ajustés doivent être égaux au module de Young multiplié par la section du fil. Les valeurs obtenues sont fournies dans la relation 4.11. Elles sont inférieures à la valeur théorique. Les élongations constatées sont légèrement plus importantes que prévu.

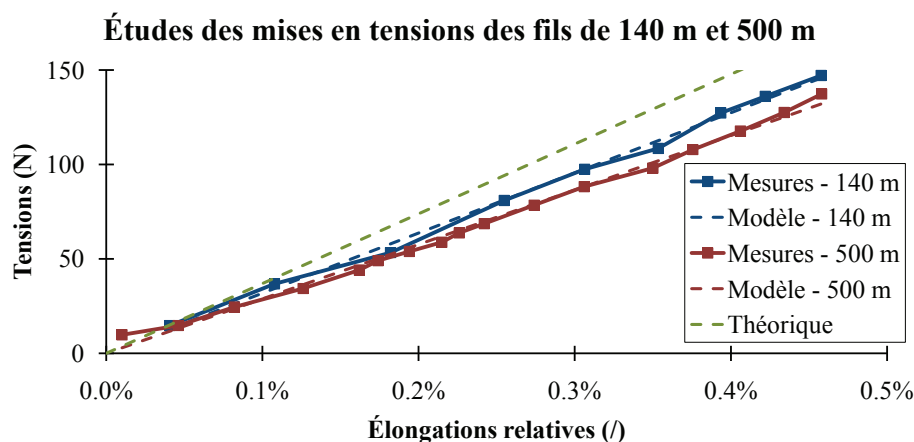


FIG. 4.21 – Comportement élastique du carbone-peek

$$\begin{cases} [ES]_{th} & = 36945 \text{ Pa} \\ [ES]_{TT1} & = 31858 \text{ Pa} \pm 689 \text{ Pa} (1\sigma) \\ [ES]_{TT83} & = 28841 \text{ Pa} \pm 528 \text{ Pa} (1\sigma) \end{cases} \quad (4.11)$$

Pour pouvoir expliquer ces différences, un calcul aux dérivées partielles a été effectué. Une erreur de l'ordre de 50 GPa sur le module de Young ou de 40  $\mu\text{m}$  sur le diamètre du fil permettrait d'expliquer les écarts constatés entre la théorie et les mesures. Bien entendu, il n'est pas exclu que le pese-personne employé pour les tests souffre d'une erreur systématique tel un facteur d'échelle. Cependant, ce qu'il est important de retenir ne se situe pas là. Les résultats démontrent que la tension de 150 N, appliquée aux fils de carbone-peek pour les mesures WPS, se trouve en dessous de leur limite élastique. Sans cela les observations n'auraient pas suivi la loi de Hooke. Cet aspect n'avait jamais été vérifié par le passé. Or si un matériau soumis à une contrainte quitte son domaine élastique, des dommages sont occasionnés dans sa structure interne, à tel point qu'il peut se briser [Goldstein *et al.*, 2002].

#### 4.2.4.3 Résultats et bilan

Intuitivement, une corde est d'autant plus facilement perturbée qu'elle est longue, au sens où l'amplitude de ses oscillations est plus grande. De nombreux phénomènes sont susceptibles d'engendrer des mouvements sur les fils tendus. Le plus important est clairement identifié. Ce sont les courants d'air. Pour s'en affranchir au mieux, la solution la plus simple consiste à confiner le fil tendu dans une enceinte rigide. Dans l'expérience du fil de 500 m, ça n'était pas le cas. Les gaines flexibles, dont l'utilisation avait été imposée, ne formaient pas une enceinte rigide. Cet état de fait aurait pu être sans conséquences si l'expérience n'avait pas été installée directement dans l'axe

de la puissante ventilation des tunnels TT83 et TT84 (voir la photographie en figure 4.18). Vraisemblablement la ventilation a occasionné des déplacements du système de gaines flexibles qui, en plus de leur souplesse, n'étaient pas contraintes transversalement. Dès lors des mouvements de masses d'air à l'intérieur de ces dernières sont tout à fait plausibles, rendant le fil instable. De fait, les lectures enregistrées des capteurs avaient des écarts-types beaucoup plus élevés que prévu.

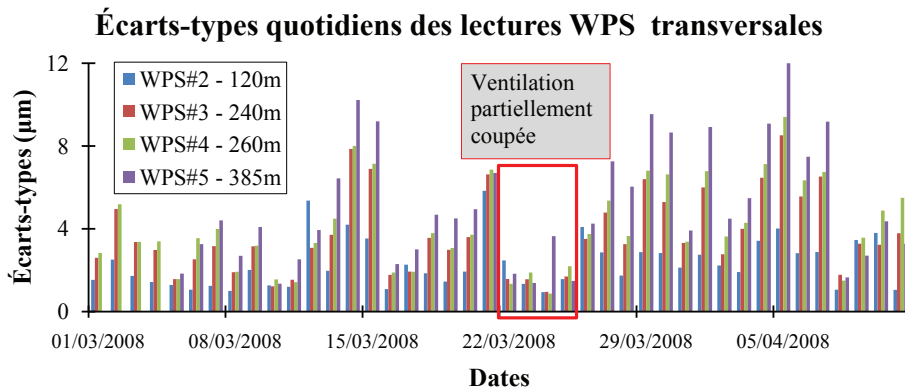


FIG. 4.22 – Écarts-types quotidiens en transversal

Les figures 4.22 et 4.23 représentent les écarts-types quotidiens des lectures des capteurs WPS du 1<sup>er</sup> mars au 12 avril 2008, respectivement en transversal et en vertical. Les moyennes de ces écarts-types sont, respectivement en transversal et en vertical, de 4 µm et de 11 µm. Pendant la période de Pâques, du 22 au 25 mars 2008, il a été possible de négocier avec la commission de sécurité de la zone une coupure partielle de la ventilation. Les écarts-types pendant ces quatre jours étaient tous inférieurs à 5 µm. Leurs moyennes atteignaient, respectivement en transversal et en vertical, 2 µm et 4 µm.

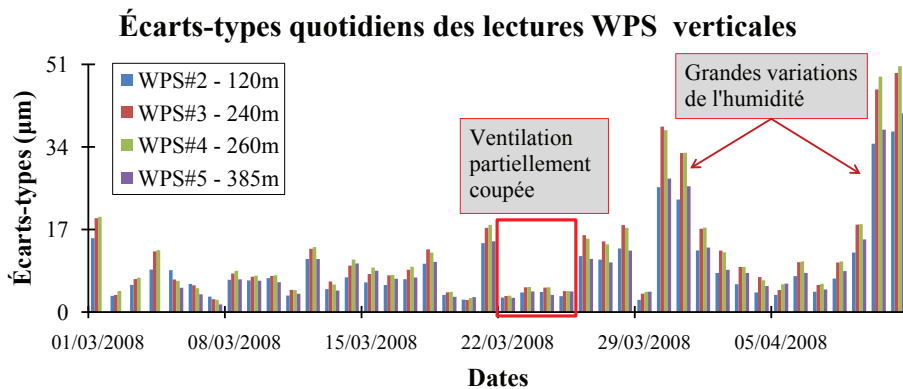


FIG. 4.23 – Écarts-types quotidiens en vertical

## 4 Expériences et simulations

---

Du fait des incertitudes de mesures importantes, qui sont vraisemblablement à imputer aux protections flexibles des fils, l'expérience du fil de 500 m n'a pas rempli ses objectifs visant à démontrer la possibilité de mesures micrométriques sur une aussi grande distance. Fort heureusement, le bilan de ce test n'est pas négatif. Le premier défi consistait uniquement à tendre le fil et ce, en développant de nouveaux outils tel le système de tension à poulies, basé sur le principe du palan inversé. Le fait de voir le contre poids suspendu dans l'air a été un moment de grande fierté pour les géomètres du CERN. La photographie en figure 4.24 a immortalisé cet instant avec, de haut en bas et de gauche à droite, Thomas Goumon, Albert Bitoune, Julien Boerez, Friedrich Lackner, Andreas Herty, Thomas Touzé et Hélène Mainaud-Durand.



FIG. 4.24 – Immortalisation de la tension du fil de 500 m

D'ailleurs, avec le recul, je considère que la plus grande réussite de cette expérience repose dans le système de tension. En effet, il permet potentiellement de s'affranchir de toute contrainte d'intégration des systèmes de tension des fils. D'une part la démultiplication permet de limiter les effets de l'élongation des grands fils dans un volume choisi et non plus subi. D'autre part, en ajoutant des jeux de poulies servant, non plus à la démultiplication, mais à l'orientation du déplacement de la partie mobile du palan, le système de tension peut s'adapter à toutes les contraintes d'intégration, pour peu qu'il

existe une direction où un minimum de place est disponible. L'utilisation de cet outil s'est avérée très confortable. L'utilisateur contrôle à chaque instant la mise en tension. En plus, son association avec une balance a permis de démontrer le respect de la zone élastique du carbone-peek, ce qui a représenté un pas de plus vers la maîtrise de la physique des fils tendus.

### 4.2.5 Conclusion

Les validations expérimentales, et notamment les développements mis en œuvre pour leur déploiement, sont révélatrices du degré de compréhension du problème devant être démontré. À l'origine du TT1, les systèmes de centrages des capteurs étaient des plus sommaires. Le réseau hydrostatique, composé de tuyaux flexibles en silicone, n'était presque jamais opérationnel. Près de cinq ans après, cette expérience a bien changé. La plus insignifiante faille dans le développement des supports, des protections, limite le résultat. Au TT1, peuvent être cités les collages initiaux des billes à la cyanolite qui n'ont pas résisté puis engendré des fautes détectées par l'ajustement en norme L1. Au TT83, le choix des gaines comme protection du fil ont empêché l'expérience d'atteindre tous ses objectifs.

Néanmoins, ce sont ces erreurs qui ont permis de faire pleinement comprendre quels étaient les enjeux et les points sensibles. Le collage défaillant montre à quel point le centrage forcé est délicat et potentiellement source d'erreur s'il n'est pas optimisé. Le TT1 a été immobilisé pendant plusieurs mois à cause de quelques simples billes décollées. Le problème d'instabilité du fil au TT83 du fait des courants d'air a mis en évidence l'importance du fil en tant que tel. Auparavant, il n'était qu'un objet invisible dans les équations qui permettait seulement de comparer les lectures des capteurs. Désormais dans le traitement développé, son importance est aussi grande que la métrologie des supports et la calibration des capteurs. C'est le fil de 500 m qui a révélé le fil et ouvert la voie de la maîtrise de sa physique qui paraît si triviale et qui pourtant est si subtile.

A ce jour, les expériences du TT1 et du TT83 n'ont pas entièrement rempli leur cahier des charges initial. Mais grâce aux nombreux problèmes rencontrés, compris puis résolus, le chemin à parcourir s'est considérablement amenuisé. Le fil de 500 m, en pointant du doigt la physique du fil, a apporté la réflexion sur l'équilibre des forces, et de ce fait, à la compensation des gradients d'humidité et aux mesures de la fréquence d'oscillation. Aujourd'hui le TT1 atteint une dispersion des mesures de 3  $\mu\text{m}$  sur un mois d'acquisition. La justesse frôle les spécifications de 10  $\mu\text{m}$ . Pour franchir ce dernier pas, les expériences ne sont pas prêtes. Mais comme les paramètres limitatifs sont clairement identifiés, ils peuvent être modélisés et de ce fait simulés.



### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

#### 4.3.1 Introduction

Le fait de mener des simulations du pré-alignement du CLIC correspond à deux enjeux majeurs. Le premier concerne le strict cadre des recherches sur l’alignement, lorsqu’il faut estimer les incertitudes de mesures sur l’ensemble des 48 km du CLIC alors qu’aucun test de cette taille n’est raisonnablement envisageable [Eco, 1997]. Le second se ramène à une perspective plus large, celle des physiciens de la dynamique des faisceaux de particules qui ont besoin de modèles des différentes sources d’accroissements de l’émittance. Plus les modèles sont fins, plus le comportement du faisceau peut être prédit avec fiabilité.

Les calculs qui vont être présentés dans les deux parties qui vont suivre correspondent respectivement à ces deux enjeux. Les premières simulations ont été effectuées à la demande des physiciens en 2008 alors que la réflexion sur le pré-alignement n’était pas mûre. Le modèle présenté a dû être adapté au mieux aux outils à disposition, et ce avec le degré de compréhension du problème de l’époque.

La seconde partie concerne les simulations des dernières étapes de l’alignement de l’expérience du TT1, faites pour pallier les lacunes actuelles de l’installation. Ne pouvant aller plus loin dans l’obtention d’un résultat expérimental, les simulations permettent de mettre pleinement en évidence le potentiel d’un test comme celui du TT1, une fois que ses déficiences seront résolues.

#### 4.3.2 Modèle proposé sur LGC

##### 4.3.2.1 Adaptation du problème à LGC

Le logiciel LGC a été développé pour traiter les observations issues des opérations d’alignement des accélérateurs et expériences du CERN. Les modélisations des mesures faites par rapport à un fil tendu ou à une surface d’eau, issues de ce travail de recherche, n’existent pas dans ce logiciel. Plus subtilement, dans le diagramme décomposant les différentes étapes du MRN en figure 3.40, une seule d’entre elles peut, en toute rigueur, être effectuée avec LGC, en l’occurrence l’ajustement des mesures topométriques.

En 2008, lorsque les physiciens de la dynamique du faisceau du CLIC ont demandé un premier modèle d’erreur du pré-alignement actif, la solution proposée, telle qu’elle a été exposée au chapitre 3, était loin d’être mûre. Les algorithmes permettant d’en effectuer les calculs n’existaient pas. C’est pourquoi il a été décidé d’aller à l’encontre de la réalité physique des systèmes de mesures employés, et ce, en adaptant au mieux les observations aux modèles disponibles dans LGC.

---

### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

---

Ainsi, parmi les méthodes novatrices se trouvent les différences de coordonnées, obtenues en laboratoire de métrologie par une CMM. Il s'agit d'un type d'observation extrêmement simple. Un point est défini par rapport à un autre en additionnant les mesures CMM aux coordonnées du dernier. L'adaptation sur LGC a consisté à transformer ces différences de coordonnées cartésiennes en mesures polaires, c'est-à-dire en calculant un angle horizontal, un angle vertical et une distance de l'espace, de la même manière qu'une station totale.

Les mesures faites par les capteurs HLS par rapport à des surfaces d'eau ont été traitées comme un nivellement direct. Ce modèle a aussi été utilisé pour traiter les mesures verticales d'écartométrie par rapport à un fil tendu. En effet, dans les procédures usuelles d'alignement des accélérateurs au CERN se trouve l'écartométrie. Mais celle-ci ne se fait qu'en planimétrie. Avec LGC, il est donc possible de modéliser un écart horizontal par rapport à une ligne droite. Il est également possible de considérer une distance de l'espace à une ligne droite. En revanche la possibilité de traiter des écarts à la fois transversaux et verticaux n'existe pas.

Pour effectuer un calcul de compensation avec LGC, le logiciel a besoin d'un fichier d'entrée au format texte dans lequel les options, les points et les observations sont déclarés au travers de commandes de quatre lettres précédées du caractère « \* ». Ainsi la commande « \*OLOC » permet d'effectuer la compensation dans un repère local dans lequel la Terre est considérée comme étant plate. C'est le choix qui a été effectué pour ces simulations.

Celles-ci correspondaient aux mesures d'un seul linac du CLIC. Le calage s'effectuait aux deux extrémités du linac. D'un côté, les coordonnées étaient fixées, de l'autre c'était le gisement du point. Les simulations ont été faites sur une distance totale sensiblement identique à la longueur d'un linac du CLIC, de l'ordre de 22 km. La création des fichiers d'entrée pouvant s'avérer très fastidieuse, compte-tenu du nombre de points et d'observations, un outil permettant de les générer à été développé en VISUAL BASIC (voir la figure 4.25).

Ainsi dans le calcul de simulations en figure 4.25, la longueur des fils était de 403.2 m (le logiciel a été écrit pour adapter au mieux la longueur des fils afin de simuler un nombre entier de modules du CLIC). Le nombre de puits était fixé à 7 et l'incertitude des mesures des WPS à 5  $\mu\text{m}$ .

#### 4.3.2.2 Paramètres étudiés

A l'issue des simulations, les différentes incertitudes des points obtenus le long du linac, ainsi que les différents cylindres contenant les erreurs sur 200 m, étaient comparés. Les résultats ont fait l'objet d'une publication à la conférence du PAC à Vancouver en 2009 [Touzé *et al.*, 2009]. Trois paramètres ont été étudiés selon cette méthode :

- L'influence du nombre de puits, c'est-à-dire le nombre de points définis,



## 4 Expériences et simulations

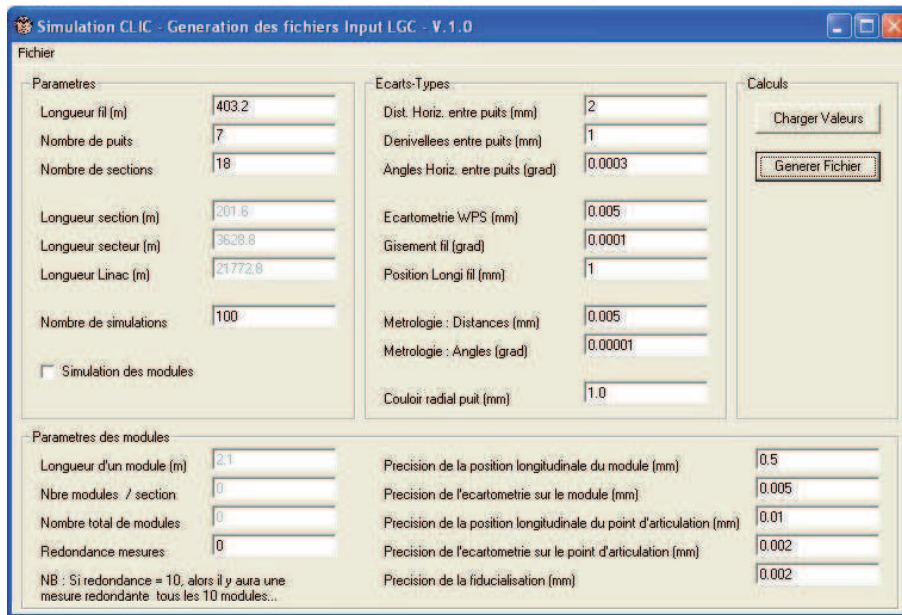


FIG. 4.25 – Logiciel générant les fichiers d’entrée pour LGC

non plus par les réseaux de fils tendus ni par les surfaces d’eau, mais par les mesures géodésiques à la surface,

- La longueur des fils, de 300 m à 500 m,
- L’incertitude de mesure des capteurs WPS, à savoir 5  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$ .

Le nombre de puits a comme seul effet de ramener la courbe totale des erreurs dans un couloir au niveau de chacun d’entre eux. Comme le montre la figure 4.26, sans puits intermédiaire, l’erreur maximale, au centre du linac, atteint 2.1 mm. En ajoutant ne serait-ce qu’un seul puits intermédiaire, l’erreur totale descend en dessous de 0.7 mm.

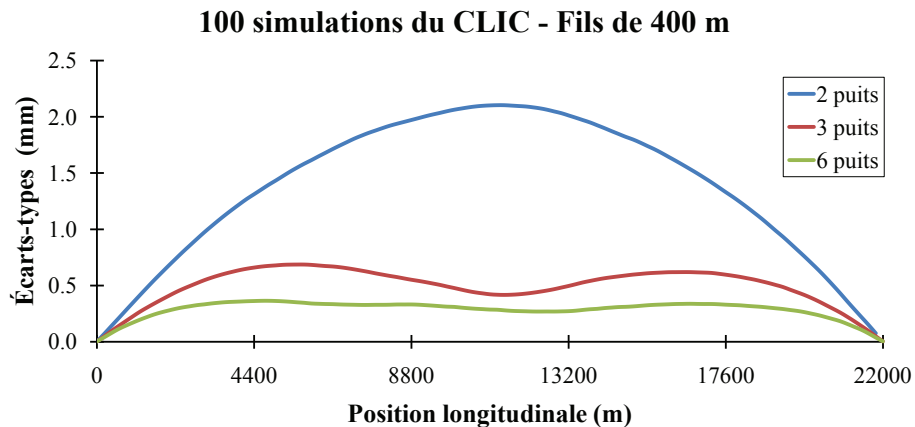


FIG. 4.26 – Effet du nombre de puits sur la déviation totale

### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

Par la suite, les erreurs ont été analysées sur une fenêtre coulissante de 200 m. À partir de la droite de régression sur une section quelconque de 200 m, les écarts à cette ligne ont été calculés. L'écart-type de ces erreurs le long des 22 km du linac en fonction du nombre de puits est représenté en figure 4.27. Pour une longueur de fil égale, les valeurs minimales, moyennes et maximales des écarts-types sont constantes. Si le nombre de puits influe sur la déviation totale le long du CLIC, il semble que ce paramètre n'ait pas d'effets significatifs sur les erreurs considérées sur 200 m.

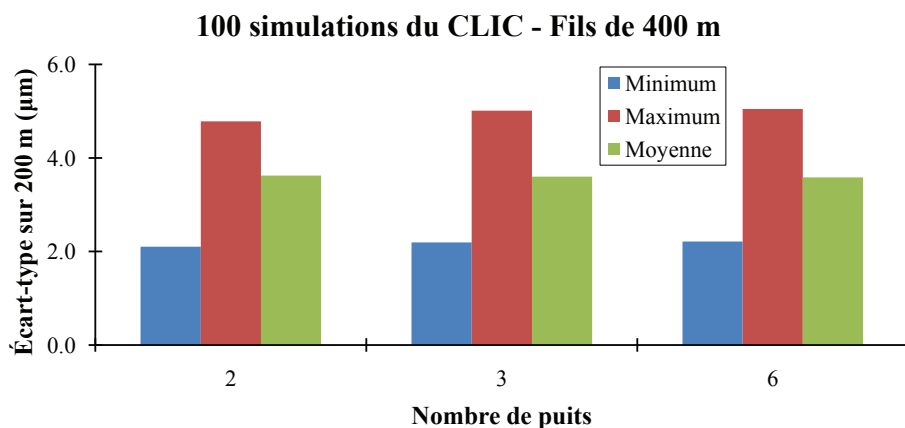


FIG. 4.27 – Écarts-types des erreurs sur 200 m

En revanche la longueur des fils a un effet opposé au cas précédent. En considérant six puits d'accès à un linac du CLIC, quelque soit la longueur de fil simulée, de 300 m à 500 m, la courbe totale des erreurs est globalement invariante et en dessous de 0.4 mm sur 22 km (voir la figure 4.28).

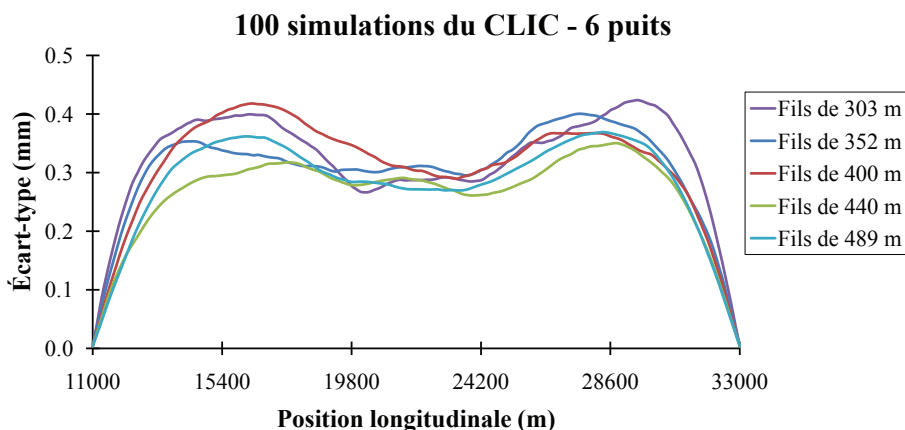


FIG. 4.28 – Effets de la longueur du fil sur la déviation totale

## 4 Expériences et simulations

La figure 4.29 représente les valeurs minimales, moyennes et maximales des écarts-types des erreurs sur 200 m en fonction de la longueur des fils simulés. Ceux-ci décroissent quand la longueur du fil augmente. En effet, plus les fils sont longs, plus le nombre de recouvrements se réduit. Dans la publication présentant ces résultats, il est écrit que l'écart-type à atteindre sur 200 m est de  $3.3 \mu\text{m}$ , puisque la tolérance à  $3\sigma$  est de  $10 \mu\text{m}$ . La longueur de fil nécessaire pour que l'écart-type moyen sur 200 m atteigne ce seuil est de 426 m.

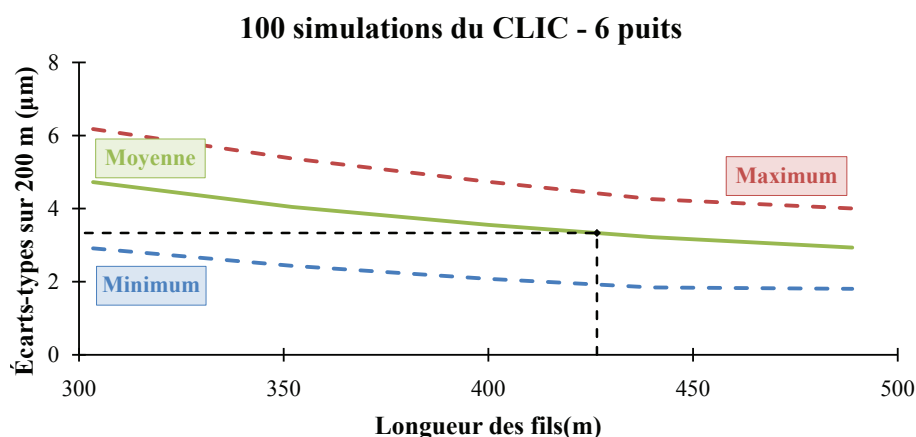


FIG. 4.29 – Écarts-types des erreurs sur 200 m

Le dernier paramètre ayant été étudié lors de ces simulations faites avec LGC était la justesse des mesures WPS. En effet ces calculs ont été effectués au moment du développement des systèmes de centrage forcé des capteurs. Cet enjeu majeur venait à peine d'être mis en évidence. Les résultats associés devaient accentuer le fait que le développement de nouveaux systèmes était absolument nécessaire. L'ordre de grandeur de l'erreur d'alignement sur 200 m représenté dans la figure 4.29 est le même que celui de la justesse des WPS, à savoir  $5 \mu\text{m}$ . Il en est de même pour la justesse à  $20 \mu\text{m}$  qui induisait une erreur sur 200 m de  $18 \mu\text{m}$ .

### 4.3.3 Simulations du MRN au TT1

#### 4.3.3.1 Lectures simulées des capteurs

Plusieurs raisons ont empêché l'expérience du TT1 d'aboutir à une incertitude de mesure micrométrique. Celles-ci surviennent à chacune des étapes de la chaîne métrologique. En effet, la première d'entre elles, relative à la calibration absolue des capteurs, souffre, d'une part du roulis des capteurs WPS et d'autre part de l'absence de banc de mesure de l'orientation des inclinomètres.

La seconde étape concerne la définition métrologique des supports des

---

### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

---

capteurs et des plaques invar. La CMM LEITZ INFINITY du CERN vient à peine d'être réceptionnée. De ce fait les plaques métrologiques du TT1 n'ont pas encore été mesurées avec l'incertitude de mesure de cet outil. De plus, comme il a été démontré au paragraphe 3.3.4.3, les interfaces actuelles des inclinomètres ne sont pas adaptées aux mesures inclinométriques absolues à cause de la distance trop faible entre les billes. Il est aujourd'hui impossible d'obtenir une orientation depuis un inclinomètre — quand bien même celui-ci serait parfaitement calibré — à mieux que 50  $\mu$ rad.

Le dernier aspect qui fait défaut au TT1 est lié à l'étape de la compensation finale. En effet, non seulement les inclinomètres biaxiaux nécessaires, ainsi que leurs supports, manquent à l'appel, mais il serait impossible de les utiliser s'ils étaient présents, puisqu'il n'existe aucun modèle de la déviation de la verticale au TT1. Sans ce modèle, il est impossible de déduire le roulis des plaques métrologiques dans le repère euclidien général.

Cela étant, ce constat n'est pas pour autant amer. Le fait de circonscrire aussi précisément les défauts actuels de l'installation représente un progrès considérable puisqu'il permet de définir les directions dans lesquels des efforts doivent encore être faits pour apporter la solution. L'autre intérêt repose dans le fait qu'en identifiant précisément les paramètres qui manquent à l'expérience, il est possible de les quantifier et de les simuler selon la méthode de Monte-Carlo. Dans le chapitre 3, de nombreuses simulations ont été présentées, mais celles-ci étaient toutes basées sur de vraies observations. Elles n'avaient pour but que l'obtention d'une incertitude de mesure selon un procédé moins fastidieux qu'un calcul de propagation des erreurs.

Il est désormais temps de calculer ce qu'une expérience comme le TT1 serait potentiellement capable de fournir comme résultats. Mais pour pouvoir effectuer des simulations de la compensation finale au TT1, il est avant tout nécessaire de générer des lectures plausibles des capteurs HLS, WPS et des inclinomètres. Le formalisme des similitudes 3D rend cette étape extrêmement simple.

La formule générale permettant d'exprimer les coordonnées dans le repère général d'un point observé par un capteur HLS ou WPS, sous la forme d'un vecteur  $X$ , et ce, depuis le vecteur de ses lectures  $L$ , est décrite dans la relation 4.12. Cette relation est composée par trois similitudes 3D sans facteur d'échelle<sup>4</sup>, celle de la calibration du capteur, celle des mesures de la plaque et celle pour aller de cette dernière jusqu'au repère général.

$$X = T + 0.001 \cdot R \times (t + r \times (\tau + \rho \times L)) \quad (4.12)$$

Comme aucune des trois matrices de rotation  $R$ ,  $r$  et  $\rho$  n'est linéarisée, elles ont toutes conservé leur orthogonalité. Il est alors simple de déduire la transformation inverse en relation 4.13.

---

<sup>4</sup>Si ce n'est celui du passage des mesures métrologiques, en millimètres, au repère général, en mètres.

## 4 Expériences et simulations

---

$$L = \rho^t \times (r^t \times (1000 \cdot R^t \times (X - T) - t) - \tau) \quad (4.13)$$

Ainsi, pour générer les lectures théoriques des capteurs, une surface d'eau et trois fils tendus plausibles ont été modélisés à partir des coordonnées dans le repère du TT1 issues des mesures topométriques. Les flèches imposées aux fils sont celles calculées depuis les mesures de fréquence dans la figure 3.30 au paragraphe 3.4.2.3. Ensuite, les matrices  $T$  et  $R$  considérées sont les valeurs approchées obtenues à partir des mesures topométriques (lire le paragraphe 3.4.4.2).

Quant aux lectures théoriques des inclinomètres, il s'agit, dans l'équation 3.56 du paragraphe 3.4.4.2, non plus de déduire les angles décrivant l'orientation de la plaque depuis la direction de la verticale et les angles du capteur, mais d'appliquer la démarche inverse. La direction de la verticale est simulée à partir d'un modèle sphérique de la Terre.

### 4.3.3.2 Compensation finale

La compensation finale du TT1 correspond à la neuvième étape du diagramme en figure 3.40 et explicitée dans le paragraphe 3.4.4.3. Il s'agit d'effectuer le calcul d'ajustement par moindres carrés des relations qui lient les mesures métrologiques aux modélisations des références d'alignement afin d'obtenir les positions et orientations des plaques métrologiques dans le repère général du TT1. Cette étape a été simulée selon la méthode de Monte-Carlo à partir des lectures théoriques des capteurs dont l'obtention vient d'être décrite. Une erreur gaussienne a été attribuée à chacune d'entre elles de la manière suivante :

**Lectures des WPS :** L'écart-type des lectures considéré est de 1  $\mu\text{m}$ . Il provient des résultats obtenus lors du calcul de la répétabilité des capteurs.

**Lectures des HLS :** L'écart-type des lectures considéré est de 1  $\mu\text{m}$ . Cette valeur est issue des travaux menés par le passé par les géomètres du CERN [Herty, 2009].

**Mesures inclinométriques :** L'écart-type considéré est de 2  $\mu\text{rad}$ . C'est une valeur qui, chez plusieurs fabricants<sup>5</sup>, peut tout à fait être atteinte.

**Inclinaison due aux marées :** Actuellement, la qualité des prédictions de l'inclinaison de la surface d'eau du fait des marées atteint 10 nrad, ce qui correspond à une incertitude de 1.4  $\mu\text{m}$  sur 140 m. Il s'agit de l'écart-type considéré dans les simulations.

**Déviations de la verticale :** L'incertitude de mesure considérée pour ces observations est de 0.2 arcsec soit 1  $\mu\text{rad}$  ce qui, selon les résultats des expériences menées au CERN, semble possible [Jones *et al.*, 2010].

---

<sup>5</sup>ALTHEN, WYLER, LIPPMANN, GEOMECHANICS, etc.

---

### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

---

D'autres paramètres interviennent dans l'obtention du résultat. Pour pouvoir calculer la solution ajustée, il est nécessaire de fixer la valeur de quelques uns d'entre eux. Ainsi, les translations transversales des deux plaques métrologiques aux extrémités du TT1 ont été considérées comme étant justes. De la même façon, la translation verticale de la plaque du milieu a été fixée. Comme ces paramètres sont obtenus par l'ajustement des mesures topométriques, ils ont chacun une erreur quantifiée. Mais dans les simulations du pré-alignement, il s'agit d'erreurs systématiques qui sont constantes. Il en est de même pour le défaut de verticalité au centre de la surface d'eau, pour le rayon de courbure de la surface équipotentielle de pesanteur et même pour l'incertitude de la déviation de la verticale le long du tunnel.

Faire varier chacun de ces paramètres à chaque tirage des simulations n'apporterait pas un résultat significatif. Par exemple, la translation verticale, qui est considérée comme juste, a une précision de 0.1 mm. Cela signifie que l'erreur absolue de positionnement du réseau du TT1 est de 0.1 mm. En effet, pendant une quelconque période d'observation, cette erreur est constante ; elle ne varie pas selon la loi normale d'un écart-type de 0.1 mm. C'est pourquoi, dans l'état actuel des simulations, aucune erreur n'a été attribuée à ces quelques paramètres qui induisent une erreur systématique sur la position et l'orientation absolue de l'expérience du TT1.

Une dernière hypothèse concerne les incertitudes relatives aux mesures métrologiques. Du fait des dimensions des supports à billes des inclinomètres, il est impossible d'obtenir des orientations meilleures que 50  $\mu\text{rad}$ , malgré une précision des mesures CMM à 1  $\mu\text{m}$ . Pour pouvoir surmonter ce problème de conception des embases des inclinomètres sans avoir à construire un modèle mathématique idéal de plaque, la matrice de variance-covariance générant les erreurs sur les paramètres de centrage des capteurs a été considérée comme étant une matrice nulle.

La fiabilité et la robustesse de la compensation finale du TT1 ont été mises à l'épreuve. Tout d'abord, parmi les tirages des simulations, il a fallu en choisir un qui soit significatif. Le critère retenu consiste à ce que la précision *a posteriori* des observations du tirage en question soit proche de l'espérance mathématique de ce paramètre simulé. Cette dernière vaut 1.9  $\mu\text{m}$  tandis que pour le tirage retenu cette précision est de 1.8  $\mu\text{m}$ . En testant les résidus normés avec une loi de *Student* à 95%, aucune faute n'est détectée.

Les fiabilités locales des observations ont pu être calculées. Elles sont représentées, par plaque et par type d'observations, sur la figure 4.30. Pour les plaques 2, 4, 5 et 6, toutes les observations ont une fiabilité locale comprise entre 25% et 60% ce qui caractérise des mesures suffisamment redondantes et fiables [Durand, 2004]. En revanche, pour les plaques 1, 3 et 7, celles-ci peuvent descendre en dessous de 10%, ce qui n'est pas satisfaisant. Cet état de fait est encore plus visible avec le calcul des plus grandes fautes non détectables.

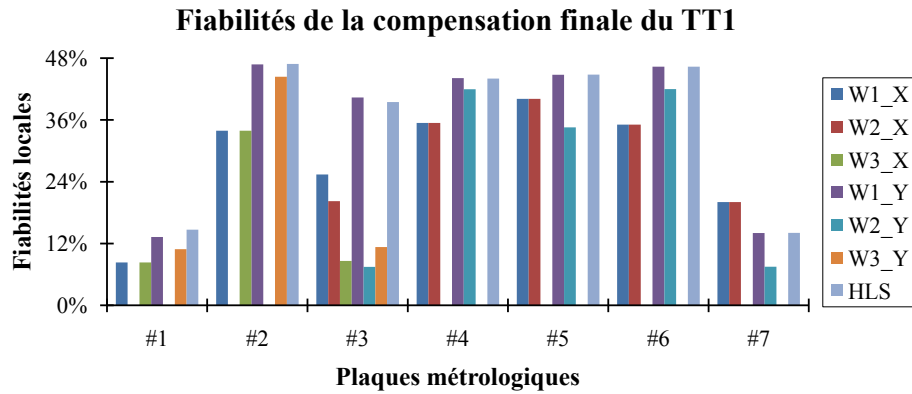


FIG. 4.30 – Fiabilités locales des observations

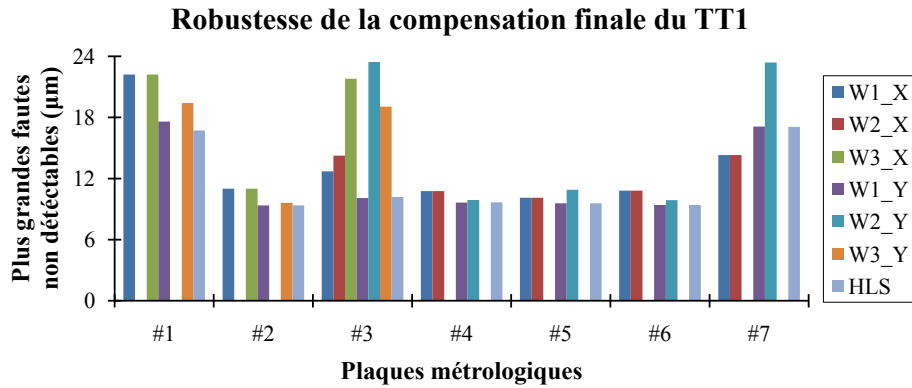


FIG. 4.31 – Plus grandes fautes non détectables à 10%

En considérant un risque de deuxième espèce de 10%<sup>6</sup>, les observations fiables ont des plus grandes fautes non détectables de 10 μm, tandis que les autres peuvent atteindre jusqu'à 24 μm (voir la figure 4.31). Les trois plaques impliquées correspondent à une extrémité d'un fil. De plus amples investigations doivent être faites pour résoudre cette faiblesse du réseau. Selon toute vraisemblance, la déficience des observations aux extrémités des fils peut être imputée aux équations modélisant ces derniers (voir la formule 3.44 au paragraphe 3.4.2.1) quand la position longitudinale  $z$  est égale à  $z_0$  ou à  $z_0 + l$ .

#### 4.3.3.3 Cylindre d'erreur sur 140 m

Une fois les résultats de la compensation finale obtenus, les paramètres des trois fils du TT1 sont connus. Si la position longitudinale d'un point d'un fil est connue, il est alors possible, en appliquant l'équation 3.44, de

<sup>6</sup>Cela correspond à la probabilité d'accepter une observation entachée d'une faute.



### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

connaître ses coordonnées transversales et verticales. Tous les 1 m le long du TT1, un point par fil a été considéré. De ce fait, 283 points ont été obtenus en totalité (141 pour le fil de 140 m, 92 pour le fil de 91 m et 50 pour le fil de 49 m).

Après les simulations du calcul des coordonnées de ces 283 points, pour lesquels une incertitude de 0.2 mm en longitudinal a été considérée, les espérances mathématiques et la matrice de variance-covariance des paramètres ont été calculées. Pour s'affranchir des différences entre les positions transversales, les altitudes et les flèches des trois fils, ces points ont été simulés à nouveau à partir de la matrice de variance-covariance obtenue et de coordonnées initiales égales en transversal et en vertical. De cette manière, ces 283 points appartiennent, à l'incertitude de l'alignement près, à la même ligne droite longue de 140 m.

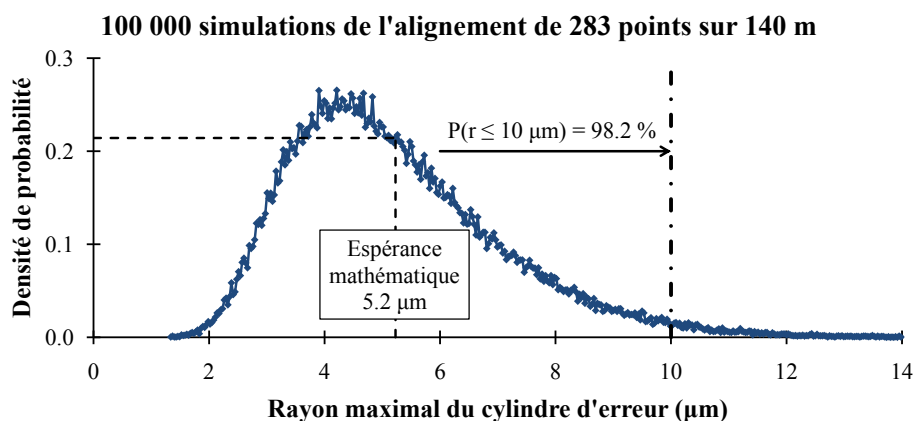


FIG. 4.32 – Distribution du rayon du cylindre des erreurs du TT1

Pour chaque tirage des simulations, 283 écarts transversaux et verticaux sont obtenus. En chacun de ces points, l'hypoténuse du triangle formé par l'écart transversal et celui en vertical correspond au rayon du cercle d'erreur. La figure 4.32 représente la distribution du rayon maximal sur les 283 points simulé 100 000 fois. Celle-ci ressemble à une distribution du  $\chi$  ce qui est plausible puisque la quantité obtenue est égale à la racine carré de la somme de deux variables, vraisemblablement gaussiennes, au carré. Comme ces deux variables gaussiennes ne sont pas normées ni même centrées, le rayon suivrait une loi du  $\chi$  généralisée qui, semble-t'il, n'est pas formalisée analytiquement.

À partir des simulations, l'espérance mathématique empirique a été calculée. Elle est égale à 5.2  $\mu\text{m}$ . La fonction de répartition empirique permet de constater que la probabilité que le rayon soit en dessous de 10  $\mu\text{m}$  est de 98.2%. Ce résultat montre que la probabilité d'un résultat conforme aux spécifications du pré-alignement actif du CLIC est de 98.2% sur une longueur de 140 m.

La définition officielle de la tolérance de pré-alignement stipule que les

## 4 Expériences et simulations

---

écarts transversaux et verticaux doivent, à  $3\sigma$  (c'est-à-dire une probabilité de 99.7% selon la loi normale), être inférieurs à  $10\ \mu\text{m}$ . Dans le résultat obtenu, la probabilité est moindre, certes, mais s'assurer que le rayon de l'erreur soit inférieur à  $10\ \mu\text{m}$  est une condition qui semble plus restrictive. En effet, d'une part les tolérances spécifient que les erreurs du pré-alignement soient dans un carré de  $20\ \mu\text{m}$  de côté, tandis que le calcul précédent considère la probabilité qu'elles soient dans un disque de  $10\ \mu\text{m}$  de rayon. Si les erreurs transversales et verticales tolérées sont considérées comme des variables aléatoires gaussiennes, centrées, indépendantes et d'écart-type maximal égal à  $3.3\ \mu\text{m}$ , calculons la probabilité qu'elles soient dans un disque de rayon égal à  $3\sigma$ .

Soient  $x$  et  $y$  deux variables aléatoires gaussiennes indépendantes, d'espérances mathématiques nulles et d'écart-types égaux à  $\sigma$ . La densité de probabilité en dimension deux de ce couple est donnée par la formule 4.14.

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x^2+y^2)} \quad (4.14)$$

Par définition, la probabilité élémentaire  $dP$  qu'un couple de variables appartienne à l'intervalle  $\{[x, x + dx]; [y, y + dy]\}$  est donnée par l'expression 4.15.

$$dP = \varphi(x, y) dx dy \quad (4.15)$$

La formule 4.15 va devoir être intégrée de manière à ce que  $x$  et  $y$  appartiennent à un disque de rayon  $3\sigma$ . Pour ce faire, les coordonnées polaires  $r$  et  $\theta$  correspondant à  $x$  et  $y$  vont être calculées (voir la figure 4.33).

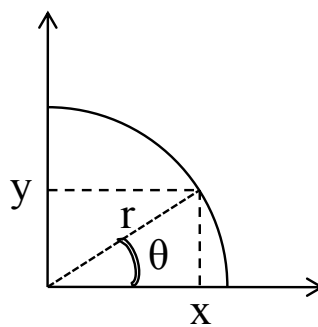


FIG. 4.33 – Des coordonnées cartésiennes aux coordonnées polaires

On obtient  $x = r \cos \theta$  et  $y = r \sin \theta$ , ainsi que  $x^2 + y^2 = r^2$ . La surface élémentaire  $dx dy$  correspond à  $r d\theta dr$ . La relation 4.14 peut alors être intégrée dans la formule 4.16 en considérant que le couple de variables décrit un disque de rayon  $k\sigma$ .

### 4.3 Simulations du pré-alignement du CLIC

$$\begin{aligned}
 P &= \int_0^{k\sigma} \int_0^{2\pi} \frac{r}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} d\theta dr \\
 &= \int_0^{k\sigma} \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} dr \\
 &= 1 - e^{-\frac{k^2}{2}}
 \end{aligned}
 \tag{4.16}$$

Dans l'intégrale 4.16, quand  $k = 3$ , la probabilité  $P$  vaut 98.9%. De ce fait — et contrairement à ce qui pouvait être supposé — le cylindre d'erreur obtenu à l'issue des simulations de la compensation finale du TT1 correspond à une précision légèrement moins bonne que les spécifications. La probabilité qu'une simulation du TT1 soit en dehors des tolérances est plus élevée de 0.7% que ce qui est prévu par la loi normale. Cependant, ce qui importe fondamentalement, c'est que le résultat soit extrêmement proche du but à atteindre. La conclusion des simulations de la modélisation du TT1 tient au fait qu'il semble que les spécifications du pré-alignement actif du CLIC puissent être atteinte.

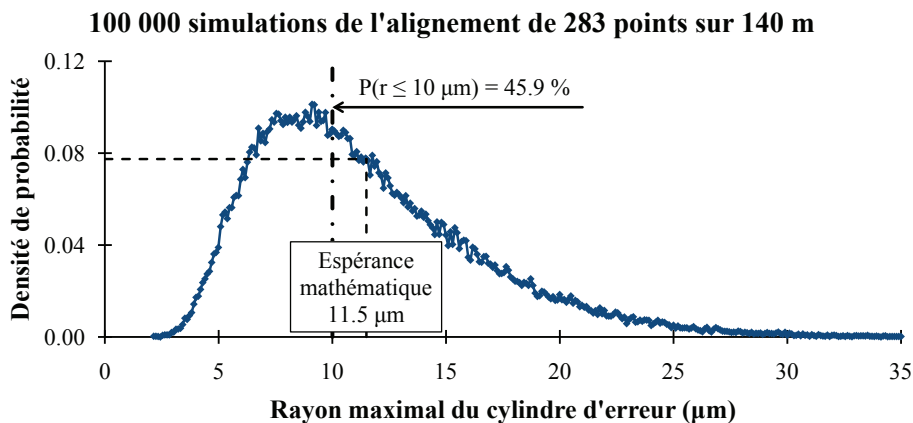


FIG. 4.34 – Les erreurs du TT1 dans sa configuration actuelle

Pour comparer ce résultat avec la situation actuelle, relative aux problèmes des systèmes de centrage, le même calcul a été effectué en incluant les mesures métrologiques des supports des inclinomètres. La distribution du rayon maximal des erreurs sur 140 m est représenté en figure 4.34. L'espérance mathématique du rayon du cylindre est de 11.5  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire le double de la valeur précédente. La probabilité que le rayon du cylindre soit inférieur à 10  $\mu\text{m}$  est de 45.9%. Ce résultat peut être considéré comme encourageant, même s'il n'est pas suffisant d'un facteur deux.

### 4.3.4 Conclusion

Les premières simulations du pré-alignement du CLIC ont montré que les tolérances à  $3\sigma$  de  $10\ \mu\text{m}$  sur les positions transversales et verticales des composants, le long d'une fenêtre coulissante de 200 m, pouvaient être atteintes. Pour ce faire, la longueur appropriée des fils tendus à utiliser était de 426 m. Compte-tenu des approximations qui ont été faites pour pouvoir simuler ce modèle, ce résultat ne doit pas être considéré comme définitif. Ces calculs, qui avaient été imposés par les physiciens du faisceau, ont eu le mérite de faire prendre conscience de l'importance des simulations dans la démarche de démonstration de la faisabilité du pré-alignement actif du CLIC. De plus, les adaptations nécessaires pour faire aboutir le calcul avec LGC ont apporté la volonté de bâtir, par la suite, un modèle qui soit au plus près de la réalité physique.

Cette volonté commence à porter ses fruits. Les simulations de l'alignement de l'expérience du TT1 montrent, rigoureusement, que les tolérances peuvent être atteintes sur 140 m. Elles représentent l'aboutissement de la décomposition déterministe du MRN, décrite à la fin du chapitre 3, dans laquelle toutes les variables primaires correspondent à des observations dont les incertitudes sont plausibles, et toutes les variables secondaires sont générées à partir de leurs matrices de variance-covariance, elles-mêmes obtenues par des simulations de Monte-Carlo.

Dans cette partie, il a été démontré que la probabilité que les erreurs du MRN sur 140 m soient inférieures à  $10\ \mu\text{m}$  était de 98.2%. Ce résultat est sensiblement conforme aux spécifications du CLIC, à 0.7% près.

## 4.4 Futurs axes de recherche

### 4.4.1 Introduction

Les axes de recherches vers lesquels il faut se diriger pour faire aboutir le pré-alignement du CLIC peuvent être classés en deux catégories, à court et long terme.

Les travaux devant être menés en priorité concernent la validation expérimentale au TT1 du modèle simulé sur 140 m. Sans cela, les simulations sur 48 km du MRN du CLIC, qui seront indispensables pour démontrer la faisabilité du pré-alignement, seront considérées comme étant sans fondements, puisque la véracité du modèle sur lesquelles elles auront été bâties n'aura pas été prouvée. Pour aller dans cette direction, il faut résoudre les problèmes de calibration, de métrologie et de gravimétrie, cités précédemment, qui ont empêché les résultats du TT1 d'atteindre une incertitude de mesure micrométrique.

Cela fait, il faudra généraliser le modèle dans un contexte, non plus statique, mais dynamique. En effet, dans les calculs menés jusqu'à présent, il

s'agissait de démontrer la capacité de la méthode de pré-alignement actif du CLIC d'atteindre une tolérance de 10  $\mu\text{m}$  sur 200 m. Dans ce cadre, les électroniques des capteurs ne dérivait pas (et ne tombaient pas non plus en panne d'ailleurs). Les objets dont il s'agissait de mesurer les positions ne variaient pas, de même que le sol qui était un objet immuable dans le temps et dans l'espace. Rien de tout cela n'est vrai. Le traitement des données du pré-alignement du CLIC devra être en mesure d'analyser un système dynamique bien plus complexe que jusqu'à présent.

### 4.4.2 Validation expérimentale du modèle

#### 4.4.2.1 Systèmes inclinométriques

Les systèmes de mesures inclinométriques ont été longtemps négligés dans les études menées. Celles-ci étaient focalisées sur les fils et les capteurs WPS. Ce ne sont que dans les derniers mois de recherches de cette thèse que les inclinomètres sont arrivés sur le devant de la scène.

En premier lieu, il faut faire l'acquisition de sept inclinomètres biaxiaux pour équiper chacune des plaques métrologiques du TT1. La précision de ces capteurs devra être choisie en fonction de l'incertitude métrologique de son système de centrage. En effet, si l'embase sur lequel l'inclinomètre est posé ne peut permettre une orientation absolue meilleure que 50  $\mu\text{rad}$ , comme c'est le cas aujourd'hui, il est vain d'acquérir d'onéreux systèmes de mesure précis à 1  $\mu\text{rad}$ .

Si la conception de l'embase est fondée sur le principe de centrage forcé sur trois billes, alors la précision angulaire est essentiellement tributaire de la distance  $l$  entre ces billes et l'incertitude de mesure  $\sigma_{cmm}$  de la CMM employée (voir la formule 4.17).

$$\sigma_{\theta} \approx \frac{\sqrt{2}}{l} \sigma_{cmm} \quad (4.17)$$

Selon la formule 4.17, si l'incertitude de la CMM est 1  $\mu\text{m}$  et que la distance entre deux billes est 33.5 mm (voir la figure 3.12), la précision angulaire obtenue est 42  $\mu\text{rad}$ , contre 40  $\mu\text{rad}$  dans les simulations du roulis en figure 3.23. Pour obtenir une précision angulaire de 10  $\mu\text{rad}$ , il faudrait que la distance entre les billes atteigne 141 mm. Du point de vue de l'intégration, de telles dimensions commencent à être encombrantes, surtout pour une incertitude relativement faible.

L'idéal consisterait à atteindre 3.3  $\mu\text{rad}$ , c'est-à-dire une précision de 2  $\mu\text{m}$  (qui correspond à la précision a posteriori des observations du TT1) sur une distance de 60 cm (la taille des plaques métrologiques). Cela requerrait une distance entre billes de 43 cm. Le système de centrage forcé sur trois billes de précision montre ses limites. Il est sans doute nécessaire de concevoir un système basé sur un autre principe.

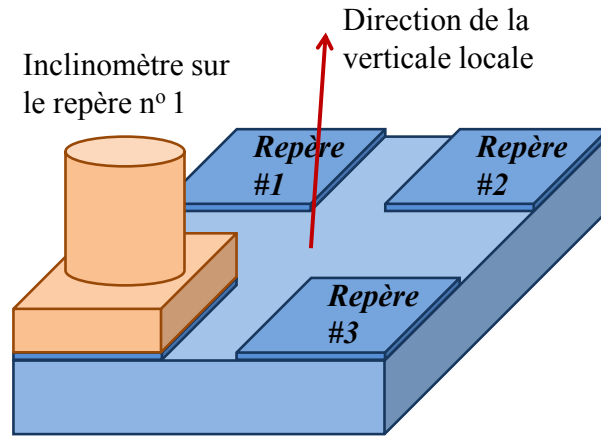


FIG. 4.35 – Schéma du banc de calibration de l'orientation

Une fois que l'interface de centrage des inclinomètres sera définie, il sera possible de concevoir un banc de calibration de leur orientation selon le schéma en figure 4.35. Il s'agit de calculer les trois angles qui compose la matrice de rotation  $\rho$  décrivant l'orientation du repère de mesure de l'inclinomètre biaxial par rapport à celui de son centrage. Un inclinomètre biaxial mesure les angles  $\theta_x$  et  $\theta_y$  de la direction de la verticale  $\vec{\zeta}$  projetée sur deux plans orthogonaux (voir la figure 2.39 au paragraphe 2.4.3.1). Cette direction est inconnue dans le repère du banc. Cependant, en excellente approximation, elle peut être considérée comme constante en tout point du banc. Si ce dernier comporte plusieurs repères de centrages, définis par rapport à celui du banc à l'aide d'une matrice de rotation  $r_i$ , alors la relation 4.18 peut être écrite.

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{\zeta} = r_i \times \rho \times \begin{bmatrix} \omega_i \tan \theta_x(i) \\ \omega_i \tan \theta_y(i) \\ \omega_i \end{bmatrix} \\ \text{avec} \\ \omega_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_x(i) + \tan^2 \theta_y(i)}} \approx 1 \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Cette relation a six inconnues, en l'occurrence les coordonnées de  $\vec{\zeta}$  et les trois angles composant la matrice de rotation  $\rho$ . S'il y a un minimum de trois repères de centrage, le système est redondant et peut être résolu par la méthode des moindres carrés. Si le système de centrage est basé sur des billes de précision, la définition des différents repères par rapport à celui du banc se déduit des mesures CMM sans grande difficulté.

#### 4.4.2.2 Linéarité des WPS

En ce qui concerne l'ensemble formé par les WPS et les fils tendus, la priorité revient à la résolution du problème de linéarité et de roulis des capteurs. Lors des premiers tests de validation du banc de calibration de la linéarité des capteurs WPS, des différences significatives ont été obtenues entre les polynômes fournis par FOGALE NANOTECH et ceux calculés à l'issue des mesures. Celles-ci s'élevaient à 80  $\mu\text{m}$ . En représentant graphiquement les écarts transversaux et verticaux selon le quadrillage effectué lors de la calibration (de 0 V à 10 V dans deux dimensions), ils semblaient suivre une règle quant à leur distribution dans l'espace qu'il restait à définir (voir le champ vectoriel en figure 4.36).

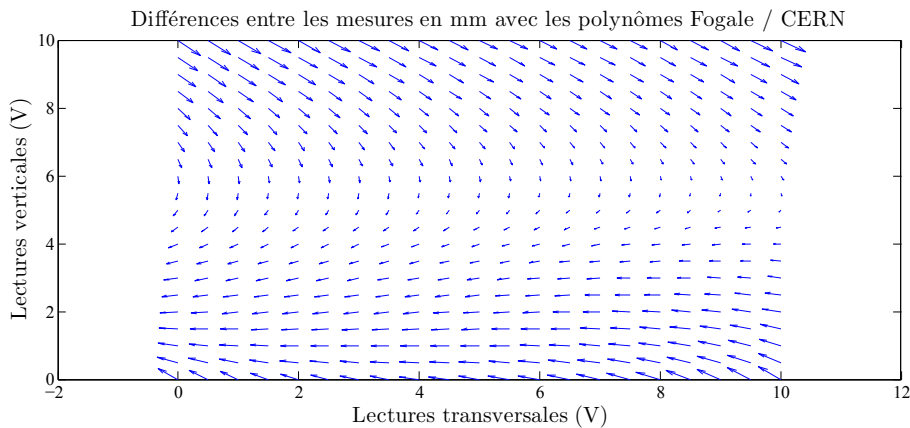


FIG. 4.36 – Champ vectoriel des erreurs de linéarité

Pour expliquer ces différences, les paramètres d'une transformation affine ont été considérés en prenant comme référence les mesures obtenues en appliquant le polynôme de FOGALE. Cela revenait à supposer que le banc de calibration du CERN souffrait de facteurs d'échelle différents en transversal et en vertical, respectivement  $\xi$  et  $\zeta$  sur la figure 4.37, ainsi que d'une erreur d'orthogonalité entre ces deux axes  $\alpha$ . Une erreur globale d'orientation  $\theta$  et de position,  $\omega_x$  et  $\omega_y$ , a été considérée.

Les facteurs d'échelle obtenus étaient, respectivement en transversal et en vertical, de 400 ppm et 4000 ppm. La non-orthogonalité était de 8.6 mrad. Les résidus à l'issue de cette transformation étaient de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$ . Cela dit, ces problèmes d'échelle et d'orthogonalité pouvaient provenir du banc du CERN, de celui de FOGALE, ou des deux à la fois. En attendant un contrôle géométrique du banc du CERN avec la CMM LEITZ INFINITY du laboratoire de métrologie, les calibrations de capteurs WPS de différentes générations ont été comparées. Elle sont représentées en figure 4.38.

La figure 4.38 montre les facteurs d'échelle et la non-orthogonalité des sept capteurs WPS, dont celui décrit précédemment, le « W2D-7D7-049 ».



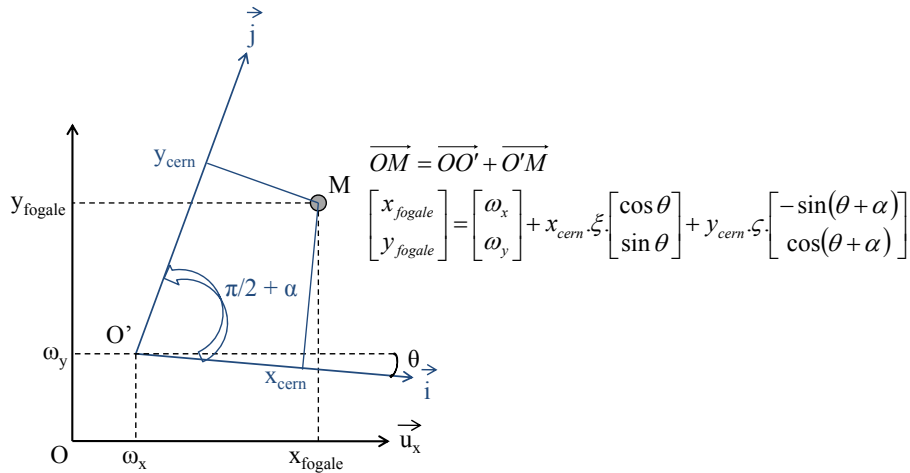


FIG. 4.37 – Une transformation affine comme hypothèse

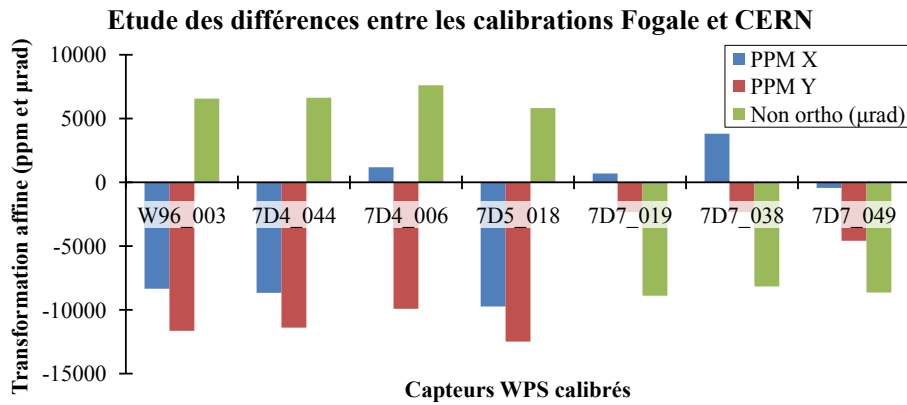


FIG. 4.38 – Paramètres de transformation sur plusieurs générations

Deux tendances nettes se distinguent. Les trois capteurs datant de 2007 ont un facteur d'échelle vertical de l'ordre de  $-2000$  ppm et une non-orthogonalité négative de l'ordre de  $8$  mrad. Les capteurs de générations antérieures à 2007 ont un facteur d'échelle vertical de l'ordre de  $-10000$  ppm et une non-orthogonalité, cette fois-ci positive, de l'ordre de  $6$  mrad.

Le banc du CERN n'est certes pas parfait. Il n'a pas encore été validé géométriquement. Cependant, une telle différence entre ces deux tendances ne peut provenir de lui. Les capteurs ont été testés dans un ordre quelconque. Les différences constatées entre les générations de capteur de  $8000$  ppm pour le facteur d'échelle vertical et de  $14$  mrad pour l'orthogonalité proviennent nécessairement du banc de FOGALE NANOTECH.

Dès lors, l'incapacité du banc de calibration du zéro des WPS à déterminer le roulis des capteurs, constatée au paragraphe 3.3.2.3, peut s'expliquer.

Comment, depuis des observations qui ne sont pas orthogonales ni linéaires, le calcul pourrait converger vers une valeur précise du roulis ?

### 4.4.2.3 Physique des systèmes de mesure

À plusieurs reprises, l'importance des aspects gravimétriques dans la résolution du MRN a été décrite. L'obtention d'une orientation absolue à partir des mesures inclinométriques requiert la connaissance de la déviation de la verticale à l'endroit où le capteur est installé. De plus la modélisation des surfaces hydrostatiques, observées par les capteurs HLS, nécessite de connaître, d'une part l'angle de l'inclinaison due aux marées et d'autre part, le défaut de verticalité au centre du réseau. Si ces différents paramètres ne sont pas connus, la décomposition déterministe proposée à la fin du chapitre 3 ne peut aboutir. De ce fait, la validation expérimentale du modèle du TT1 implique la détermination de la déviation de la verticale le long du tunnel, du défaut de verticalité en son centre, ainsi que la connaissance de l'inclinaison due aux marées.

Ces aspects géophysiques et géodésiques font actuellement l'objet de deux thèses de doctorat au sein des géomètres du CERN. M. Sébastien Guillaume, de l'ETHZ, s'attèle à la « détermination d'un champ de gravité précis pour les études de faisabilité du CLIC ». M. Julien Boerez, de l'université Louis Pasteur de Strasbourg, effectue ses recherches sur « [l']analyse et [la] modélisation de l'incidence des marées sur les réseaux de nivellement hydrostatiques du CERN ».

En plus de ces paramètres gravimétriques, un autre thème lié à la physique est la modélisation des fils qui, elle-même peut être dissociée en deux parties, respectivement en transversal et en vertical. Dans le premier cas, le fil tendu est considéré comme une ligne droite. Mais aucun système de mesure ne permet de prouver qu'un fil tendu long de 100 m forme, en transversal, une ligne droite à mieux que 50  $\mu\text{m}$ . Le problème revient, en quelque sorte, à chercher un étalon pour calibrer une horloge atomique. La seule solution actuellement envisageable consisterait à comparer les mesures transversales obtenues depuis un fil tendu à un système d'alignement laser sous vide. Si ces deux systèmes obtiennent les mêmes résultats, alors ils seraient mutuellement validés. En effet, leurs mesures étant basées sur des principes physiques radicalement différents, il n'y a aucune raison qu'ils soient entachés des mêmes systématismes. C'est aussi dans ce contexte que s'insère le système de mesure RASCLIC ou encore le projet *laser alignment multipoint based design approach* (LAMBDA) [Lackner *et al.*, 2010].

Dans la décomposition actuellement proposée du pré-alignement, aucun système de mesure supplémentaire ne s'assure de la rectitude des fils tendus en transversal, contrairement à la direction verticale où la présence des HLS permet de détecter d'éventuelles incohérences. En transversal, si les fils ne sont pas droits, il est impossible de le mesurer. Il est donc, à terme,

## 4 Expériences et simulations

---

indispensable de valider le modèle linéaire transversal des fils tendus.

Dans la direction verticale, un modèle plus robuste de modélisation des fils a été proposé. Il devrait permettre de rendre le modèle plus résistant aux gradients d'humidité qui, d'après cinq années d'observations au TT1, semblent être la plus grande source de perturbations des mesures après les courants d'air. Ce modèle nécessite la mesure du gradient d'humidité et celle de la fréquence d'oscillation des fils.

Si la mesure de cette fréquence  $\varphi$  est suffisamment précise pour que la flèche déduite puisse être corrélée à l'humidité moyenne dans le tunnel, il sera alors possible de modéliser linéairement le rapport  $\lambda$  entre la masse linéaire  $q$  et la tension  $T$  du fil, en fonction de l'humidité relative  $H$  à un instant  $t$  (voir la relation 4.19).

$$\lambda(t) = \frac{p(t)}{T(t)} = \frac{1}{4l\varphi^2(t)} = a \cdot H(t) + b \quad (4.19)$$

Si les mesures de fréquence permettent d'obtenir les coefficients  $a$  et  $b$  de la régression linéaire en 4.19, le gradient de  $\lambda$  le long du fil pourra être déduit du gradient d'humidité qui est mesuré. Il pourra être utilisé par un outil comme SIMULINK pour calculer numériquement, à partir de l'algorithme en figure 3.27, les corrections à apporter au modèle polynomial du fil tendu en vertical.

### 4.4.2.4 Extrapolation du modèle au MRN

Si les recherches présentées au paragraphe précédent aboutissent, les résultats expérimentaux du TT1 devraient valider le modèle simulé précédemment et dans lequel 98.2% des erreurs d'alignement sur 140 m étaient dans un cylindre de 10  $\mu\text{m}$  de rayon. Il s'agira alors d'étudier le comportement de ce modèle sur de plus longues distances et en intégrant des optimisations.

En effet, la configuration finale du MRN sera un compromis entre l'incertitude de mesure atteinte, celle spécifiée et le coût de l'installation. L'expérience du TT1 sur 140 m n'a comme seuls intérêts que les validations du principe de recouvrement des fils et des modélisations des références d'alignement. Il reste encore de nombreuses questions en suspens.

Quelle est la longueur optimale des fils tendus pour le pré-alignement du CLIC? Combien de plaques devront assurer le recouvrement entre deux fils? De ces paramètres va dépendre notamment le nombre de capteurs requis pour le fonctionnement du MRN.

Quelle incertitude de mesure est requise pour les paramètres gravimétriques? Les déviations de la verticale, les défauts de verticalité, le rayon de courbure de l'équipotentielle de pesanteur, les inclinaisons des surfaces d'eaux du fait des marées et l'accélération de la pesanteur, tels sont les paramètres gravimétriques requis pour obtenir la solution déterministe du MRN.

Les précisions et les justesses nécessaires sur chacun d’entre eux requièrent des moyens, en terme de ressources et d’instrumentations, d’autant plus importants qu’elles sont élevées. Les simulations du MRN doivent mettre en évidence le seuil à atteindre.

### 4.4.3 Alignement d’un système dynamique

#### 4.4.3.1 Mouvements du sol

En 1999, M. Jin Fengxiang, de l’université de Shandong en Chine, a effectué un travail post-doctoral au sein des géomètres du CERN dans le but d’analyser les mesures issues des campagnes annuelles de nivellement du LEP de 1992 à 1998 [Jin, 1999]. Les résultats, représentés graphiquement sur la figure 4.39, mettaient en évidence des déplacements systématiques, d’une année sur l’autre, de certaines zones du LEP de l’ordre du millimètre par an.

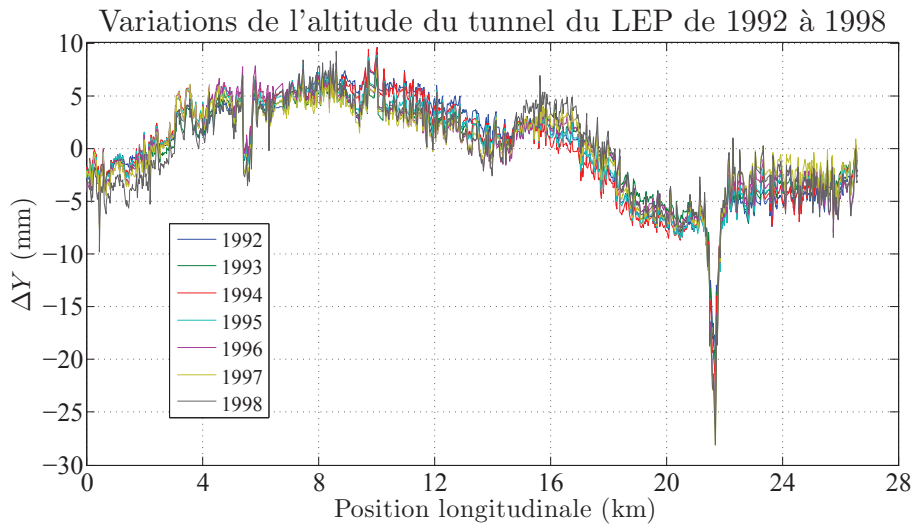


FIG. 4.39 – Nivellements du LEP entre 1992 et 1998

En 2008, les physiciens de la dynamique du faisceau ont demandé, en parallèle des simulations du pré-alignement, une modélisation des mouvements du sol. Il s’agissait d’intégrer à leurs études du comportement du faisceau cette autre source d’accroissements de l’émittance. Les travaux de M. Jin Fengxiang ont été étudiés de façon à extraire la vitesse d’élévation du LEP sous la forme d’une série de Fourier spécifiée par les physiciens (voir la formule 4.20).

$$\Delta z(s, t) = \left( A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i s - \varphi_i) \right) \cdot t \quad (4.20)$$

## 4 Expériences et simulations

---

Les nivellements avaient été effectués en mesurant deux points sur chaque quadrupôle du LEP. Les 1 400 observations de chaque série ont été ré-échantillonnées en 1 024 points afin qu'ils soient équidistants dans la direction longitudinale. Connaissant les dates des nivellements, une vitesse moyenne a été déduite des déplacements mesurés d'une année sur l'autre. Une transformée de Fourier a ensuite été appliquée à cette vitesse. Les amplitudes de la vitesse en fonction des fréquences spatiales sont représentées sur la figure 4.40.

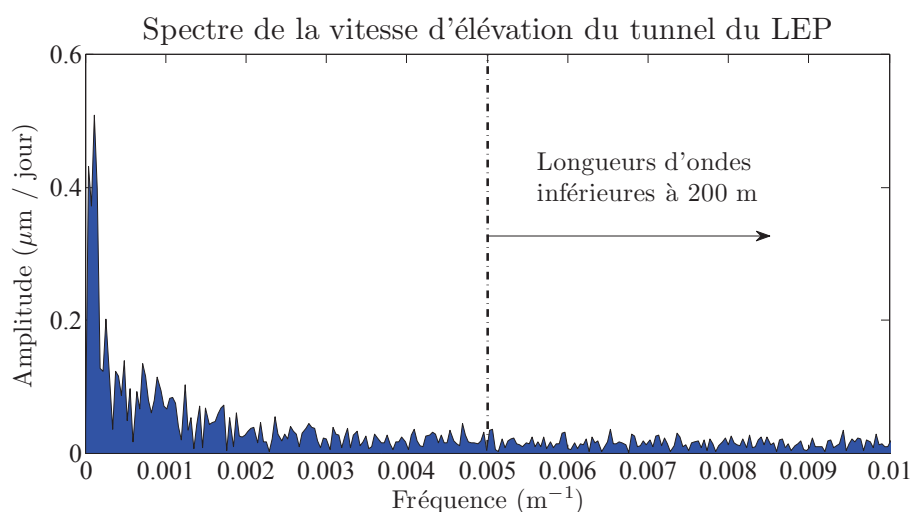


FIG. 4.40 – Spectre de la vitesse d'élévation du LEP

Ce spectre ne met pas en évidence de longueur d'onde isolée. Les amplitudes correspondant aux longueurs d'ondes inférieures à 200 m sont relativement homogènes, en dessous de 25 nm par jour. Mais le seuil à partir duquel le signal peut être considéré comme étant significatif n'est pas clairement défini. Le choix de la longueur d'onde de 200 m comme limite entre le signal et le bruit est principalement dû à l'importance de cette distance dans les spécifications du CLIC. La modélisation de la vitesse en série de Fourier s'est donc limitée aux longueurs d'ondes supérieures à 200 m. Elle est représentée, de même que la vitesse issue des observations, sur la figure 4.41. L'ordre de grandeur de la vitesse d'élévation du tunnel du LEP est de 1  $\mu\text{m}$  par jour. Elle peut atteindre par endroit 3  $\mu\text{m}$  par jour.

Un modèle expérimental des mouvements du sol d'un ouvrage long de 27 km est de ce fait disponible. Il est basé sur des observations acquises sur une période de sept années. C'est une excellente base de travail pour simuler les mouvements du sol du tunnel du CLIC. Il suffirait de conserver les longueurs d'ondes et leurs amplitudes respectives en générant des phases aléatoires. Un bruit blanc, d'amplitude égale à 25 nm par jour, pourrait même être ajouté. En intégrant ces valeurs aux simulations du MRN du

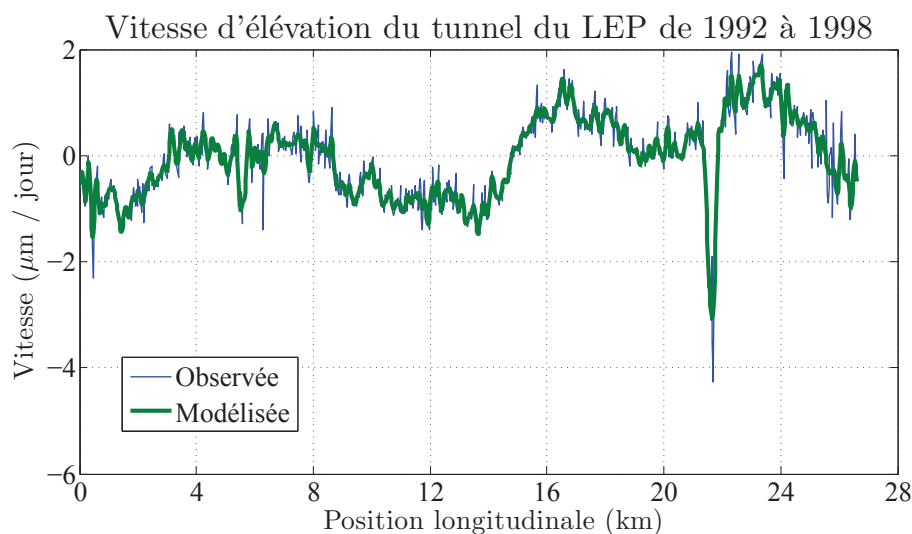


FIG. 4.41 – Modélisation de la vitesse d'élévation du LEP

CLIC, la capacité du pré-alignement à discerner le signal du bruit des mesures pourrait être mise à l'épreuve d'une manière plus proche de l'environnement réel des accélérateurs de particules.

#### 4.4.3.2 Filtres de Kalman

Le sol du tunnel se meut, de même que les objets qui lui sont solidaires. Une partie des déplacements est aléatoire, une autre est fonction du temps. À ces mouvements s'ajoutent ceux dus aux fluctuations dans le temps et dans l'espace de la température et des autres paramètres météorologiques. Un accélérateur de particules comme le CLIC est particulièrement sensible à ces phénomènes du fait de la précision requise pour son alignement.

L'alignement final du CLIC, fait par rapport au faisceau de particules lui-même, est souhaité à  $1 \mu\text{m}$ . C'est l'ordre de grandeur de l'effet des mouvements du sol sur une journée, d'après les observations du LEP. De ce fait, plusieurs repositionnements de la machine seront requis dans une même journée.

D'autre part, un nombre considérable de systèmes de mesure seront employés à l'alignement et au repositionnement du CLIC. En ne considérant que les capteurs strictement nécessaires au pré-alignement des modules (10 500 par linac), 84 000 sont requis. Avec une telle quantité, la probabilité qu'un capteur soit défaillant est loin d'être nulle. Si cela se produit, comment faire pour permettre le calcul des positions des composants de l'ensemble de la machine, du moins le temps d'intervenir pour remplacer le système défaillant ?

Les capteurs servant au pré-alignement du CLIC seront très proches les uns des autres (dans le pire des cas 2 m en longitudinal). De plus ils seront

## 4 Expériences et simulations

---

physiquement liés les uns aux autres par la liaison cinématique entre les poutres ou par le sol.

Pour toutes ces raisons, les positions de l'ensemble des composants du CLIC, à un instant donné, seront corrélées dans le temps et dans l'espace. Dans ce cadre un estimateur récursif, comme un filtre de Kalman qui, pour déterminer l'état courant, prend en considération l'état précédent et les observations de l'instant donné, semble bien adapté. Cette méthode a déjà servi au traitement des déformations du réseau métrologique de la caverne expérimentale ATLAS du LHC [Lippitsch, 2007]. Non seulement l'utilisation d'un filtre de Kalman permettait de considérer le problème de l'alignement dans un contexte dynamique, mais aussi de pallier localement et temporairement des observations manquantes [Lippitsch, 2007].

### 4.4.4 Conclusion

À court terme, la stratégie de démonstration de la faisabilité du pré-alignement du CLIC passe par la validation expérimentale du modèle simulé sur 140 m. Pour ce faire, il faut tout d'abord résoudre les problèmes liés à la linéarité et au roulis des capteurs WPS. Ensuite il faut concevoir un système de centrage adapté aux orientations absolues des inclinomètres à quelques microradians. Enfin, une campagne de mesure de la déviation de la verticale le long du TT1 devra être faite. La caméra astro-zénithale de l'ETHZ utilisée par M. Sébastien Guillaume dans ses recherches au CERN pourra s'avérer fort utile.

À moyen terme, une fois que la méthode proposée dans cette thèse aura été validée expérimentalement sur 140 m, il sera possible de l'extrapoler, par des simulations de Monte-Carlo, aux 48 km du CLIC. La comparaison des résultats en faisant varier tel ou tels paramètres permettra de déduire, d'une part la configuration optimale, relative à la longueur des fils et du taux de redondance du recouvrement, et d'autre part, les incertitudes nécessaires pour les paramètres gravimétriques. À proprement parler, l'extrapolation ne suffira pas complètement. Il faudra concevoir puis intégrer le réseau métrologique qui assurera le lien entre les deux linacs du CLIC, de chaque côté du point d'interaction des faisceaux de particules.

Enfin, à long terme, les études devront être orientées vers un traitement dynamique des données du pré-alignement, notamment par l'utilisation du filtre de Kalman. Ce travail représentera un double défi dans la mesure où les méthodes à employer correspondent à un degré avancé de traitement du signal et où la masse des données à analyser sera considérable.

## 4.5 Conclusion

Les expériences et simulations effectuées au cours de ces cinq années se sont focalisées sur le réseau métrologique de référence. La méthode pro-

posée pour traiter le MRN consiste à décomposer ce réseau en étapes qui respectent l'indépendance des observations, de la compensation des mesures topométriques du GRN à l'ajustement des références d'alignement, en passant par les calibrations des capteurs et la métrologie de leurs supports. Le chapitre 3 avait pour but de définir cette méthode en décrivant chacune des étapes qui la compose. Le chapitre 4 avait légitimement vocation à fournir l'incertitude de mesure finale. Il s'agissait de rassembler chacune des étapes du MRN, que ce soit physiquement dans les expériences, ou théoriquement dans les algorithmes des simulations de Monte-Carlo.

Deux expériences majeures ont été mises en place et exploitées au cours de ces années. Le fil de 500 m, tendu dans les tunnels TT83 et TT84, n'a pas permis de déterminer de manière significative la précision sur une aussi grande longueur. Cependant l'influence des perturbations était telle que cette expérience a mis en évidence les phénomènes physiques influant sur l'équilibre du fil. Le test d'alignement du TT1, long de 140 m a beaucoup évolué depuis sa mise en place. Chaque modification correspondait à la prise en compte d'un nouveau phénomène, illustrant ainsi l'évolution de la compréhension du problème du pré-alignement actif du CLIC, vu dans sa globalité.

Les résultats du test d'alignement du TT1 n'atteignent toujours pas la tolérance à  $3\sigma$  de  $10\ \mu\text{m}$  sur la longueur de l'expérience. Mais ils en sont proches; il reste moins d'un ordre de grandeur à franchir. Les justesses atteintes à  $1\sigma$ , respectivement en transversal et en vertical, sont de  $11\ \mu\text{m}$  et de  $17\ \mu\text{m}$ . La dispersion des mesures sur une période d'observation d'un mois est, dans le pire des cas,  $3\ \mu\text{m}$ .

Les simulations de Monte-Carlo du TT1 montrent qu'en résolvant les problèmes de calibration des capteurs WPS, tout en intégrant des mesures de déviation de la verticale, la probabilité que les erreurs soient dans un cylindre de  $10\ \mu\text{m}$  de rayon est 45.9% selon une espérance mathématique égale à  $11.5\ \mu\text{m}$ . En considérant en plus la résolution des problèmes métrologiques liés au centrage des inclinomètres, cette même probabilité devient 98.2% selon une espérance mathématique égale à  $5.2\ \mu\text{m}$ . Ce résultat est, à 0.7% près, conforme aux spécifications du pré-alignement du CLIC.

Les simulations qui avait été faites en 2008 montraient que les erreurs étaient hors tolérance pour des fils de longueurs inférieures à 426 m. Or l'intégration de ce modèle dans les simulations de la dynamique du faisceau du CLIC s'était avérée entièrement satisfaisante au regard du budget de l'accroissement de l'émittance [Schulte, 2009a]. Il s'agissait alors d'un modèle approché du pré-alignement. À la lumière des résultats des simulations du TT1, le modèle rigoureux qui devra être édifié, par l'extrapolation de la méthode proposée, pourrait être meilleur encore.

Avant cela, il sera nécessaire de le valider expérimentalement. Le nombre de problèmes à résoudre dans cette voie est limité. L'expérience du TT1 devrait prochainement être en mesure de confirmer les résultats simulés. Les simulations extrapolées sur la longueur complète du CLIC, 48 km, pourront



#### 4 Expériences et simulations

---

alors être faites en toute rigueur. En dernier ressort, la finalisation de ce modèle consistera à le rendre apte à la prise en charge des aspects dynamiques de l'alignement du CLIC.

---

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

### 5.1 Réponse à la problématique

Cette thèse a pour but de proposer une méthode d'alignement du projet d'accélérateur linéaire CLIC qui englobe toutes les étapes qui le composent, des réseaux de géodésie en surface jusqu'au pré-alignement actif de ses composants. La problématique consiste à établir une méthode rassemblant toutes ces étapes dans une unique chaîne métrologique et ce, en tenant compte d'une part, des différents référentiels intervenants et d'autre part, des perturbations susceptibles d'altérer le résultat de manière significative.

À la fin du chapitre 2, la chaîne métrologique, allant du réseau métrologique de référence (MRN) jusqu'à la fiducialisation des composants, en passant par le réseau de pré-alignement des supports (SPN), a été présentée. Son analyse, du point de vue des systèmes de coordonnées qui la compose, montre que la chaîne métrologique peut être décomposée en un nombre restreint de tâches élémentaires, à savoir :

- La calibration absolue des repères de mesure des capteurs,
- La définition métrologique des supports des capteurs,
- L'ajustement des paramètres de transformation vers le repère général, effectué en s'appuyant sur la modélisation des références d'alignement.

Le chapitre 3 traite en détail de chacune de ces tâches élémentaires. Parmi les recherches sur les calibrations absolues des repères de mesure des capteurs, celles qui sont les plus novatrices concernent les WPS de FOGALE NANOTECH. Un nouveau système de centrage et un banc de calibration adapté ont été conçus, réalisés et exploités. Malgré les défauts de linéarité et d'orthogonalité des capteurs WPS mis en évidence, les résultats obtenus sont extrêmement prometteurs en ce qui concerne les translations, de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  pour les capteurs HLS et WPS.

Les travaux sur les définitions métrologiques des supports des capteurs ont permis d'introduire les mesures CMM. La collaboration entre les géomètres et les métrologues du CERN n'est certes pas nouvelle. Mais le recours systématique aux compétences des métrologues et de leurs puissants instruments de mesure dans les procédures des géomètres du CERN est indéniablement un apport de cette thèse. En dehors des limitations angulaires dues au principe actuel de centrage des inclinomètres, l'incertitude sur la définition métrologique des repères de centrage des capteurs est désormais

## 5 Conclusion générale

---

du même ordre de grandeur que l'incertitude des capteurs, à savoir  $1\ \mu\text{m}$ .

La dernière partie du chapitre 3 décrit comment la modélisation des références d'alignement, à savoir les fils tendus, les surfaces hydrostatiques et la direction de la verticale locale, sont utilisées pour calculer la solution générale du MRN. Cette étape est marquée par une approche déterministe du problème. Pour contraindre le résultat de l'ajustement au plus près de la réalité physique, de nombreux paramètres impliqués sont issus d'observations indépendantes. Parmi eux se trouvent la déviation de la verticale, le défaut de verticalité, le rayon de courbure de la surface équipotentielle de pesanteur et l'inclinaison de cette équipotentielle due aux marées. Ces quelques paramètres de géodésie physique sont définis de manière à être parfaitement compatibles avec les travaux de doctorat menés en parallèle au CERN sur ce thème.

En d'autres termes, à l'issue du chapitre 3 de cette thèse, la proposition d'une méthode d'alignement du projet d'accélérateur linéaire CLIC est faite. La problématique, visant à ce que cette proposition ne consiste qu'en une unique chaîne métrologique complètement déterminée, est résolue dans le cas du MRN. La validation de la méthode proposée est l'objet du chapitre 4.

### 5.2 Résultats obtenus

Les recherches sur la décomposition déterministe de la chaîne métrologique du MRN ont été accompagnées par le développement d'expériences visant à calculer son incertitude de mesure. Le test d'alignement du TT1, long de 140 m, a été conçu initialement pour étudier le principe de recouvrement des fils. Désormais, il représente la maquette sur cette distance du MRN. En mettant en place les nouveaux systèmes de centrage forcé sur des plaques en invar mesurées en métrologie et en appliquant les calibrations absolues des capteurs WPS, la précision et la justesse du TT1 ont pu être calculées. La dispersion des mesures, calculée sur une période d'un mois, est de  $3\ \mu\text{m}$ . La justesse obtenue est de  $17\ \mu\text{m}$  en transversal et de  $11\ \mu\text{m}$  en vertical, ce qui correspond à une moyenne quadratique de  $14\ \mu\text{m}$ .

L'incertitude de mesure obtenue, qui est une combinaison de la précision et de la justesse, est encore supérieure à la tolérance de pré-alignement du CLIC qui est, à  $3\sigma$ , de  $10\ \mu\text{m}$  le long d'une fenêtre coulissante de 200 m. Cependant elle en est très proche, à moins d'un ordre de grandeur.

C'est d'autant plus rassurant que ce résultat est limité par des problèmes clairement définis et en cours de résolution. Le problème de linéarité et d'orthogonalité des capteurs WPS, qui empêche la détermination du roulis de leurs axes de mesure devrait être résolu par la validation géométrique du banc d'étalonnage de ces capteurs. Le principe de fonctionnement du banc de calibration de l'orientation absolue des inclinomètres a été décrit, il ne reste qu'à le réaliser. Les systèmes de mesure nécessaire à la détermination

des paramètres de géodésie physique sont actuellement disponibles au CERN. Il faut simplement planifier une campagne de mesure au TT1.

Comme les problèmes qui limitent le résultat du TT1 sont clairement définis et se résument à un nombre restreint de paramètres inconnus quantitativement, il a été possible d'effectuer des simulations de Monte-Carlo de cette expérience. Selon les résultats de ces calculs, la probabilité que toutes les erreurs du TT1 soient inférieures à  $10\ \mu\text{m}$  est égale à 98.2%, tandis que la tolérance de pré-alignement, appliquée à la loi normale correspond à une probabilité de 98.9%.

Les travaux devant être effectués pour valider la proposition de décomposition du MRN devraient permettre d'obtenir expérimentalement au TT1 des résultats identiques aux simulations. Il s'agit de résoudre les problèmes de centrage et de calibration des inclinomètres et des WPS, et d'effectuer des mesures des paramètres de géodésie physique au TT1. Quand ce sera chose faite, le modèle pourra être extrapolé à la longueur totale du CLIC, et éventuellement intégrer le réseau de pré-alignement des supports (SPN) ainsi que la fiducialisation. La simulation de ce modèle complet validera la faisabilité du pré-alignement du CLIC.

### 5.3 Apport de la thèse

La principale avancée que j'ai apportée au problème du pré-alignement du CLIC est la réponse à la problématique de ma thèse, en l'occurrence la décomposition déterministe de la chaîne métrologique du MRN. Même si sa validation expérimentale n'est pas achevée, il est d'ores et déjà assuré qu'elle puisse être étendue au SPN et à la fiducialisation. En effet, la définition des repères « objets » des composants est fondamentalement identique à ceux des plaques métrologiques, quand bien même leurs déterminations se feraient par le biais de systèmes de mesure différents des CMM.

Au fur et à mesure que les recherches avançaient, j'ai réalisé que la difficulté qui devait être surmontée en priorité était la définition des axes de mesure des capteurs par rapport à leurs repères de centrage. Dans ce contexte, j'ai développé une interface à centrage forcé pour les WPS permettant d'une part, de définir un repère de centrage facilement mesurable et d'autre part, de calibrer la position et l'orientation des axes de mesure de ces capteurs par rapport à ce repère. j'ai conçu, réalisé et exploité le banc de calibration correspondant. J'ai également posé les bases de la résolution de ce problème appliqué aux inclinomètres.

Les réflexions que j'ai menées en vue de comprendre les contraintes de géodésie physique sur le MRN ont eu comme aboutissement l'approche déterministe. Elle vise à rester au plus près de la réalité physique en faisant appel au plus grand nombre possible de mesures physiques, de la fréquence d'oscillation des fils à la variation du défaut de verticalité de la surface équi-

## 5 Conclusion générale

---

tentielle de pesanteur due aux marées. Dans ce cadre j'ai repensé la manière d'utiliser les références d'alignement, à savoir les fils tendus et les surfaces hydrostatiques. Ainsi, le HLS n'est plus utilisé comme un système de nivellement hydrostatique. Il est désormais considéré comme un système de positionnement par rapport à une surface qui est définie dans l'espace par des mesures physiques.

Cette thèse et plus généralement ces cinq années consacrées au pré-alignement du CLIC au CERN m'ont apportées une expérience importante en gestion de projet, en conception mécanique, en traitement de données et dans la théorie des erreurs. L'exemple le plus révélateur est l'expérience du TT1 que j'ai conçue, dessinée et installée en 2006, puis exploitée jusqu'aux derniers mois de ma thèse. Les simulations que j'ai entreprises pour aller au delà des résultats expérimentaux m'ont permis d'entrevoir les possibilités de l'utilisation des outils statistiques dans le traitement des données.

Le CERN n'est pas un institut comme les autres. C'est un temple de la science moderne. Le CLIC, par l'ensemble des défis qui le constituent, symbolise parfaitement l'une des missions du CERN, à savoir repousser les limites technologiques. Cette mission, mue par la volonté de faire progresser la connaissance des lois de l'univers, engendre une ambiance de constante émulation dans laquelle j'ai évolué.

Puisse ma thèse avoir contribué au projet CLIC et au CERN. Ce serait un modeste gage de ma gratitude.

---

# GLOSSAIRE

---

AFT	<p>Association française de topographie</p> <p>Association dont le but est de rassembler les professionnels des sciences géographiques.</p>
AS	<p><i>Accelerating structure</i></p> <p>Cavité accélératrice générant un champ électrique selon un principe de radio-fréquence.</p>
ATLAS	<p><i>A toroidal LHC apparatus</i></p> <p>Une des quatre expériences du LHC installées aux points d'interactions des faisceaux de particules. ATLAS devrait mettre en évidence le boson de Higgs.</p>
BDS	<p><i>Beam delivery system</i></p> <p>Système de focalisation final du faisceau de particules de chaque côté du point d'interaction.</p>
BIPM	<p>Bureau international des poids et mesures</p> <p>Organisation établie pour maintenir le système international d'unité (SI).</p>
BPM	<p><i>Beam position monitor</i></p> <p>Instrumentation permettant de connaître les positions transversales et verticales du faisceau de particules.</p>
CCD	<p><i>Charge coupled device</i></p> <p>Composant électronique photosensible convertissant un rayonnement électromagnétique en un signal analogique.</p>
CCS	<p><i>CERN coordinate system</i></p> <p>Système général de coordonnées cartésiennes du CERN.</p>
CERN	<p>Organisation européenne pour la recherche nucléaire</p> <p>Organisme international, à Genève en Suisse, dédié à la recherche fondamentale en physique des hautes énergies.</p>
CLIC	<p><i>Compact linear collider</i></p> <p>Projet de collisionneur linéaire de leptons proposé par le CERN pour succéder au LHC.</p>
CMM	<p><i>Coordinate measuring machine</i></p> <p>Instrument de mesure de métrologie fournissant des coordonnées de points, généralement à partir d'un palpeur. En français, il s'agit d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT).</p>

CTF2	<i>CLIC test facility 2</i> Deuxième expérience de validation du CLIC, mise en place et exploitée au début des années 2000.
DEL	Diode électro-luminescente Composant opto-électronique polarisé capable d'émettre de la lumière lorsqu'il est parcouru par un courant électrique.
DESY	<i>Deutsches Elektronen Synchrotron</i> Laboratoire de recherches en physique des particules situé à Hambourg en Allemagne.
ETHZ	<i>Eidgenössische Technische Hochschule Zürich</i> École polytechnique fédérale de Zürich en Suisse.
GGPSO	<i>Geodetic ground point socket</i> Matricule, dans la nomenclature du LHC, des points du réseau géodésique dans le sol du tunnel de cette machine.
GPS	<i>Global Positioning System</i> Système de positionnement par satellite.
GRN	<i>Geodetic reference network</i> Réseau géodésique de référence du CLIC. Semblable aux points GGPSO du LHC, il sert de base au MRN.
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i> Ouvrage de référence en métrologie, édité par le BIPM, sur la théorie de propagation des erreurs.
HLS	<i>Hydrostatic Levelling System</i> Système de mesure par nivellement hydrostatique. Par réduction, désigne les capteurs produits par FOGALE NANOTECH.
ICFA	<i>International committee for future accelerators</i> Conseil mis en place pour décider des grandes orientations sur les recherches en physique des particules.
ILC	<i>International linear collider</i> Projet de collisionneur linéaire de leptons, concurrent au projet CLIC du CERN, pour succéder au LHC.
ISR	<i>Intersecting storage rings</i> Principal accélérateur de particules du CERN dans les années 1970. Il a été démantelé dans les années 1980.
ITRF	<i>International terrestrial reference frame</i> Cadre de coordonnées international permettant d'unifier les références terrestres et astronomiques.
JA5L	Acronyme inconnu Inclinomètre monoaxe produit par SENSOREX. Ce type de capteur a été utilisé au CERN pour l'expérience du CTF2.
LAMBDA	<i>Laser alignment multipoint based design approach</i> Projet du CERN de système de mesure par écartométrie sur un laser sous vide, basé sur la détermination du maximum d'intensité du faisceau.

---

LEP	<i>Large electron positron</i> Collisionneur d'électrons du CERN, en fonction de 1989 à 2000. Son tunnel est actuellement occupé par le LHC.
LGC	Logiciel général de compensation Logiciel d'ajustement 3D par la méthode des moindres carrés, développé et utilisé par les géomètres du CERN.
LHC	<i>Large hadron collider</i> Projet phare du CERN, ce collisionneur de protons est le plus puissant au monde. Mis en route en 2008.
Linac	<i>Linear accelerator</i> Contraction désignant toute section droite d'un accélérateur de particules.
MPE	<i>Maximum permissible error</i> Terme de métrologie caractérisant la plus grande erreur pouvant survenir.
MRN	<i>Metrological reference network</i> Réseau métrologique de référence du CLIC. Il a pour but la définition des références d'alignement utilisées par le SPN.
NIKHEF	<i>Nationaal instituut voor subatomaire fysica</i> Institut national de recherches nucléaires de Hollande.
PETS	<i>Power extraction and transfer structure</i> Composant du décélérateur de particules qui fournit l'énergie aux AS du CLIC.
PS	<i>Proton synchrotron</i> Accélérateur de particules du CERN mis en marche en 1959. Il sert désormais à la chaîne de pré-injection du LHC.
RASCLIC	<i>Red alignment system for CLIC</i> Système de mesure par diffraction laser sous vide pour le CLIC, développé à NIKHEF.
RASNIK	<i>Red alignment system from NIKHEF</i> Système d'alignement à courte distance développé à NIKHEF.
SC	<i>Synchro-cyclotron</i> Premier accélérateur du CERN. Il a été en service de 1957 à 1991.
SLAC	<i>Stanford linear accelerator center</i> Laboratoire de recherches en physique des particules situé près de San-Francisco aux États-Unis d'Amérique.
SPN	<i>Support pre-alignment network</i> Réseau du CLIC permettant de définir les positions des composants du CLIC à partir des références d'alignement déterminées par le MRN.
SPS	<i>Super proton synchrotron</i> Accélérateur de particules du CERN mis en marche dans les années 1980. Il sert désormais à la chaîne de pré-injection du LHC.

---



## 6 Glossaire

---

SSC	<i>Superconducting super collider</i> Projet de collisionneur géant, aux États-Unis d'Amérique, avorté lors de sa construction pour raisons budgétaires.
TMS	<i>Tilt measuring system</i> Inclinomètre biaxial à principe capacitif produit par FOGALE NANOTECH.
TT1	<i>Transfer tunnel 1</i> Tunnel du CERN dans lequel est installé le principal test d'alignement du CLIC.
TT83	<i>Transfer tunnel 83</i> Tunnel du CERN appartenant au complexe du SPS et dans lequel se situait en partie l'expérience du fil tendu de 500 m.
TT84	<i>Transfer tunnel 84</i> Tunnel du CERN appartenant au complexe du SPS à la suite du TT83. Une partie de l'expérience du fil de 500 m s'y trouvait.
WGS84	<i>World geodetic system 1984</i> Système géodésique associé au GPS.
WPS	<i>Wire positioning system</i> Système de mesure de localisation par rapport à un fil tendu. Par réduction, désigne les capteurs produits par FOGALE NANOTECH.
$\chi^2$	Khi-deux Type de distribution statistique d'une variable aléatoire liée à la loi normale. Cette distribution est la base de nombreux tests statistiques.

---

## FONCTIONS SPÉCIALES

---

Les documents qui vont suivre correspondent aux fonctions utilisées de manière récurrente dans les algorithmes des simulations du MRN à l'échelle du TT1. Ces fonctions sont à rapprocher des outils mathématiques définis au paragraphe 3.2 du chapitre 3. L'accès aux algorithmes des simulations sera décrit dans l'annexe B.

### A.a Distribution et adéquation

L'algorithme MATLAB qui va suivre est une fonction qui permet, à partir des réalisations de séries de variables aléatoires, de calculer des valeurs discrètes de leurs densités de probabilité et de leurs fonctions de répartition. Les espérances mathématiques empiriques des variables sont également calculées, de même que les moyennes et écarts-types selon la loi normale. La normalité des distributions est vérifiée par un test d'adéquation du  $\chi^2$ . Cet algorithme nécessite l'installation des outils statistiques de MATLAB qui sont optionnels.

```

fonction [Chi,Nor,Esp,Val,Den,Rep]=adequation(SIM,n_ec,prob)

% Fonction permettant, a partir de n_col parametres simules n_mc fois
% de calculer :
% - Les moyennes et ecarts-types selon la loi normale,
% - Faire un test d'adequation du Chi-deux selon la probabilite prob,
% - Calculer les densites de probabilites (Val et Den).

% En input, les variables sont :
% - "SIM" la matrice contenant n_mc realisations de n_col variables.
% C'est donc une matrice n_mc * n_col.
% - "n_ec" est le nombre de categories dans lesquelles les realisations
% vont etre classees.
% - "prob" est la probabilite du test d'adequation.

% En output, les variables sont :
% - "Chi" contient les resultats du test du chi2,
% - "Nor" contient les parametres des densites de probabilite selon la
% loi normale,
% - "Val" et "Den" sont respectivement les variables classees et leurs
% densites de probabilites.

```

## A Fonctions spéciales

---

```
% Calcul des dimensions
n_mc=size(SIM,1);
n_col=size(SIM,2);

% Tableau des parametres de la loi normale (moyenne et ecart-type) pour
% chaque colonne.
param_norm=zeros(2,n_col);
esper=zeros(1,n_col);

% Les variables simulees a tester
parametres=SIM;

% Calcul de la repartition des observations
param_max=1.001*max(parametres);
param_min=min(parametres);
param_amp=param_max-param_min;

% On definit la largeur des classes
param_del=param_amp/n_ec;

% On remplit le tableau des parametres de la loi normale
for i=1 :n_col
    [mu,sig]=normfit(parametres(1 :end,i));
    param_norm(1,i)=mu;
    param_norm(2,i)=sig;
end

% Calcul des densites de probabilite empiriques
% Initialisation des tableaux
param_val=zeros(n_ec,n_col); % Centres des classes
param_den=zeros(n_ec,n_col); % Densites de probabilite
param_nom=zeros(n_ec,n_col);
param_rep=zeros(n_ec,n_col); % Fonctions de repartition
param_cla=zeros(3,n_col); % On retient le nbre de classe contenant
% plus de 5 observations
chi2_norm=zeros(4,n_col); % Tableau du test du chi 2

for j=1 :n_col
    for i=1 :n_ec
        % Les centres des classes sont equidistants
        param_val(i,j)=param_min(1,j)+param_del(1,j)*(2*i-1)/2;
        toto=0;

        % On compte le nombre d'observations dans chaque classe
        for k=1 :n_mc
            if param_val(i,j)-param_del(1,j)/2<=parametres(k,j) && ...
                parametres(k,j)<param_val(i,j)+param_del(1,j)/2
                toto=toto+1; % toto contient le nombre de mesures dans une
                % classe
            end
        end
        param_nom(i,j)=toto;
        esper(1,j)=esper(1,j)+toto*param_val(i,j);
    end
end
```

```

    if toto<5 && i< n_ec/2
        param_cla(1,j)=i+1; % 1ere classe contenant + de 5 observ.
    elseif toto>=5 && i>0.5*n_ec;
        param_cla(2,j)=i+1; % Derniere cl. contenant + de 5 obs.
    end
    param_den(i,j)=toto/(n_mc*param_del(1,j)); % Calcul de la
    % densite de probabilite
end

for i=1 :n_ec
    toto=0;
    for k=1 :i
        toto=toto+param_nom(k,j);
    end
    param_rep(i,j)=toto/n_mc;
end
esper(1,j)=esper(1,j)/n_mc;

if param_cla(1,j)==0;
    param_cla(1,j)=1; % Si toutes les cl. ont + de 5 obs, partie 1
end
if param_cla(2,j)>n_ec
    param_cla(2,j)=n_ec; % Si toutes les cl. ont + de 5 obs, part 2
end

toto=0;
% On cherche a connaitre le nombre de mesures dans les classes
% selectionnees
for i=param_cla(1,j) :param_cla(2,j)
    toto=toto+param_den(i,j)*param_del(1,j);
end
param_cla(3,j)=toto*n_mc;

% Maintenant, place au test d'adequation du Chi-deux
for i=param_cla(1,j) :param_cla(2,j)
    % Calcul de la probabilite normale de la classe
    normal=normcdf(param_val(i,j)+param_del(1,j)/2, ...
    param_norm(1,j),param_norm(2,j))-normcdf(param_val(i,j)-...
    param_del(1,j)/2,param_norm(1,j),param_norm(2,j));

    % Calcul de la probabilite empirique
    proba=param_den(i,j)*param_del(1,j);

    % Variable a tester
    chi2_norm(2,j)=chi2_norm(2,j)+n_mc*((proba-normal)^2)/normal;
end

% Bornes du chi^2
chi2_norm(1,j)=chi2inv((1-prob)/2,param_cla(2,j)- ...
param_cla(1,j)-3);
chi2_norm(3,j)=chi2inv((1+prob)/2,param_cla(2,j)- ...
param_cla(1,j)-3);

% Test du chi^2

```

## A Fonctions spéciales

---

```
    if chi2_norm(1,j)<=chi2_norm(2,j) && ...
        chi2_norm(2,j)<=chi2_norm(3,j)
        chi2_norm(4,j)=1;
        % Si le test est concluant, on a 1, sinon, 0.
    end
end

% Export des variables
Chi=chi2_norm;
Nor=param_norm;
Val=param_val;
Esp=esper;
Den=param_den;
Rep=param_rep;
```

### A.b Matrice de rotation

L'algorithme MATLAB qui suit est une fonction qui permet de calculer la matrice de rotation à partir des angles en radian selon chacun des axes et selon la convention d'ordre de multiplication des matrices faite au paragraphe 3.2.2.

```
function [R] = matrot(tx,ty,tz)

% Fonction permettant de calculer la matrice de rotation 3D a partir des
% trois angles des rotations elementaires selon chaque axe.
% R = Rz(tz) x Ry(ty) x Rx(tx)
% | cos(ty)*cos(tz) A B |
% R = | -cos(ty)*sin(tz) C D |
% | sin(ty) -sin(tx)*cos(ty) cos(tx)*cos(ty) |

Rx=eye(3,3);
Ry=eye(3,3);
Rz=eye(3,3);

Rx(2,2)=cos(tx);
Rx(3,3)=Rx(2,2);
Rx(2,3)=sin(tx);
Rx(3,2)=-Rx(2,3);

Ry(3,3)=cos(ty);
Ry(1,1)=Ry(3,3);
Ry(3,1)=sin(ty);
Ry(1,3)=-Ry(3,1);

Rz(1,1)=cos(tz);
Rz(2,2)=Rz(1,1);
Rz(1,2)=sin(tz);
Rz(2,1)=-Rz(1,2);

R=Rz*Ry*Rx;
```

## A.c Angles d'une matrice de rotation

L'algorithme MatLab qui suit est une fonction qui permet de déduire les trois angles d'une matrice de rotation, selon la convention sur l'ordre de multiplication des matrices faite au paragraphe 3.2.2. Cette fonction correspond à l'inverse de la précédente.

```
function theta=invmatrot(R,b)

% Fonction permettant de calculer les trois angles d'une matrice de
% rotation 3D. ty est suppose proche de b (a +/- 0.1 rad pres).
% R = Rz(tz) x Ry(ty) x Rx(tx)
% | cos(ty)*cos(tz) A B |
% R = | -cos(ty)*sin(tz) C D |
% | sin(ty) -sin(tx)*cos(ty) cos(tx)*cos(ty) |

% Parametres lies aux calculs.
epsilon=1.0e-9;
critere=0.1;

% Calcul de la rotation ty autour de l'axe des y.
ty1=mod(real(asin(R(3,1))),2*pi);
ty2=mod(real(pi-asin(R(3,1))),2*pi);
% NB : L'utilisation de la valeur réelle dans le calcul est
% introduite en raison des erreurs dues aux valeurs tronquées,
% quand les cosinus ou les sinus sont très légèrement
% supérieurs à 1.    b=mod(b,2*pi);
if b>=pi
    b=b-2*pi;
end
if ty1>=pi
    ty1=ty1-2*pi;
end
if ty2>=pi
    ty2=ty2-2*pi;
end
if abs(ty1-b)<=critere
    ty=ty1;
elseif abs(ty2-b)<=critere
    ty=ty2;
end
ty=mod(ty,2*pi);
if ty>=pi
    ty=ty-2*pi;
end

% Calcul de la rotation tx autour de l'axe des x.
tx1=mod(real(asin(-R(3,2)/cos(ty))),2*pi);
tx2=mod(real(pi-asin(-R(3,2)/cos(ty))),2*pi);
tx3=mod(real(acos(R(3,3)/cos(ty))),2*pi);
tx4=mod(real(-acos(R(3,3)/cos(ty))),2*pi);
if tx1>=pi
    tx1=tx1-2*pi;
```

## A Fonctions spéciales

---

```
end
if tx2>=pi
    tx2=tx2-2*pi ;
end
if tx3>=pi
    tx3=tx3-2*pi ;
end
if tx4>=pi
    tx4=tx4-2*pi ;
end
if abs(tx1-tx2)<=epsilon
    tx=0.5*(tx1+tx2) ;
elseif abs(tx1-tx3)<=epsilon
    tx=0.5*(tx1+tx3) ;
elseif abs(tx1-tx4)<=epsilon
    tx=0.5*(tx1+tx4) ;
elseif abs(tx2-tx3)<=epsilon
    tx=0.5*(tx2+tx3) ;
elseif abs(tx2-tx4)<=epsilon
    tx=0.5*(tx2+tx4) ;
elseif abs(tx3-tx4)<=epsilon
    tx=0.5*(tx3+tx4) ;
end
tx=mod(tx,2*pi) ;
if tx>=pi
    tx=tx-2*pi ;
end

% Calcul de la rotation tz autour de l'axe des z.
tz1=mod(real(acos(R(1,1)/cos(ty))),2*pi) ;
tz2=mod(real(-acos(R(1,1)/cos(ty))),2*pi) ;
tz3=mod(real(asin(-R(2,1)/cos(ty))),2*pi) ;
tz4=mod(real(pi-asin(-R(2,1)/cos(ty))),2*pi) ;
if tz1>=pi
    tz1=tz1-2*pi ;
end
if tz2>=pi
    tz2=tz2-2*pi ;
end
if tz3>=pi
    tz3=tz3-2*pi ;
end
if tz4>=pi
    tz4=tz4-2*pi ;
end
if abs(tz1-tz2)<=epsilon
    tz=0.5*(tz1+tz2) ;
elseif abs(tz1-tz3)<=epsilon
    tz=0.5*(tz1+tz3) ;
elseif abs(tz1-tz4)<=epsilon
    tz=0.5*(tz1+tz4) ;
elseif abs(tz2-tz3)<=epsilon
    tz=0.5*(tz2+tz3) ;
elseif abs(tz2-tz4)<=epsilon
```

## A.c Angles d'une matrice de rotation

---

```
tz=0.5*(tz2+tz4);
elseif abs(tz3-tz4)<=epsilon
    tz=0.5*(tz3+tz4);
end
tz=mod(tz,2*pi);
if tz>=pi
    tz=tz-2*pi;
end

theta=[tx;ty;tz];
```





---

# SIMULATIONS DU TT1

---

Les algorithmes des dix étapes de décomposition du MRN à l'échelle du TT1, représentées sur le diagramme 3.40 au paragraphe 3.4.4.3, ont été mis en ligne sur le serveur EDMS de documentation du CERN. Le matricule de ce document est le 1 103 806<sup>1</sup>. Pour chacune de ces étapes du calcul, un lien vers un dossier compressé au format « \*.zip » est disponible. Chaque dossier contient :

- L'algorithme MATLAB de l'étape considérée, au format *M-File*,
- Les fichiers importés nécessaires au calcul,
- Le fichier d'export du calcul.

En cliquant sur le numéro d'une des étapes qui sont décrites ci-après, le dossier compressé, stocké sur EDMS, devrait s'ouvrir.

## B.a Hyperliens

**Étape n°0** : Dans ce calcul, il s'agit de générer des lectures théoriques des capteurs HLS et WPS et des inclinomètres qui sont nécessaires à l'étape n°9 pour la compensation finale.

**Étape n°1** : Cet algorithme simule la mesure du banc de calibration absolue des capteurs WPS, à partir de vraies observations CMM LEITZ INFINITY.

**Étape n°2** : Cette étape simule la mesure des sept plaques métrologiques en invar du TT1, à partir des vraies observations CMM OLIVETTI faites au CERN.

**Étape n°3** : Dans cette partie, il s'agit de simuler la mesure du banc de calibration des inclinomètres, à partir des vraies observations CMM OLIVETTI faites au CERN.

**Étape n°4** : Cet algorithme effectue la simulation de la calibration du zéro des capteurs WPS utilisés au TT1. Les vraies observations des capteurs ont été utilisées.

**Étape n°5** : Dans ce calcul, ce sont les calibrations des zéros des capteurs HLS du TT1 qui sont simulées. Les vraies observations des capteurs ont été utilisées.

---

<sup>1</sup><https://edms.cern.ch/document/1103806/1>

## B Simulations du TT1

---

**Étape n°6** : Cette étape simule la calibration d'inclinomètres biaxiaux. Des lectures théoriques de capteurs ont été générées du fait qu'aucune observation n'était disponible.

**Étape n°7** : À partir de la compensation des mesures topométriques du TT1 par le logiciel LGC en mode simulation, cet algorithme simule la transformation pour exprimer les coordonnées des points importés dans le repère local du TT1.

**Étape n°8** : Dans cette partie, il s'agit de calculer des valeurs approchées des paramètres de transformation des repères des plaques métrologiques vers celui du TT1. Les résultats des étapes n°2 et n°7 sont importés.

**Étape n°9** : Cet algorithme permet de calculer les valeurs finales des paramètres de transformation des plaques et ceux intervenant dans la modélisation des fils.

**Étape n°10** : À partir des paramètres de modélisation des fils obtenus à l'étape n°9, cet algorithme simule l'alignement de 283 points au TT1. Il permet de calculer les erreurs finales, notamment le rayon du cylindre qui les contient toutes, ainsi que sa distribution.

---

# Bibliographie

---

- [Artoos *et al.*, 2009] ARTOOS, K., CAPATINA, O., COLETTE, C., GUINCHARD, M., HAUVILLER, C., SYLTE, M. et BOLZON, B. (2009). Ground vibration and coherence length measurements for the clic nano-stabilization studies. *In Particles Accelerator Conference*.
- [Baird, 2007] BAIRD, S. (2007). Accelerators for pedestrians. AB note 2007-014 OP, CERN.
- [Becker, 2003] BECKER, F. (2003). *Définition d'un réseau de référence métrologique pour le positionnement d'un grand accélérateur linéaire*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- [Becker *et al.*, 2003] BECKER, F., COOSEMANS, W., PITTIN, R. et WILSON, I. (2003). An active pre-alignment system and metrology network for CLIC. CLIC note 553, CERN.
- [Becker, 2008] BECKER, M. G. (2008). RasClic : a long base, low frequency, high precision seismograph. Mémoire de D.E.A., Delft University of Technology.
- [Braun *et al.*, 2008] BRAUN, H., CORSINI, R., DELAHAYE, J. P., ROECK, A. D., DOEBERT, S., GESCHONKE, G., GRUDIEV, HAUVILLER, C., JEANNERET, B., JENSEN, E., LEFEVRE, T., PAPAPHILIPPOU, Y., RIDDONE, G., RINOLFI, L., SCHLATTER, W. D., SCHMICKLER, H., SCHULTE, D., SYRATCHEV, I., TABORELLI, M., TECKER, F., TOMÁS, R., WEISZ, S., WUNSCH, W. et FERRARI, A. (2008). CLIC 2008 parameters. CLIC note 764, CERN.
- [CERN, 2004] CERN (2004). *Infiniment CERN : Témoins de cinquante ans de recherches, 1954 - 2004*. Hurter.
- [CLIC study team, 2000] CLIC STUDY TEAM (2000). *A 3 TeV  $e^+e^-$  linear collider based on CLIC technology*. G. Guignard.
- [Cornillon et ner Løber, 2007] CORNILLON, P. A. et ner LØBER, E. M. (2007). *Régressions, théorie et applications*. Springer, collection statistiques et probabilités appliquées.
- [Dekker *et al.*, 1993] DEKKER, H., van der GRAAF, H., GROENSTEGE, H., LINDE, F., SMAN, S., STEENSMA, R., JONGKIND, B. et SMEULDERS, A.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- (1993). The RasNik/CCD 3-dimensional alignment system. Rapport technique, Nikhef, Amsterdam, Fac. voor Wiskunde & Informatica, University of Amsterdam, The Netherlands.
- [Duquenne *et al.*, 2005] DUQUENNE, F., BOTTON, S., PEYRET, F., BÉTAILLE, D. et WILLIS, P. (2005). *GPS, localisation et navigation par satellites, 2<sup>e</sup> édition revue et augmentée*. Hermes.
- [Durand, 2004] DURAND, S. (2004). Topométrie de précision. Rapport technique, École supérieure des géomètres et topographes. Cours aux élèves de troisième année.
- [Durand, 2009] DURAND, S. (2009). Topométrie de précision, module optionnel. Rapport technique, École supérieure des géomètres et topographes.
- [Eco, 1997] ECO, U. (1997). *Comment voyager avec un saumon*, chapitre Pourquoi on ne peut faire une carte à l'échelle 1, pages p. 260–270. Grasset.
- [Ellis *et al.*, 1998] ELLIS, J., KEIL, E. et ROLANDI, G. (1998). Options for future colliders at CERN. CERN TH note 98-33, CERN.
- [Glaude et Griffet, 2010] GLAUDE, D. et GRIFFET, S. (2010). Contrôle du banc de micro-triangulation. EDMS document 1102726, CERN.
- [Goldstein *et al.*, 2002] GOLDSTEIN, H., SAFKO, J. L. et POOLE, C. P. (2002). *Classical mechanics, third edition*. Addison Wesley.
- [Griffet, 2010a] GRIFFET, S. (2010a). Fiducialisation et pré-alignement, étape théorique des méthodes existantes et des performances attendues. EDMS document 1096130, CERN.
- [Griffet, 2010b] GRIFFET, S. (2010b). State of the art, literature review of fiducialization methods and pre-alignment of components on a common support. EDMS document 1096102, CERN.
- [Griffith, 1989] GRIFFITH, L. V. (1989). The Poisson line as a straight line reference. Rapport technique, Lawrence Livermore National Laboratory.
- [Herrmannsfeldt *et al.*, 1968] HERRMANNSFELDT, W. B., LEE, M. J., SPRANZA, J. J. et TRIGGER, K. R. (1968). Precision alignment using a system of large rectangular Fresnel lenses. *Applied Optics*, Volume 7, issue 6:pp. 995–1005.
- [Herty, 2009] HERTY, A. (2009). Micron precision calibration methods for alignment sensors in particle accelerators. Mémoire de D.E.A., Nottingham Trent University.
- [Hugon, 2010] HUGON, P. (2010). études des méthodes optiques et mécaniques pour le transfert du réseau géodésique en surface au réseau souterrain, dans le cadre du projet CLIC au CERN. Mémoire de D.E.A., Institut national des sciences appliquées de Strasbourg.
- [JCGM, 2008a] JCGM (2008a). évaluation des données de mesures — guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

- 
- [JCGM, 2008b] JCGM (2008b). Evaluation of measurement data — supplement 1 to the “guide to the expression of uncertainty in measurement” — propagation of distributions using a monte carlo method.
- [JCGM, 2008c] JCGM (2008c). International vocabulary of metrology — basic and general concepts and associated terms (VIM).
- [Jin, 1999] JIN, F. (1999). *Deformation and movement analysis of LEP*. Thèse de doctorat, Shandong university of science and technology, China.
- [Jones, 2000a] JONES, M. (2000a). Geodetic definition (datum parameters) of the CERN coordinate system. EDMS document 170981, CERN.
- [Jones, 2000b] JONES, M. (2000b). Spatial transformations, transformations between the geodetic and astronomical reference and coordinate systems. EDMS document 170907, CERN.
- [Jones *et al.*, 2010] JONES, M., BOEREZ, J., GUILLAUME, S., HINDERER, J., RIVERA, L. et BÜRKI, B. (2010). Latest results from the CLIC geodetic studies. *In International Workshop on Accelerators Alignment*.
- [Kasser et Egels, 2001] KASSER, M. et EGELS, Y. (2001). *Photogrammétrie numérique*. Hermès Sciences publications.
- [Kea, 2006] KEA, M. (2006). RasClic : a new seismograph. Mémoire de D.E.A., Delft University of Technology.
- [Lackner *et al.*, 2010] LACKNER, F., TOUZÉ, T., RIEGLER, W. et SCHMICKLER, H. (2010). Technical proposal : laser alignment multipoint based, design approach (lambda). Document EDMS 1066954, CERN.
- [Lawson, 1985] LAWSON, J. D. (1985). Linear collider constraints : some implications for future accelerators. CLIC note 1, CERN.
- [Linnik, 1962] LINNIK, Y. V. (1962). *Méthode des moindres carrés*. Dunod.
- [Lippitsch, 2007] LIPPITSCH, A. (2007). *A deformation analysis method for the metrological ATLAS cavern network at CERN*. Thèse de doctorat, Graz university of technology.
- [Mainaud, 1996] MAINAUD, H. (1996). *Une nouvelle approche métrologique : l'écartométrie biaxiale. Application à l'alignement des accélérateurs de particules*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- [Mainaud-Durand *et al.*, 2010] MAINAUD-DURAND, H., TOUZÉ, T., GRIFFET, S., KEMPPINEN, J. et LACKNER, F. (2010). CLIC active pre-alignment system : proposal for CDR and program for TDR. *In International Workshop on Accelerators Alignment*.
- [Marti, 2007] MARTI, U. (2007). CERN gravity field study. Rapport technique 06-14 C, Office fédéral de topographie swisstopo.
- [Mayoud, 1989] MAYOUD, M. (1989). Geodetic metrology of particle accelerators and physics equipment. *In International Workshop on Accelerators Alignment*.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [Melchior, 1966] MELCHIOR, P. (1966). *The Earth tides*. Pergamon press.
- [Pelat, 2006] PELAT, D. (2006). Bases et méthodes pour le traitement des données (bruits et signaux). Rapport technique, Observatoire de Paris, section de Meudon. Cours de Master M2 recherche en astronomie et astrophysique.
- [Pfungstner *et al.*, 2010] PFINGSTNER, J., SCHULTE, D. et HOFBAUR, M. (2010). Adaptive scheme for the CLIC orbit feedback. *In International Particle Accelerator Conference*.
- [Pugnat, 2010] PUGNAT, D. (2010). Étalonnage d'un mesureur vertical TRI-MOS 0-700. EDMS document 1072880, CERN.
- [Quesnel *et al.*, 2008] QUESNEL, J. P., MAINAUD-DURAND, H. et TOUZÉ, T. (2008). Stretched wire offset measurements : 40 years of practice of this technique at CERN. *In International Workshop on Accelerators Alignment*.
- [Riddone *et al.*, 2008] RIDDONE, G., SCHULTE, D., MAINAUD-DURAND, H., SYRATCHEV, I., WUENSCH, W., ZENNARO, R., NOUSIAINEN, R. et SAMOSHKIN, A. (2008). Technical specification for the CLIC two-beam module. *In European Particles Accelerator Conference*.
- [Ryf *et al.*, 2005] RYF, A., NEUHIERL, T. et SCHÄTTI, I. (2005). AlpTransit Saint-Gothard, les exigences imposées aux travaux topographiques sur le tronçon de Sedrun. *XYZ*, Numéro 105, 4<sup>e</sup> trimestre(105):pp. 23–28.
- [Schmid, 2010] SCHMID, M. (2010). Differential determination of vertical deflections in vacuum. Travail de semestre, printemps 2010, École polytechnique fédérale de Zürich, Suisse.
- [Schulte, 2009a] SCHULTE, D. (2009a). Beam-based alignment in the new CLIC main linac. *In Particles Accelerator Conference*.
- [Schulte, 2009b] SCHULTE, D. (2009b). Pre-alignment needs for CLIC. *In CLIC Pre-alignment workshop*.
- [Timoshenko et Young, 1937] TIMOSHENKO, D. et YOUNG, H. (1937). *Engineering mechanics : statics, Volume 2*. McGraw-Hill Book Company Inc.
- [Touzé, 2006] TOUZÉ, T. (2006). Projet WPS 500 m. Rapport technique, CERN TS-SU-MTI.
- [Touzé, 2010a] TOUZÉ, T. (2010a). Calcul des flèches de fils tendus depuis la mesure de leurs fréquences d'oscillation transversale. EDMS document 1108245, CERN.
- [Touzé, 2010b] TOUZÉ, T. (2010b). Introduction à la méthode des moindres carrés. Rapport technique, École supérieure des géomètres et topographes. Cours aux élèves de première année.
- [Touzé, 2009] TOUZÉ, T. (2009). Première modélisation des réseaux de capteurs au TT1. EDMS document 1012014, CERN.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [Touzé, 2010a] TOUZÉ, T. (2010a). Feasibility of the CLIC metrological reference network. *In International Workshop on Accelerators Alignment*.
- [Touzé, 2010b] TOUZÉ, T. (2010b). Le réseau de propagation du projet CLIC, analyse des données de l'expérience du TT1. *XYZ*, Numéro 122, 1<sup>er</sup> trimestre:p. 45–50. n° 122.
- [Touzé *et al.*, 2009] TOUZÉ, T., MAINAUD-DURAND, H. et MISSIAEN, D. (2009). Propagation error simulations concerning the CLIC active pre-alignment. *In Particles Accelerator Conference*.
- [Wiart, 2001] WIART, A. (2001). Paramètres des transformations helmert entre ITRF97 et le système CERN CGRF. Rapport technique, CERN.



