



HAL
open science

Définition d'un réseau de référence métrologique pour le positionnement d'un grand accélérateur linéaire

Freddy Becker

► To cite this version:

Freddy Becker. Définition d'un réseau de référence métrologique pour le positionnement d'un grand accélérateur linéaire. Sciences de l'ingénieur [physics]. INSA de Strasbourg, 2003. Français. NNT : . tel-00281959

HAL Id: tel-00281959

<https://theses.hal.science/tel-00281959v1>

Submitted on 26 May 2008

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.

ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE STRASBOURG

UNIVERSITE DE STRASBOURG I

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE STRASBOURG

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR – STRASBOURG

Spécialité : Topographie

Présentée par

Freddy BECKER

INSA - Équipe MAP-PAGE - UMR MAP CNRS/MCC 694

**Définition d'un réseau de référence métrologique pour le positionnement
d'un grand accélérateur linéaire**

Soutenue à l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg,
le 4 décembre 2003

Devant le jury composé de :

M. Jean-Georges SIEFFERT
M. Pierre GRUSSENMEYER
M. Hilaire LEGROS
M. François RICHARD
M. Bertrand MERMINOT
M. Williame COOSEMANS
M. Gilbert FERHAT

Directeur de Thèse
Co-Directeur de Thèse
Rapporteur interne, Président
Rapporteur externe
Rapporteur externe
Membre invité
Membre invité

Définition d'un réseau de référence métrologique pour
le positionnement d'un grand accélérateur linéaire

Freddy Becker

Table des matières

1	Etat de la recherche	11
1.1	Eléments communs aux accélérateurs linéaires de la prochaine génération . . .	11
1.1.1	Définition des tolérances d’alignement	11
1.1.2	Importance de la configuration du site d’implantation	12
1.1.3	Méthodes conventionnelles d’alignement	13
1.1.4	Equipements spéciaux de métrologie	16
1.2	Le projet TESLA	18
1.2.1	Spécifications pour l’alignement	18
1.2.2	Matérialisation de l’alignement de référence par mesures optiques . . .	19
1.2.3	Effet systématique de réfraction pour les mesures optiques	19
1.2.4	Alignement vertical par nivellement hydrostatique	19
1.2.5	Alignement horizontal par méthode des trois points	20
1.3	Le projet Final Focus Test Beam	21
1.3.1	Tolérances d’alignement à respecter	21
1.3.2	Méthodes pour l’alignement initial	22
1.3.3	Méthode pour la surveillance en continu de la position des aimants . . .	23
1.3.4	Méthode pour restituer une configuration géométrique	23
2	Présentation du projet CLIC	24
2.1	Eléments techniques généraux du projet CLIC	24
2.2	Fonctions du système d’alignement	26
2.2.1	Quantification des contraintes d’alignement	26
2.2.2	Alignement initial de l’accélérateur	27
2.2.3	Contrôle des déplacements des éléments	28
2.3	Etude du supportage mécanique des éléments de l’accélérateur	28
2.3.1	Supports mécaniques et systèmes de déplacement	28
3	Capteurs et références géométriques utilisés	33
3.1	Les écartomètres à fil	33
3.1.1	Caractéristiques du capteur	34

3.1.2	Aspects essentiels de la géométrie des fils tendus	34
3.1.3	Avantages des fils tendus	38
3.1.4	Inconvénients des fils tendus	39
3.1.5	Utilisation des fils tendus dans le système d’alignement du CLIC . .	39
3.2	Les niveaux hydrostatiques	39
3.2.1	Caractéristiques des HLS	40
3.2.2	Aspects essentiels de la géométrie des lignes hydrostatiques	40
3.3	Les inclinomètres	42
3.3.1	Caractéristiques des TMS	42
3.4	Les écartomètres optiques	43
3.4.1	Caractéristiques techniques du RasNIK	44
3.4.2	Aspects essentiels des lignes optiques	44
4	Etude des perturbations de la gravité et de leurs conséquences	45
4.1	Champ de pesanteur de référence et effets perturbateurs	45
4.1.1	Anomalies du géoïde et forme des surfaces équipotentielles	46
4.1.2	Déformations de la Terre et attraction luni-solaire	49
4.2	Répercussions des perturbations sur l’alignement du CLIC	51
4.2.1	Les déformations du sol et la ligne droite du CLIC	51
4.2.2	Effet des variations de pesanteur sur les fils	52
4.2.3	Gravité et utilisation des HLS	62
4.2.4	Utilisation des TMS	70
4.3	Synthèse des effets de la gravité	71
5	Développement d’un logiciel de calcul	72
5.1	Simulation et résolution de réseaux métrologiques surdéterminés	73
5.1.1	Grandeurs et notations	73
5.1.2	Principe de la méthode	73
5.1.3	Equations d’observations, équations de condition	74
5.1.4	Linéarisation	74
5.1.5	Notations matricielles	75
5.1.6	Détermination des inconnues du système surdéterminé	76
5.1.7	Processus itératif	77
5.1.8	Méthode de simulation	77
5.2	Méthodologie Orientée-Objet	78
5.2.1	Objets, messages et méthodes, attributs	78
5.2.2	Classes et instances, héritage	79
5.2.3	Polymorphisme	79

5.2.4	La programmation vue comme une simulation	80
5.3	Modèle objet du logiciel	81
5.3.1	Données de base	81
5.3.2	Données de calcul	83
5.3.3	Opérations de calcul	85
5.3.4	Vue globale du fonctionnement de LGC++	87
5.3.5	Eléments importants de l'implémentation du modèle	88
6	Détermination de la configuration optimale du réseau	91
6.1	Configuration du réseau de métrologie	91
6.1.1	Disposition des capteurs d'alignement	92
6.1.2	Étapes du calcul du réseau et du positionnement des éléments . . .	93
6.2	Modélisation des observations	93
6.2.1	Ecart orthogonaux par rapport à une droite	93
6.2.2	Ecart orthogonaux entre points de deux droites	96
6.2.3	Distances verticales	99
6.3	Réseaux testés	99
6.3.1	Réseau de fils. Planimétrie	100
6.3.2	Calcul combiné des fils et des poutres. Planimétrie	103
6.3.3	Réseau de fils. Altimétrie	105
6.3.4	Calcul combiné des fils et des poutres. Altimétrie	106
6.4	Réseau optimal	108
6.4.1	Décomposition du calcul	108
6.4.2	Détermination de la position des fils	108
6.4.3	Détermination de la position des poutres	109
7	Une alternative aux niveaux hydrostatiques	110
7.1	Le système d'alignement du SLAC	111
7.1.1	Principe de base du système d'alignement	111
7.1.2	La source lumineuse	113
7.1.3	Les lentilles de Fresnel	113
7.1.4	Le système de détection	115
7.1.5	Tube à vide	115
7.1.6	Mécanisme de support des lentilles	115
7.2	Améliorations possibles pour un système adapté au CLIC	117
7.2.1	Améliorations possibles pour la source lumineuse	117
7.2.2	Améliorations possibles pour la production de l'image de diffraction	118
7.2.3	Améliorations possibles pour le système de détection	118

7.3	Vers un système adapté au CLIC	118
7.3.1	Précision de positionnement par rapport à une quinzaine de kilomètres	119
7.3.2	Rattachement des éléments à aligner à la ligne optique	119

Table des figures

1.1	Effet de la courbure terrestre sur les accélérateurs circulaires et linéaires	12
1.2	Accélérateur linéaire implanté sur trois plans distincts. D'après [23].	13
1.3	Méthodes conventionnelles d'alignement d'un accélérateur	14
1.4	Positions des éléments de l'accélérateur avant lissage et courbe moyenne	16
1.5	Ecartomètre à nylon	17
1.6	Ecartomètre à fil à capteur CCD	17
1.7	Profil en long du projet TESLA	18
1.8	Niveau hydrostatique prévu pour Tesla	20
1.9	Méthode des trois points	21
1.10	Projection horizontale du projet FFTB	22
2.1	Schéma général du CLIC à 3 TeV d'énergie	25
2.2	Un module CLIC	25
2.3	Section transversale du tunnel du CLIC	26
2.4	Système de coordonnées de l'accélérateur	27
2.5	Un module CLIC sur la poutre en béton	29
2.6	Système d'articulation des poutres	31
2.7	Support des quadrupôles magnétiques	32
3.1	Système de tension d'un fil	35
3.2	Fil pesant	36
3.3	Courbure du champ de pesanteur sur 100m	36
3.4	Fil aux extrémités de hauteurs différentes	36
3.5	Principe des niveaux hydrostatiques	39
3.6	Ecart entre lignes droite et hydrostatique	41
3.7	Fin et début de lignes hydrostatiques	41
3.8	Inclinomètre bi-axial	43
3.9	Principe du système RasNIK	43
4.1	Forme des surfaces équipotentiels	47
4.2	Anomalie du géoïde	48

4.3	Profil géoïdal le long du CLIC	48
4.4	Flèche maximale de la structure du CLIC déformée par les marées	52
4.5	Portion de fil dans un champ de pesanteur non uniforme	54
4.6	Fil dans un champ de pesanteur courbe	56
4.7	Portion de fil soumis à une attraction longitudinale	60
4.8	Calcul des défauts de rectitude	63
4.9	Défauts de rectitude du profil	64
4.10	Deux HLS voisins : état de référence	65
4.11	Deux HLS voisins : déplacements du sol	65
4.12	Deux HLS voisins : déplacements de l'équipotentielle	65
4.13	Deux HLS voisins : effet total d'un potentiel de marée	66
4.14	Dispositif utilisé pour les essais avec les HLS	68
4.15	Différences HLS_1 - HLS_2 : brute et corrigée de l'effet des marées aquatique et terrestre	68
4.16	Précision des corrections apportées aux lectures HLS	70
5.1	Classes et héritage	80
5.2	Notations UML	81
5.3	Données de base	82
5.4	Relations d'héritage pour les données de base	83
5.5	Données de calcul	84
5.6	Relations d'héritage pour les données de calcul	85
5.7	Opérations de calcul	86
5.8	Fonctionnement général de LGC++	88
6.1	Recouvrement des lignes optiques	92
6.2	Recouvrement des fils	92
6.3	Ecart d'un point à une droite	94
6.4	Fil non parallèle aux surfaces mesurantes	95
6.5	Erreurs dues à l'inclinaison du fil	95
6.6	Angle de rotation du capteur autour du fil	96
6.7	Ecart entre points de deux droites	97
6.8	Réseau de fils. Planimétrie.	100
6.9	Défaut d'alignement des fils	101
6.10	Réseau de fils. Altimétrie.	105
7.1	Principe du système d'alignement du SLAC	111
7.2	Lentille de Fresnel sur son support	112
7.3	Image produite par une lentille de Fresnel	113

7.4	Motif de diffraction simple	114
7.5	Graphe produit par le système de détection	116
7.6	Pics d'intensité autres que le pic principal dans un motif de diffraction de Fresnel	119

Liste des abréviations

BPM Beam Position Monitor

CLIC Compact LInear Collider.

CTF2 CLIC Test Facility 2

DESY Deutsches Elektron SYnchrotron

FFTB Final Focus Test Beam

HLS Hydrostatic Levelling System

IUGG International Union of Geodesy and Geophysics

LEP Large Electron Positron collider

LGC Logiciel Général de Compensation

LHC Large Hadron Collider

NAG Numerical Algorithms Group

RasNIK Read Alignment System from NIKEF

SLAC Stanford Linear ACcelerator

STL Standard Template Library

TMS Tilt Meter System

UML Unified Modeling Language

WPS Wire Positioning System

Introduction

Le projet CLIC¹ mené au laboratoire européen pour la physique des particules figure parmi les plus importants projets mondiaux de grand accélérateur linéaire. Les travaux de recherche et de développement concernant ce projet ont démarré il y a plus de dix ans. Des réflexions sur l’alignement de l’accélérateur furent menées dès le début, car les tolérances spécifiées étaient supérieures d’un ordre de grandeur au moins aux meilleurs précisions atteintes jusqu’alors. Il fallait donc mettre au point des méthodes et une instrumentation nouvelles.

Nous avons intégré les résultats de toutes les études menées sur la métrologie du CLIC dans le présent travail de recherche, qui avait pour problématique principale la définition et l’optimisation d’une proposition de système d’alignement susceptible de répondre aux spécifications imposées. Les thématiques de l’étude des conditions d’utilisation des capteurs métrologiques, du développement d’un outil de simulation informatique, de l’optimisation de la configuration du réseau d’alignement et d’un scénario de fonctionnement opérationnel du système se sont dégagées.

Le premier chapitre fait l’état de la recherche sur l’alignement des futurs collisionneurs linéaires. Nous présentons les sujets de réflexion communs à tous les projets avant de présenter quelques exemples particuliers.

Cela nous permet d’ébaucher le contexte dans lequel situer le projet CLIC que nous introduisons au second chapitre. Après les principes essentiels de l’accélérateur, nous présentons les mécanismes développés pour ajuster la position des éléments à aligner. Nous identifions ensuite les tâches assignées au système d’alignement ainsi que les tolérances imposées, qui guideront notre réflexion.

Au troisième chapitre nous exposons les caractéristiques des capteurs métrologiques utilisés et nous menons la première partie de la réflexion sur les références géométriques qu’ils emploient et qui définissent les conditions de leur utilisation.

¹Compact LInear Collider

Le quatrième chapitre continue l'étude des conditions d'utilisation des capteurs en présentant nos résultats sur l'estimation des effets de la gravité et de ses anomalies. Nous verrons que des phénomènes négligeables pour les accélérateurs en service actuellement ne peuvent plus être considérés comme tels. Cette estimation des effets de la gravité nous permettra d'indiquer quelles sont les questions cruciales auxquelles des réponses devront encore être apportées avant que les capteurs soient mis en œuvre pour le CLIC.

Le cinquième chapitre présente le travail fourni pour l'élaboration d'un outil de calcul de métrologie général qui allait nous permettre d'estimer les performances des différentes configurations de réseau de métrologie imaginées. Outre la méthode de calcul utilisée, nous verrons les aspects importants de l'approche orientée-objet qui a guidé le développement de ce logiciel. Elle nous a permis d'aboutir à un outil très évolutif et donc adapté aux projets de recherche.

Le sixième chapitre est logiquement consacré à l'utilisation de cet outil et à la définition d'un réseau de métrologie susceptible de satisfaire les contraintes d'alignement du CLIC. Nous commençons par exposer la modélisation retenue pour chaque type d'observation fourni par les capteurs métrologiques retenus. Nous présentons ensuite la configuration de base sur laquelle nous nous sommes appuyés pour faire les simulations qui ont permis d'aboutir à une proposition de réseau de métrologie susceptible de permettre l'alignement du CLIC avec la précision requise.

Enfin le septième chapitre donne une ouverture vers ce que pourrait être le système d'alignement si les difficultés rencontrées avec l'utilisation de certains équipements envisagés pour l'instant s'avéraient trop grandes.

Chapitre 1

Etat de la recherche

Nous débutons cette thèse en faisant l'état de la recherche dans le domaine de la métrologie des accélérateurs linéaires, ce qui nous permettra de situer notre problématique. Nous commencerons par donner les éléments importants communs à tous les projets de recherche menés actuellement. Nous examinerons ensuite quelques-uns de ces derniers et verrons les problèmes spécifiques à chacun d'eux ainsi que les orientations choisies pour tenter de les résoudre.

1.1 Eléments communs aux accélérateurs linéaires de la prochaine génération

Plusieurs projets de grands accélérateurs linéaires sont conduits à travers le monde mettant en œuvre des techniques de physique des particules relativement différentes. Cependant des éléments communs se dégagent des études de leur système d'alignement.

Nous proposons de voir quels sont ces éléments communs et d'identifier ainsi les réflexions auxquelles se consacrent la communauté des spécialistes de la métrologie des accélérateurs. Nous commencerons par expliquer comment les tolérances d'alignement sont définies. Nous aborderons ensuite l'importance de la configuration du site d'implantation pour continuer avec les étapes du processus d'alignement qui sont déjà bien établies. Enfin nous énumérerons les différents équipements spéciaux utilisés pour assurer une rectitude de grande précision.

1.1.1 Définition des tolérances d'alignement

Auparavant, les tolérances d'alignement étaient calculées par simulations comme étant l'erreur maximale de positionnement d'un élément isolé au delà de laquelle le faisceau de particules subit une perte de luminosité importante. Dans Fischer [9], l'auteur relève deux

inexactitudes dans cette façon de procéder par rapport à ce qui se passe en réalité :

- tous les éléments, et non pas un seul, s'écartent simultanément de leur position théorique ;
- des systèmes élaborés de correction et d'ajustement de l'orbite du faisceau sont mis en œuvre pour récupérer la luminosité perdue.

Les tolérances d'alignement dans les projets de nouveaux accélérateurs sont donc maintenant définies comme étant les erreurs de placement qui rendent impossible une correction du faisceau et conduisent donc à une perte de luminosité inacceptable. Sous ces conditions il est beaucoup plus délicat d'estimer ces tolérances car cela nécessite une bonne compréhension de toutes les erreurs possibles à injecter dans une simulation ainsi qu'une idée précise de la manière dont les corrections et les ajustements de la trajectoire du faisceau vont se dérouler.

Les expériences acquises ont cependant montré que les tolérances définies de cette façon ont tendance à être plus larges d'un ordre de grandeur que celles qui sont déduites de l'erreur de positionnement d'un élément isolé.

1.1.2 Importance de la configuration du site d'implantation

Une grande partie des instruments classiques de métrologie se réfèrent à la gravité. La position du site d'implantation de l'accélérateur par rapport aux équipotentielles de la pesanteur est donc importante, comme cela est souligné dans Ruland [23]. Dans le cas d'un accélérateur circulaire construit sur un plan non incliné, tous les éléments à aligner se retrouvent pratiquement à la même altitude (fig. 1.1).

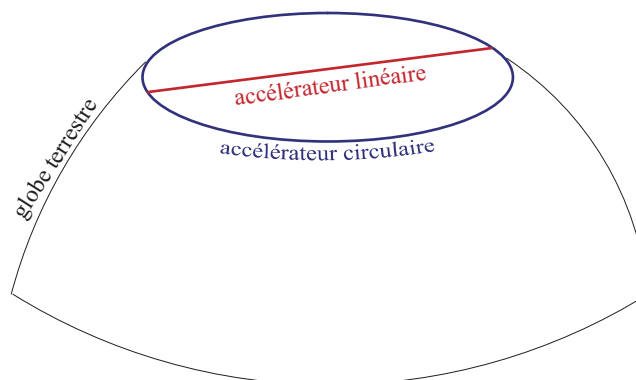


FIG. 1.1 – Effet de la courbure terrestre sur les accélérateurs circulaires et linéaires

Dans le cas d'un accélérateur linéaire, les altitudes de ses extrémités et de son milieu peuvent être sensiblement différentes. Ainsi, pour un accélérateur de longueur l implanté

comme sur la figure 1.1, la dénivelée entre son milieu et ses extrémités peut être estimée comme la flèche f d'une corde sur un cercle (équation 1.1) :

$$f = R - \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}} \quad (1.1)$$

Sur le globe terrestre de rayon $R = 6378km$, le milieu d'un accélérateur linéaire de longueur $l = 35km$ comme le CLIC présenterait donc une dénivelée de $24cm$ par rapport aux extrémités du linac.

Une des solutions possibles pour réduire les différences d'altitude consiste à implanter l'accélérateur sur plusieurs plans, comme la figure 1.2 l'illustre. Pour les éliminer complètement, il faut lui faire suivre une équipotentielle : il n'est alors plus rectiligne dans l'espace mais rectiligne par rapport à une surface de niveau.

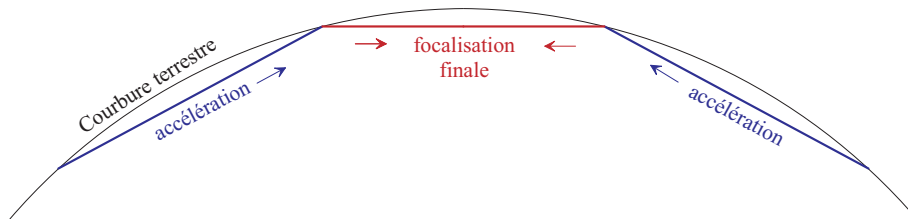


FIG. 1.2 – Accélérateur linéaire implanté sur trois plans distincts. D'après [23].

Comme la plupart des instruments classiques se réfèrent à la gravité, la solution la plus simple du point de vue de la métrologie serait d'implanter les accélérateurs linéaires le long d'une équipotentielle. Cette option est discutable pour deux raisons :

- elle rend plus délicate les calculs et la maîtrise de la trajectoire du faisceau ;
- certains équipements d'alignement spéciaux se réfèrent à des axes optiques ou des faisceaux laser qui eux sont rectilignes dans l'espace.

1.1.3 Méthodes conventionnelles d'alignement

Les projets de futurs accélérateurs linéaires prévoient tous des tolérances d'alignement plus strictes que celles des machines actuelles. L'expérience acquise avec ces dernières (Mayoud [17]) a cependant permis de développer et de maîtriser les méthodes qui permettent d'atteindre sur la position des éléments une précision relative de l'ordre du dixième de millimètre sur plus de 100m. Tous les projets prévoient de mettre en œuvre ces méthodes afin d'amener les accélérateurs jusqu'au niveau d'alignement à partir duquel des équipements spéciaux permettant de rentrer dans le domaine du micron seront utilisés.

Nous proposons donc de présenter ce processus d'alignement conventionnel qui figure dans tous les projets. Nous pouvons distinguer 6 étapes.

1.1.3.1 Réseau géodésique de surface

Après l'étude et le choix de l'emplacement de la machine, qui dans la plupart des cas se situera dans un tunnel souterrain, les travaux débutent par la mise en place d'un réseau géodésique de surface. Celui-ci est constitué de piliers géodésiques situés à proximité immédiate de chacun des puits (voir figure 1.3) d'accès à l'ouvrage souterrain et d'un certain nombre de piliers situés de façon à créer un réseau de référence bien structuré. La mesure du réseau se fera au moyen du système GPS utilisé en mode différentiel ce qui permet de garantir une précision de l'ordre du millimètre sur la position relative des piliers. Pour connaître les déviations de la verticale locale des mesures astronomiques au moyen d'une caméra zénithale sont effectuées à proximité de chaque puits.

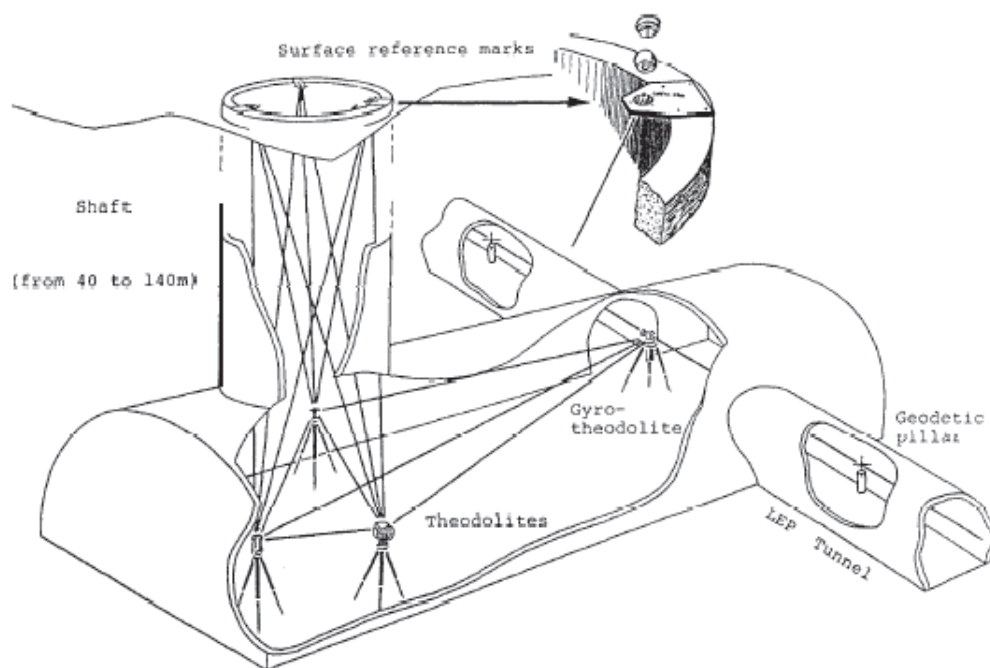


FIG. 1.3 – Méthodes conventionnelles d'alignement d'un accélérateur

1.1.3.2 Transfert du réseau de surface dans l'ouvrage souterrain

A partir du réseau de surface est mis en place un réseau secondaire, constitué de piliers, qui sont utilisés notamment pour l'implantation des puits. Une fois les puits creusés on implante par descente de verticale au bas de chacun d'eux des piliers de référence rattachés au réseau de surface (voir figure 1.3). Les descentes de verticale se font, selon la dimension et l'encombrement des puits, par triangulation et trilatération spatiale ou par fil à plomb électronique et mesure de distance verticale. Ces descentes de verticale peuvent être répétées à intervalles réguliers pour contrôler la stabilité de l'ouvrage souterrain. Elles

sont corrigées des déviations de la verticale estimées pendant l'établissement du réseau de surface,

1.1.3.3 Creusement du tunnel et réseau souterrain

A partir des points de référence de fond de puits on guide le forage de la galerie d'accès au tunnel et par la suite celui du tunnel principal. La technique utilisée est le cheminement topométrique classique : mesures d'angles, de distances et de dénivelées. Ces mesures sont appuyées par des mesures au gyroscope chercheur de nord géographique (voir figure 1.3). Au fur et à mesure de l'avancement des travaux de creusement on implante régulièrement dans les parois du tunnel des piliers de référence qui formeront avec les piliers de fond de puits le réseau topométrique souterrain. Lorsque le tunnel débouche dans la zone de puits suivante on ferme le cheminement sur les points de référence de cette zone.

Afin de déterminer avec une plus grande précision les coordonnées du réseau topométrique souterrain, toutes les mesures depuis le réseau de surface sont refaites entre les deux zones de puits. Lors de cette opération, en plus des techniques évoquées jusqu'ici, des moyens plus proches de la métrologie sont utilisées : écartométrie à fil, distance-mètres de haute précision. On estime que de cette manière la précision du réseau souterrain par rapport au réseau de surface est de $\pm 5\text{mm}$ et que la précision relative entre trois piliers souterrains consécutifs est de $\pm 1\text{mm}$.

1.1.3.4 Positionnement absolu des éléments de l'accélérateur

Le réseau topométrique souterrain est ensuite utilisé pour implanter et aligner les éléments de l'accélérateur. Plusieurs types de mesures de précision métrologique sont mises en œuvre : distances, nivellement, écartométrie et inclinométrie.

1.1.3.5 Alignement relatif des éléments

Les éléments de la machine sont positionnés individuellement lors de l'étape précédente. Or c'est surtout leur alignement relatif auquel le faisceau de particules sera sensible. On procède donc à des mesures de la position d'éléments consécutifs les uns par rapport aux autres, ce qui permet si nécessaire de les corriger et d'obtenir ainsi une position la plus proche possible de la courbe moyenne lisse de la figure 1.4.

1.1.3.6 Contrôle final

Pour finir, avant de mettre en œuvre les équipements spéciaux de métrologie que nous présentons dans la section suivante, on procède à un relevé de contrôle qui permet de vérifier que l'enchaînement d'opérations décrit ci-dessus a bien permis d'atteindre tout

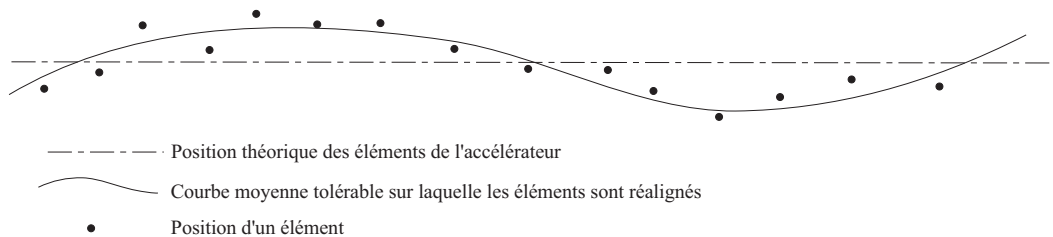


FIG. 1.4 – Positions des éléments de l'accélérateur avant lissage et courbe moyenne

au long de l'accélérateur une précision de l'ordre du dixième de millimètre sur la position relative d'éléments distants de plusieurs dizaines de mètres.

1.1.4 Equipements spéciaux de métrologie

Les projets d'accélérateurs linéaires spécifient tous des tolérances d'alignement de l'ordre du micron ou de la dizaine de microns que les méthodes conventionnelles ne permettent pas de respecter. A l'issue du processus de pré-alignement décrit dans la section précédente, tous les projets prévoient donc de recourir à des équipements spéciaux qui sont optimisés pour fournir une référence rectiligne de précision supérieure.

Nous donnerons des détails sur certains de ces équipements dans la suite de ce chapitre. Dans la présente section nous allons simplement passer en revue les catégories de dispositifs que l'on peut distinguer, selon la nature de la référence sur laquelle ils s'appuient.

1.1.4.1 Equipements utilisant une ligne de référence mécanique

La ligne de référence mécanique est un fil tendu, dont la position est détectée par un capteur.

Certains systèmes détectent cette position optiquement, au moyen par exemple d'une diode différentielle comme pour l'écartomètre Nylon (voir fig. 1.5) mis au point au CERN, ou encore à l'aide d'un capteur CCD (voir fig. 1.6).

D'autres systèmes utilisent une détection électrique, par méthode inductive ou capacitive. Cette dernière méthode est celle mise en œuvre par les écartomètres à fil prévus pour le CLIC et que nous présenterons plus en détail au chapitre 3.

1.1.4.2 Equipements utilisant une ligne de référence optique

La ligne de référence optique peut avoir différentes natures.

Il peut s'agir tout d'abord de l'axe optique d'un télescope d'alignement ou d'une lunette d'autocollimation.

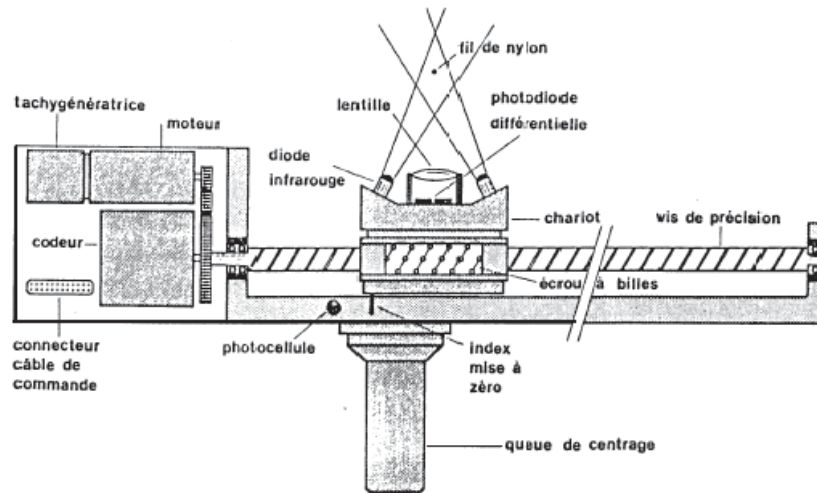


FIG. 1.5 – Ecartomètre à nylon

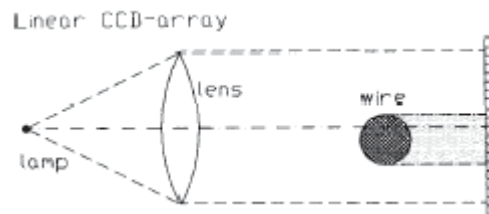


FIG. 1.6 – Ecartomètre à fil à capteur CCD

Plus fréquemment on exploite les propriétés physiques d'un faisceau laser par rapport auquel on peut se positionner de différentes manières :

- en détectant directement l'impact du laser sur un capteur ;
- en analysant une image projetée à travers une lentille (voir 3.4) ;
- par interférométrie (voir annexe 9) ;
- en analysant un diagramme de diffraction (voir 7.1.1).

1.1.4.3 Equipements utilisant la gravité comme référence

Les systèmes qui se réfèrent à la gravité sont utilisés pour le contrôle en altitude des éléments à aligner.

Les niveaux hydrostatiques, dont nous parlerons plus longuement dans le cadre du projet CLIC, permettent de faire des mesures par rapport à une surface de liquide au repos qui matérialise une équipotentielle de la pesanteur. Ces instruments sont très utiles

pour le transfert d'altitude sur de longues distances.

Les inclinomètres se réfèrent quant à eux à la verticale locale et sont destinés à mesurer l'inclinaison d'éléments par rapport à cette dernière. Nous en parlerons également plus longuement pour le cas spécifique du CLIC.

Avant d'aborder le projet CLIC dont l'alignement fait l'objet du présent travail de recherche, présentons les caractéristiques principales de certains des autres projets d'accélérateur linéaire qui sont à l'étude dans différents centres de recherche, en nous penchant bien sûr plus longuement sur leurs aspects métrologiques.

1.2 Le projet TESLA

TESLA est un projet de collisionneur linéaire en cours d'étude au centre DESY¹ de Hambourg. Sa longueur totale est d'environ 30km. L'accélérateur serait construit dans un tunnel de 6m de diamètre à environ 15m de profondeur (fig. 1.7).

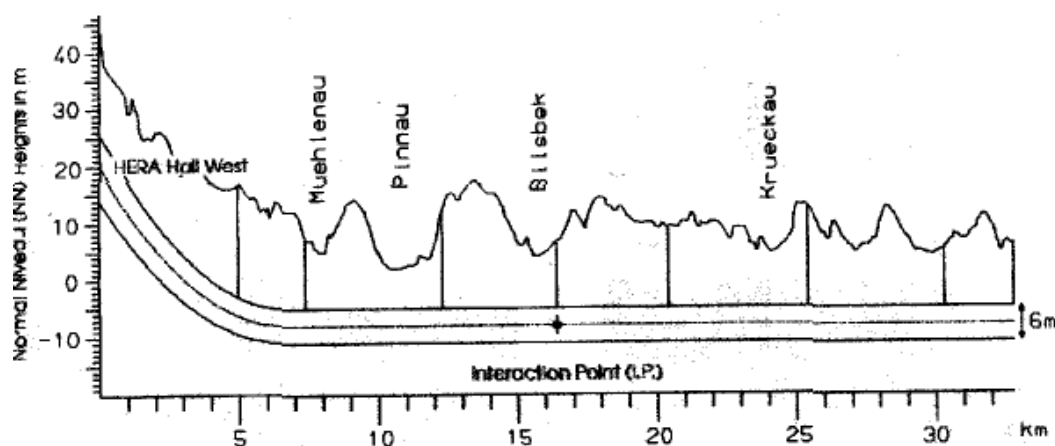


FIG. 1.7 – Profil en long du projet TESLA

Voyons quels sont les concepts essentiels pour l'alignement de cet accélérateur (Schwarz [25]).

1.2.1 Spécifications pour l'alignement

Dans le plan horizontal le tunnel suit une ligne droite. La particularité de ce projet est que dans le plan vertical, hormis sur une section de 6,5km, l'altitude est constante

¹Deutsches Elektron Synchrontron

comme on s'en aperçoit sur la figure 1.7 où les hauteurs se réfèrent au géoïde. Il est donc prévu que le tunnel suive la courbure de ce dernier.

Plusieurs lignes de faisceaux devront être alignées dans le tunnel, avec des précisions relatives sur une longueur de 576m définies comme suit dans le plan transverse au faisceau :

- $\pm 0.5\text{mm}$ horizontalement
- $\pm 0.1\text{mm}$ verticalement

Plusieurs lignes devant être alignées simultanément, il est prévu de matérialiser un alignement de référence auxquelles chacune de ces lignes sera connectée. Voyons quelles sont les méthodes prévues pour matérialiser cet alignement.

1.2.2 Matérialisation de l'alignement de référence par mesures optiques

Cette méthode prévoit de matérialiser les points de l'alignement de référence par des repères montés tous les 25 ou 50m dans la paroi du tunnel, sur lesquels des cibles peuvent être montées. L'instrument utilisé pour viser ces cibles est un tachéomètre de précision relevant des angles horizontaux, verticaux et des distances avec les précisions suivantes :

- direction horizontale : $\pm 0.2\text{mgon}$
- angle vertical : $\pm 0.2\text{mgon}$
- distance : $\pm 0.1\text{mm}$

Les calculs ont établi qu'en stationnant l'instrument en face de chaque point de référence et en le visant ainsi que trois autres points, il était possible d'atteindre les précisions demandées. Cependant ces calculs tenaient compte uniquement des erreurs accidentelles, et les erreurs systématiques abordées ci-dessous furent donc évaluées.

1.2.3 Effet systématique de réfraction pour les mesures optiques

On note généralement la présence de gradients de température le long des parois de tunnels. Or ces gradients engendrent des variations de densité de l'air desquelles résultent des phénomènes de réfraction qui courbent les lignes de visée des instruments optiques. Il a été établi qu'en présence d'un gradient de seulement $0.1^\circ\text{C}/\text{m}$, l'écart de la ligne de visée sur 600m par rapport à une ligne droite pouvait atteindre 4.5mm, ce qui dépasse largement les tolérances admises. D'autres solutions sont donc étudiées pour la matérialisation de la ligne de référence. Nous en présentons deux dans les sections suivantes.

1.2.4 Alignement vertical par nivellement hydrostatique

Les niveaux hydrostatiques, dont l'utilisation est également prévue dans le projet CLIC et que nous présentons plus en détail au chapitre 3, sont des instruments qui mesurent des

hauteurs par rapport à une surface d'eau au repos. Comme le tunnel suit le géoïde, il est possible d'installer le long de sa paroi un tube rempli d'eau qui va servir de référence verticale. Les niveaux mesurant par technique capacitive leur distance par rapport à la ligne hydrostatique avec une précision de $\pm 5\mu\text{m}$ (fig.1.8), cette technique devrait permettre d'assurer la précision relative de $\pm 0.1\text{mm}$ sur 600m demandée.

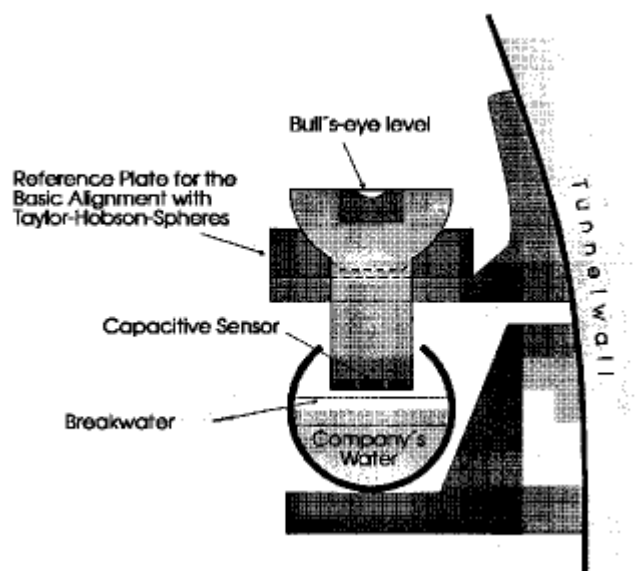


FIG. 1.8 – Niveau hydrostatique prévu pour Tesla

1.2.5 Alignement horizontal par méthode des trois points

Une méthode basée sur des mesures non-optiques est envisagée pour s'affranchir des problèmes liés à la réfraction.

Dans cette méthode des plaques sont montées dans la paroi du tunnel à intervalles réguliers de 1 ou 2m. Les écarts à trois repères consécutifs sont mesurés depuis une barre mobile (fig. 1.9) par technique capacitive, avec une précision meilleure que $\pm 1\mu\text{m}$ sur la très courte distance de 0.5mm qui sépare la barre des plaques. La barre étant rectiligne, les trois écarts permettent de déterminer l'angle horizontal que forme le point du milieu avec ses deux points voisins et on peut ainsi réaliser un cheminement polygonal en déplaçant cette barre de proche en proche.

Les calculs effectués en considérant une précision de mesure des distances de $\pm 0.1\mu\text{m}$ estiment la précision d'alignement relative à $\pm 200\mu\text{m}$ sur 600m si les plaques sont espacées de 2m. Outre la précision des mesures, la rigidité de la barre est un facteur essentiel pour atteindre l'objectif fixé, d'autant plus qu'on envisage d'utiliser des barres plus longues et donc plus flexibles. On prévoit donc de monter un fil tendu à l'intérieur de celle-ci pour

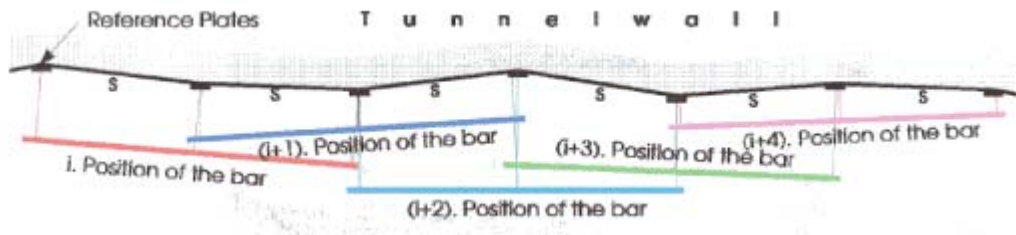


FIG. 1.9 – Méthode des trois points

contrôler sa stabilité géométrique, en mesurant l'écart du milieu de la barre par rapport à la ligne droite matérialisée par le fil qui joint ses deux extrémités.

Un banc d'essai de 26m de longueur a été monté pour tester cette méthode des trois points avec des capteurs de distance d'une précision de $\pm 1\mu\text{m}$. Les positions des plaques issues de quatre déterminations varient dans des intervalles de largeur inférieure à $50\mu\text{m}$. Ces résultats ont été validés par un contrôle avec un interféromètre laser.

1.3 Le projet Final Focus Test Beam

Ce projet réalisé au laboratoire SLAC² en Californie est déjà réalisé et a été conçu comme une étape intermédiaire vers le futur collisionneur linéaire. Son objectif principal est de focaliser de manière constante et répétée un faisceau d'électrons sur une surface de $1\mu\text{m}$ de large et de 80nm de haut.

Du point de vue de l'alignement plusieurs méthodes ont été mises au point qui ont permis d'atteindre des précisions pratiquement 10 fois supérieures à celles qui caractérisaient les projets menés jusqu'alors (Bressler et al. [2]). Nous allons voir quelles sont les tolérances à respecter, ainsi que les méthodes qui ont été développées pour l'alignement initial, la surveillance en continu de la position des éléments ainsi que pour la restitution d'une configuration géométrique donnée.

1.3.1 Tolérances d'alignement à respecter

Le FFTB³ est composé de quatre sections droites qui prolongent l'accélérateur linéaire déjà en opération au SLAC depuis les années 1970. La longueur de ces sections varie entre 28 et 43m (fig. 1.10). Les tolérances d'alignement relatif entre aimants de focalisation placés le long de chaque section sont les suivantes :

- $\pm 100\mu\text{m}$ horizontalement

²Stanford Linear ACcelerator

³Final Focus Test Beam

- $\pm 30\mu\text{m}$ verticalement

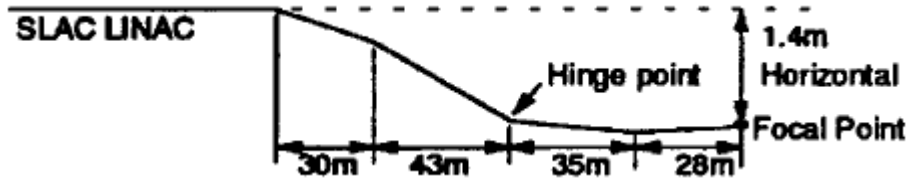


FIG. 1.10 – Projection horizontale du projet FFTB

1.3.2 Méthodes pour l’alignement initial

Les éléments à aligner pour le FFTB sont principalement des quadripôles et sextupôles magnétiques. On cherche bien sûr à positionner les centres magnétiques de ces éléments. C’est pourquoi une part importante de l’alignement initial réside dans leur fiducialisation, c’est-à-dire dans la mise en place de repères sur la structure extérieure des aimants dont la position permet de déduire celle du centre magnétique recherchée. La technique de fiducialisation développée pour le FFTB atteint une précision de $\pm 12\mu\text{m}$ dans le positionnement de ce centre.

Les instruments suivants sont prévus pour réaliser l’alignement initial :

- des théodolites ;
- un laser tracker, qui comprend un interféromètre qui poursuit un prisme rétro-réflécteur en fournissant des mesures d’angles et de distances. Les distances relatives entre deux positions du prisme sont mesurées avec une très grande précision, de l’ordre de $\pm 10\mu\text{m}$ pour une cible éloignée d’une dizaine de mètres. Cet appareil est également capable de mesurer les angles horizontaux et verticaux avec une précision de quelques secondes d’arc ;
- un niveau hydrostatique portable pour l’alignement vertical. L’instrument mesure des hauteurs par rapport à une surface d’eau au repos avec une précision de $\pm 10\mu\text{m}$;
- l’extension de la ligne laser de référence de l’accélérateur linéaire dans le prolongement duquel le FFTB se situe. Les éléments à aligner peuvent être positionnés par rapport à cette ligne de référence qui se propage dans le vide sur plus de 3km grâce à un système de lentilles de Fresnel que nous décrirons plus en détail au chapitre 6. Ce système permet de connaître la position relative horizontale et verticale de marques fiduciales placées au niveau de chaque lentille avec une précision de $\pm 10\mu\text{m}$ sur toute l’étendue du FFTB.

1.3.3 Méthode pour la surveillance en continu de la position des aimants

Les éléments magnétiques ne pouvant pas être alignés initialement puis considérés comme immobiles, il est nécessaire de les équiper d'un système qui permette une surveillance en continu de leur position afin d'ajuster cette dernière si nécessaire, y compris pendant la circulation du faisceau. La solution retenue pour le FFTB a été d'installer une double rangée de fils tendus de part et d'autre de chacune des sections droites. Tous les quadripôles et sextupôles sont munis de trois écartomètres à fil qui permettent de déterminer leur position et leur orientation angulaire par rapport aux fils, avec une précision annoncée de moins de $\pm 1\mu\text{m}$.

1.3.4 Méthode pour restituer une configuration géométrique

Une tendance actuelle dans l'alignement des accélérateurs est de chercher à tirer parti des facilités d'enregistrement des données des capteurs pour pouvoir rapidement restituer une configuration géométrique opérationnelle d'un accélérateur après un arrêt.

L'enregistrement des données des écartomètres à fil permet de reconfigurer rapidement tous les aimants d'une section droite, lesquels sont montés sur des supports mobiles qui permettent d'ajuster leur position par rapport aux fils.

Il faut cependant restituer aussi les positions des sections droites les unes par rapport aux autres. A cet effet un montage a été mis au point qui permet de rattacher les extrémités des fils à la ligne laser qui sert de référence commune tout au long de l'accélérateur.

Chapitre 2

Présentation du projet CLIC

Ce chapitre a pour but de donner les éléments essentiels à la compréhension de la problématique de cette thèse. Nous commençons donc par donner les aspects techniques généraux de l'accélérateur CLIC. Nous présentons ensuite les tâches assignées au système de métrologie en quantifiant les contraintes d'alignement. Enfin nous étudierons les supports mécaniques dont on prévoit d'équiper les différents éléments à aligner.

2.1 Eléments techniques généraux du projet CLIC

Parmi les projets de collisionneurs de particules que le CERN pourrait construire après le LHC¹ (Ellis et al. [7]), le CLIC reste un candidat très sérieux malgré les difficultés financières récentes de l'organisation. Nous présentons dans ce qui suit les principes techniques généraux nécessaires à la compréhension du fonctionnement de l'accélérateur.

Le CLIC est constitué de deux accélérateurs linéaires - linacs -, accélérant des électrons e^- pour l'un et des positons e^+ pour l'autre (fig. 2.1). Chaque linac fait 14km de long ; la focalisation finale des faisceaux avant collision se ferait sur 7km, ce qui porte la longueur de l'ensemble à 35km. L'accélérateur serait construit et exploité par étapes et l'étendue d'énergie des collisions e^\pm qui pourra être couverte va de 0.5 à 5 TeV.

Les faisceaux qui circulent dans une chambre à vide d'un diamètre de 4mm à l'intérieur de cavités en cuivre de 50cm de long, sont soumis à un champ accélérateur élevé (150 MV/m). Ce champ se caractérise par une fréquence de 30GHz qui est la fréquence maximale que permet actuellement la technologie de fabrication des cavités conductrices.

Le champ accélérateur résulte du procédé novateur appelé *TBA* (Two Beam Acceleration) qui a été développé pour le CLIC (Schnell [24]), et qui est illustré par la figure 2.2. La puissance radiofréquence 30GHz est produite en utilisant un autre faisceau d'électrons générateur de puissance (appelé Drive Beam) à courant élevé, qui est décéléré dans des

¹Large Hadron Collider

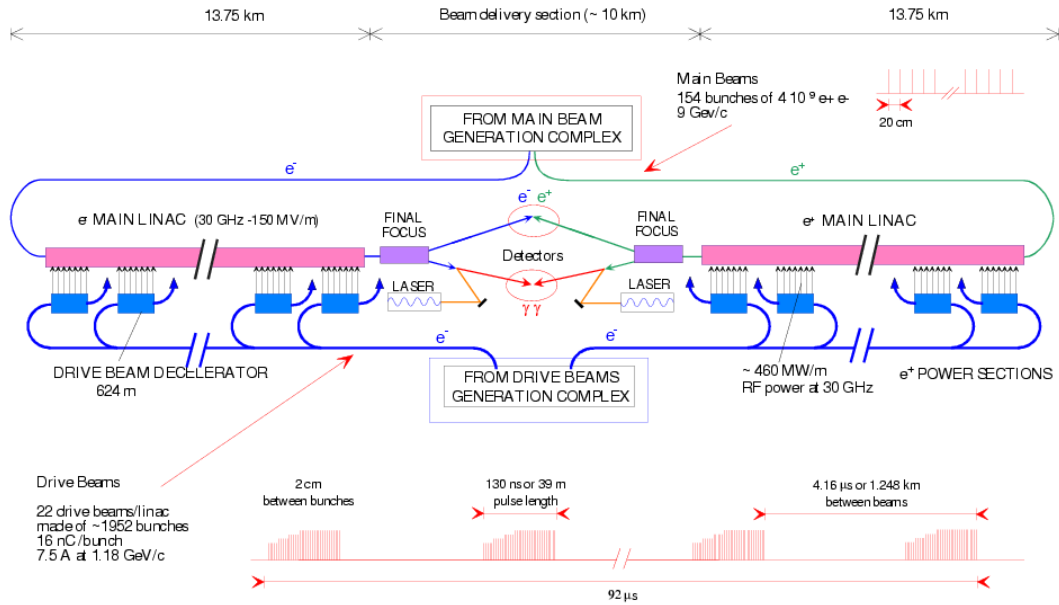


FIG. 2.1 – Schéma général du CLIC à 3 TeV d'énergie

cavités passives. A travers des structures de transfert, l'énergie issue de cette décélération est alors amenée sous forme de micro-ondes aux structures accélératrices du faisceau principal (Main Beam). L'ensemble des éléments présentés sur la figure 2.2 constitue ce qu'on appelle un module CLIC. Tout l'accélérateur est en fait constitué d'une juxtaposition de tels modules.

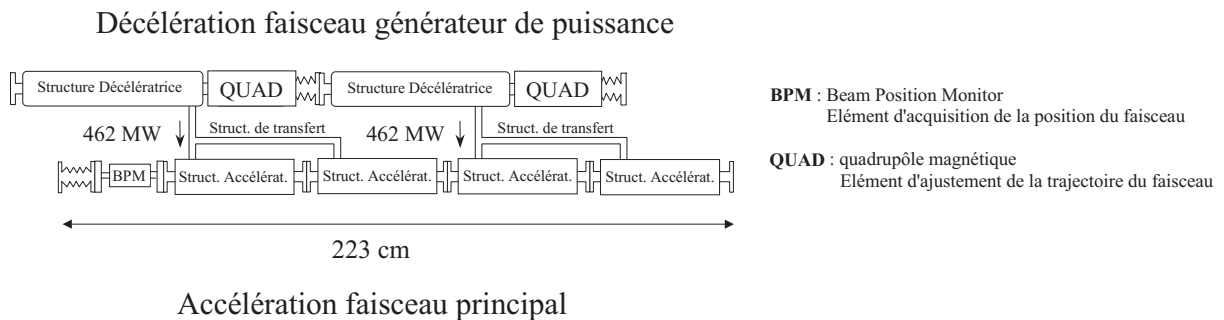


FIG. 2.2 – Un module CLIC

Comme l'illustre la figure 2.1, ce n'est pas un seul mais plusieurs faisceaux générateurs de puissance qui sont employés pour alimenter les deux linacs principaux. Chacun de ces faisceaux dessert une portion d'une longueur fixe qu'on appelle un super-module CLIC. Ainsi, dans la configuration prévue pour 3 TeV (Delahaye et al. [6]), chaque linac principal serait équipé de 21470 sections accélératrices et alimenté en puissance radio-fréquence par 22 faisceaux générateurs de puissance desservant chacun un super-module CLIC d'une

longueur de 624m.

Le complexe de génération des faisceaux générateurs de puissance est conçu de telle sorte que des faisceaux de caractéristiques identiques sont distribués à toutes les structures décélétratrices (fig. 2.1). Cela fait du CLIC un accélérateur modulable qui pourra être construit par étapes : la montée en énergie est obtenue en rallongeant le linac principal et en rajoutant les équipements générateurs de puissance correspondants. L'encombrement réduit de tout l'ensemble permet de l'héberger dans un unique tunnel aux dimensions modestes (fig. 2.3), ce qui constitue un avantage certain au niveau de la complexité et du coût des travaux de génie civil.

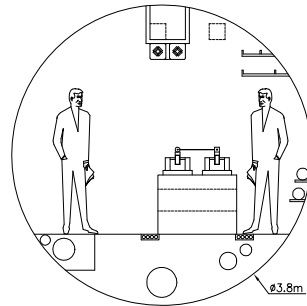


FIG. 2.3 – Section transversale du tunnel du CLIC

Les paramètres définis pour cette machine ont été établis sur la base de niveaux de performances qui sont à la limite de ce qui est réalisable actuellement dans de nombreux domaines.

Maintenant que nous avons donné les éléments nécessaires à la compréhension générale du fonctionnement de l'accélérateur, nous pouvons nous pencher sur les contraintes d'alignement et les tâches à remplir par le système d'alignement, qui constituent le fondement de ce travail de recherche.

2.2 Fonctions du système d'alignement

Voyons quelle est la précision d'alignement requise pour le CLIC, et comment le réseau métrologique peut être utilisé pour parvenir à cet alignement.

2.2.1 Quantification des contraintes d'alignement

Afin de pouvoir réaliser les expériences de physique pour lesquelles le CLIC est conçu, les paramètres physiques des deux faisceaux délivrés au point d'interaction doivent être maîtrisés. Or certains de ces paramètres se dégradent lorsque les éléments de l'accélérateur ne sont pas parfaitement alignés, ce qui est évidemment toujours le cas. Les physiciens

responsables de l'étude du faisceau du CLIC ont donc défini des contraintes d'alignement des éléments de l'accélérateur qui ont pour but de limiter la dégradation de la qualité du faisceau à des valeurs raisonnables.

Le système d'alignement que cette thèse a pour but de définir vise justement à satisfaire ces contraintes, en permettant l'alignement selon une ligne droite de chacun des deux linacs de 14km de long qui composent l'accélérateur. La précision d'alignement nécessaire est pour l'instant estimée à $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m selon les axes X et Z (fig. 2.4). Cela veut dire que pour tout segment de l'accélérateur de 200m de long, la moyenne quadratique des écarts des éléments du segment par rapport à la droite joignant les extrémités de ce dernier ne doit pas dépasser $\pm 10\mu\text{m}$ selon X ou Z.

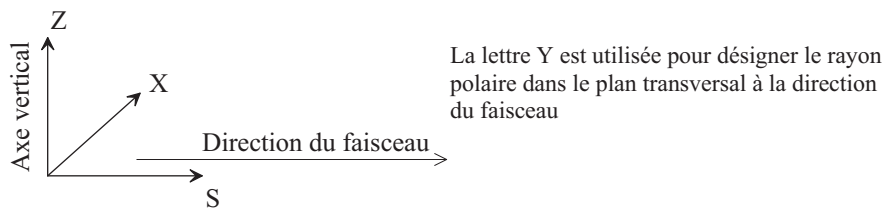


FIG. 2.4 – Système de coordonnées de l'accélérateur

A ce niveau de précision les mouvements du sol, naturels ou induits par l'activité humaine, modifient de manière significative la position des éléments. C'est pourquoi ces derniers sont équipés d'un système de supportage actif que nous décrirons en 2.3, et qui permet d'ajuster continuellement leur position. Les ajustements apportés sont quantifiés en se référant au réseau de métrologie qui devra donc être permanent.

Distinguons clairement ci-dessous les deux phases durant lesquelles le système d'alignement est utilisé.

2.2.2 Alignement initial de l'accélérateur

Des méthodes classiques de géodésie et de topométrie souterraine, analogues à celles utilisées pour mettre en place les accélérateurs déjà existants (voir 1.1.3), seront employées pour réaliser le pré-alignement du CLIC. On estime qu'à l'issue de ces opérations le positionnement relatif d'éléments distants de 200m aura une précision de quelques dixièmes de millimètres.

L'accélérateur doit alors être aligné initialement avec une précision radiale de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m pour permettre l'injection d'un premier faisceau. Le système d'alignement que nous visons à définir est utilisé durant cette phase pour calculer les positions de tous les éléments et les corriger afin d'atteindre un alignement initial satisfaisant.

Une fois que le faisceau circule, le système d'alignement n'est plus utilisé pour calculer

continuellement la position des éléments mais pour évaluer les déplacements qu'on fait subir à ces derniers.

2.2.3 Contrôle des déplacements des éléments

Lorsque le faisceau circule les détecteurs BPM² visibles sur la figure 2.2 permettent de mesurer directement sa position dans les chambres à vide. Cette information est alors utilisée dans une méthode de correction de la trajectoire en plusieurs étapes (D'Amico et Guignard [5]), qui nécessite de déplacer certains éléments comme par exemple les quadripôles.

Les ordres correspondants aux déplacements sont transmis aux actionneurs chargés du mouvement (voir 2.3). Les capteurs du système d'alignement seront utilisés pour quantifier ces déplacements d'une précision sub-micrométrique, en faisant des mesures par rapport aux références géométriques dont la position aura été calculée pendant la phase d'alignement initial. A ce stade cette position calculée n'est cependant pas utilisée, puisqu'on préfère pour une meilleure vitesse d'exécution faire simplement une succession de déplacement relatifs sub-micrométriques par rapport à ces références.

2.3 Etude du supportage mécanique des éléments de l'accélérateur

Nous allons décrire les supports sur lesquels sont montés les différents constituants du CLIC devant être alignés. Cette description comprend notamment celle des mécanismes qui permettent de déplacer ces éléments et qui sont primordiaux puisque sollicités en permanence pendant le fonctionnement de l'accélérateur.

2.3.1 Supports mécaniques et systèmes de déplacement

L'accélérateur, qui ne peut pas être monté à même le sol pour des raisons de d'accessibilité lors des opérations de maintenance, est monté sur un poutre en béton continue et solidaire du radier du tunnel. Cela permet de réduire l'amplification des vibrations du sol de façon significative par rapport à un montage mécanique composé de pièces nombreuses. Le bloc en béton offre aussi l'avantage de pouvoir y aménager des emplacements où abriter l'électronique d'acquisition et de commande des radiations émises durant le fonctionnement de l'accélérateur.

Les cavités accélératrices et décélératrices ainsi que les BPM sont fixés sur des vés métalliques montés sur des poutres creuses en carbure de silicium. Chaque module CLIC

²Beam Position Monitor

(fig. 2.2) est monté sur deux poutres parallèles, l'une dédiée aux éléments du faisceau générateur de puissance, l'autre à ceux du faisceau principal. Un module et la portion de poutre en béton correspondante sont présentés sur la figure 2.5.

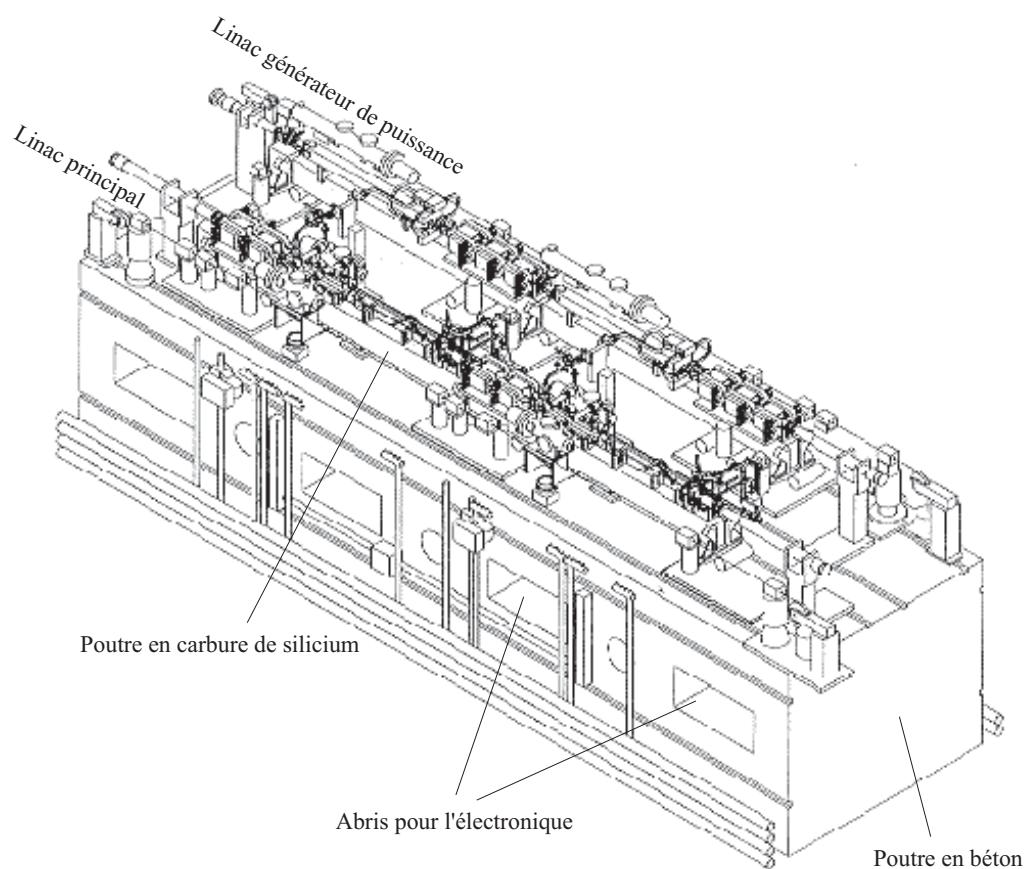


FIG. 2.5 – Un module CLIC sur la poutre en béton

Les poutres ont les caractéristiques suivantes :

matériau	carbure de silicium
longueur	2.23m
section	$0.06 \times 0.12\text{m}$
épaisseur	7.5mm
module d'élasticité	2100 daN/mm^2
densité	2.65g/cm^3
coefficient de dilatation	$4.8 \cdot 10^{-6}$
poids	8kg

Elles ont une rigidité supérieure aux poutres en acier de même capacité de charge, et une moins grande sensibilité aux gradients thermiques. Les vés sont pré-alignés en usine avec une précision d'alignement le long d'une poutre de $\pm 3\mu\text{m}$. Initialement les vés étaient

collés sur la poutre ce qui permettait d'utiliser un gabarit en marbre pour leur alignement et offrait une solution rapide et économique pour cette opération. Malheureusement la tenue aux radiations de la colle n'était pas satisfaisante et c'est pourquoi les poutres du banc d'essai CTF2³ sont équipées de vés fixés et alignés par un procédé plus fastidieux et coûteux d'implants mécaniques. Cependant les progrès récents dans la mise au point de colles résistantes aux radiations devraient permettre de revenir à la solution initiale préférable.

La position des quadrupôles magnétiques, qui alternent avec les cavités tout au long des linacs selon un schéma défini, doit aussi être ajustable. Ces éléments de contrôle de la trajectoire du faisceau sont montés sur des supports métalliques indépendants des poutres en carbure de silicium et directement reliés au socle en béton.

Les poutres sont reliées entre elles par des supports articulés. Nous allons décrire plus précisément le mécanisme d'articulation des poutres puisque c'est lui qui est actionné pour réaliser les opérations d'alignement. Nous décrirons ensuite également le mécanisme de déplacement du support des éléments magnétiques.

2.3.1.1 Système d'articulation des poutres

Le système d'articulation des poutres (Poirier [21]; Coosemans, Wilson, et Poirier [4]) est conçu de manière à empêcher tout déplacement linéaire d'une poutre par rapport à l'autre et de rendre possibles uniquement des mouvements angulaires.

Les extrémités de deux poutres adjacentes reposent sur un berceau commun. L'une des poutres est solidaire du berceau alors que l'autre y est reliée par l'intermédiaire de deux biellettes réglables (fig. 2.6). Les points d'attache de ces biellettes sont des rotules qui permettent des déplacements angulaires quelconques et engendrent des frottements minimaux.

Le berceau est mû grâce à trois actionneurs qui sont des moteurs pas à pas micrométriques d'une résolution de $0.1\mu\text{m}$ entraînant une vis micrométrique par l'intermédiaire d'un réducteur. Deux d'entre eux agissent suivant l'axe vertical : ils permettent de déplacer selon l'axe Z (fig. 2.4) le point d'articulation des poutres et contrôlent également la rotation de la poutre mobile par rapport au berceau autour de l'axe longitudinal S. Le troisième actionneur est placé dans un plan horizontal et permet de déplacer le point d'articulation selon l'axe transversal X. Le montage est fait de telle manière que les actionneurs soient continuellement en rattrapage de jeu : le poids du berceau comprime axialement les actionneurs verticaux, et ces derniers sont inclinés de telle sorte que l'actionneur horizontal soit lui aussi toujours comprimé. Une butée micrométrique réglable empêche le mouvement selon S de la poutre mobile qui par le montage a tendance à

³CLIC Test Facility 2

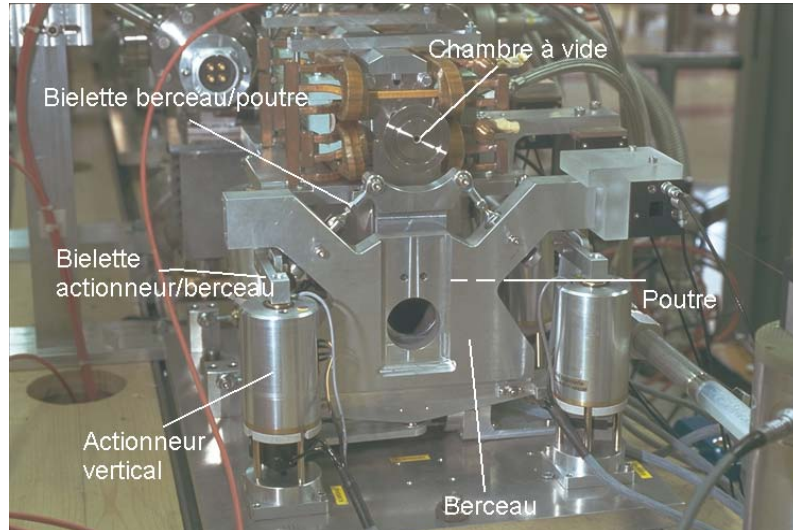


FIG. 2.6 – Système d'articulation des poutres

s'écarter du berceau, et permet le réglage de l'écart longitudinal entre les poutres.

Comme on peut le voir sur la figure 2.6, les actionneurs agissent sur le berceau par l'intermédiaire de biellettes. Cela présente l'inconvénient d'engendrer dans le corps des actionneurs des efforts qui ne sont pas axiaux et qui réduisent ainsi leur capacité en charge. Les prochains montages des articulations de poutres devraient remédier à cela et mettre en œuvre des actionneurs agissant directement sur le berceau, soumis à des charges purement axiales. Par ailleurs il s'est avéré que les poutres pouvaient aussi avoir tendance à se rapprocher en raison de différences de pression au niveau de la jonction entre 2 chambres à vides de diamètres différents. L'écart longitudinal entre deux poutres doit donc être contrôlé dans les deux sens (pour l'instant seul l'éloignement est contrôlé) et c'est pourquoi on envisage de remplacer la butée micrométrique par une biellette réglable.

2.3.1.2 Support des quadripôles magnétiques

Les quadripôles sont montés sur des plaques métalliques mues par cinq actionneurs micrométriques aux caractéristiques comparables à ceux utilisés pour les poutres (fig. 2.7). Les trois actionneurs verticaux, comprimés par le poids de la plateforme, ont une double inclinaison :

- longitudinale, qui amène constamment le montage en appui sur une butée micrométrique qui limite le mouvement selon S ;
- transversale, qui a pour effet de mettre en compression et donc en rattrapage de jeu constant les deux actionneurs horizontaux.

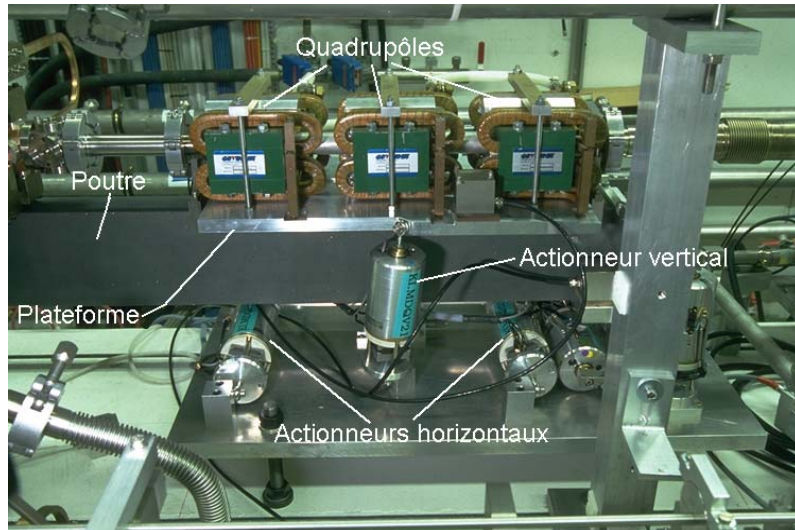


FIG. 2.7 – Support des quadrupôles magnétiques

Notons que le développement de ces mécanismes, bien qu'il ne soit pas encore achevé, est à un stade déjà avancé. En effet les montages décrits sont utilisés avec succès sur le banc d'essai CTF2 (voir annexe 7) et permettent effectivement d'effectuer les déplacements au niveau de précision requis.

Nous venons donc de voir que des dispositifs ont été conçus avec succès qui permettent de faire subir aux éléments de l'accélérateur des déplacements d'une finesse compatible avec la précision avec laquelle ils devront être positionnés. Nous allons donc nous pencher dans le chapitre suivant sur les constituants du réseau de métrologie qui devront permettre de quantifier ces déplacements.

Chapitre 3

Capteurs et références géométriques utilisés

Nous avons présenté au chapitre précédent le système qui permet de faire effectuer aux éléments de l'accélérateur des déplacements sub-micrométriques. Ce système n'est efficace que s'il est utilisé conjointement avec un réseau métrologique qui remplit deux fonctions :

- permettre d'évaluer les corrections à apporter à la position de chaque élément pour arriver à un alignement initial acceptable ;
- permettre de vérifier que chaque élément est bien déplacé de la quantité souhaitée lors de la circulation du faisceau.

Dans ce chapitre nous allons donc aborder les premiers aspects du réseau métrologique que cette recherche avait pour but de définir. Nous le ferons en présentant les différents capteurs mis en œuvre et en exposant les caractéristiques essentielles des références géométriques auxquelles chacun d'entre eux se réfère. Tous les systèmes que nous utilisons sont résistants aux radiations et sont capables d'opérer dans le champ de fuite des éléments magnétiques.

Il est important de noter que pour clarifier notre exposé et en distinguer les points importants, nous considérons tout au long de ce chapitre que le champ de pesanteur est uniforme et sphérique. Ce n'est qu'au chapitre suivant que nous verrons les aspects qui résultent du fait que la gravité réelle ne répond pas à ce modèle simplifié.

3.1 Les écartomètres à fil

Les écartomètres à fil, encore appelés WPS¹, mesurent par une technique capacitive (Mainaud [15]) des écarts par rapport à un fil tendu utilisé comme référence géométrique.

¹Wire Positioning System

3.1.1 Caractéristiques du capteur

Les capteurs, de forme parallélépipédique, mesurent des écarts selon deux directions perpendiculaires définies par deux paires d'électrodes qui entourent le fil. Ils ne comprennent aucun composant électronique, tout l'équipement de conditionnement du signal mesuré étant déporté. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques du capteur WPS	
Dimensions	$4.5 \times 4.5 \times 70$ mm
Etendue de mesure	± 5 mm
Bande passante	0-10 Hz
Résolution	$0.1 \mu\text{m}$
Répétabilité	$\pm 1 \mu\text{m}$
Précision absolue après linéarisation	$\pm 1 \mu\text{m}$
Signal de sortie par axe de mesure (proportionnel à la distance)	0-10 volts

Bien entendu ces capteurs ne peuvent être utilisés intelligemment et au niveau de précision requis qu'en ayant une bonne connaissance des fils auxquels ils se réfèrent.

3.1.2 Aspects essentiels de la géométrie des fils tendus

Les fils utilisés avec les WPS sont constitués de fibres de carbone maintenues dans une forme cylindrique par une gaine en fils de polyetheretherecetone tissés. Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques du fil	
Diamètre apparent	0,3 mm
Poids linéaire	280 gr/km
Coefficient de dilatation	10^{-6}
Limite de rupture	~ 65 daN
Masse du contrepois	entre 15 et 20 kg
Précision du système de tension	$\pm 10^{-5}$ N

La tension est un des paramètres desquels dépend la géométrie d'un fil et il est important de la connaître précisément. Un système comme celui de la figure 3.1 permet à travers une poulie à couteau de transmettre la tension résultant d'un contrepois avec une sensibilité de $\pm 10^{-5} N$.

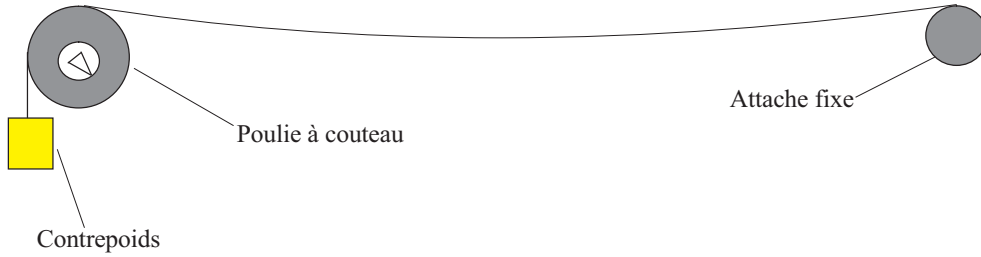


FIG. 3.1 – Système de tension d'un fil

Les fréquences propres transversale et longitudinale, notées respectivement F_t et F_l , sont données par les équations 3.1 et 3.2.

$$F_t = \frac{1}{2rl} \cdot \sqrt{\frac{p}{\pi d}} \quad (3.1)$$

$$F_l = F_t \cdot \sqrt{\frac{l}{a}} \quad (3.2)$$

Où : r est le rayon du fil

l est la longueur du fil

p est la tension appliquée au fil

d est la masse volumique du fil

a est l'allongement du fil sous p

Avec les caractéristiques présentées au chapitre 3, un fil de 100m soumis à une tension de 20kg a ainsi une fréquence propre transversale d'environ 4Hz. C'est un paramètre important à prendre en compte au moment de choisir la fréquence d'acquisition des mesures de WPS.

3.1.2.1 Equation dans le plan vertical

Le fil adopte sous l'effet de la gravité une forme de chaînette dans le plan vertical. Son équation et ses propriétés sont décrites dans Favre [8] et Merrit [20]. Dans le repère de la figure 3.2, l'équation de la chaînette est :

$$z = \frac{H}{q} \left(\operatorname{ch}\left(\frac{qx}{H}\right) - 1 \right) \quad (3.3a)$$

Où : H est la tension appliquée au fil

q est le poids linéaire du fil

Il faut souligner ici qu'en réalité le champ de pesanteur n'est pas rectiligne et uniforme comme sur la figure 3.2. Pour une distance de 100m, la flèche d'une équipotentielle par

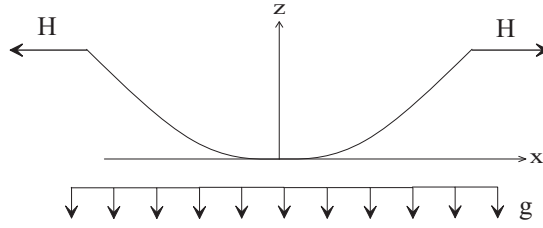


FIG. 3.2 – Fil pesant

rapport à un axe rectiligne est d'environ $0.2mm$ (fig. 3.3). Nous étudierons dans la section 4.2.2.2 l'influence de ce phénomène sur l'équation du fil.

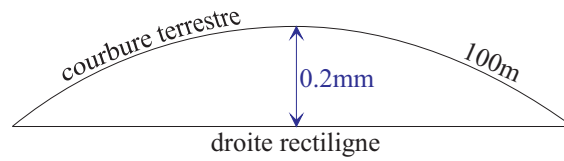


FIG. 3.3 – Courbure du champ de pesanteur sur 100m

Dans Mainaud [15], il est établi qu'étant donné les caractéristiques du fil utilisé pour le CLIC, une très bonne approximation de l'équation 3.3a est donnée par :

$$z = A(x) = \frac{qx^2}{2H} \quad (3.3b)$$

Pour un fil de $100m$ tendu à $20kg$ ayant les caractéristiques citées précédemment, la flèche est de $1.8cm$.

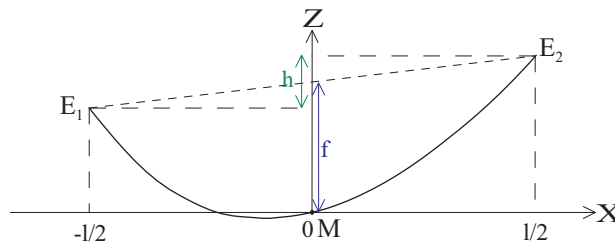


FIG. 3.4 – Fil aux extrémités de hauteurs différentes

L'équation 3.3b correspond au cas où les extrémités du fil sont à la même hauteur. Dans le cas plus général où cette hauteur est différente, l'équation dans le repère de la figure 3.4, avec les notations de cette dernière, est la suivante (Merrit [20]) :

$$Z = \frac{4f}{l^2} \left(X + \frac{lh}{8f} \right)^2 - \frac{h^2}{16f} \quad (3.3c)$$

Où : l est la distance horizontale entre les extrémités du fil

$$h = Z_{E_2} - Z_{E_1}$$

$$f = (Z_{E_2} - Z_{E_1})/2 - Z_M$$

Le paramètre f peut s'exprimer en fonction de la tension H et du poids linéaire q du fil. En effet on a :

$$\frac{H}{q} = \frac{l^2}{8f} \quad (3.3d)$$

L'équation 3.3c devient alors :

$$Z = \frac{q}{2H} \left(S + \frac{Hh}{ql} \right)^2 - \frac{Hh^2}{2ql^2} \quad (3.3e)$$

Voyons quelle est la sensibilité verticale du fil aux différents paramètres dont dépend la forme qu'il adopte ce qui peut nous permettre de déterminer si l'une des équations 3.3c ou 3.3e est préférable à l'autre. Pour les applications numériques nous avons considéré un fil de $100m$ de long tendu à $20kg$.

Influence de la longueur du fil Le fil est peu sensible aux variations de la longueur l puisqu'il faut que celle-ci varie de $1.4mm$ pour que la flèche varie de $1\mu m$. Dans notre cas l reste fixe et sera connue avec la précision requise.

Influence de la tension du fil La tension du fil doit varier de $1.1g$ pour que la flèche varie de $1\mu m$. Ce paramètre a donc peu d'influence sur le fil étant donné que le système de tension a une sensibilité de $\pm 10^{-5}N$.

Influence de la masse linéaire du fil La forme du fil est très sensible à la masse linéaire. En effet la flèche varie de $1\mu m$ pour une variation de seulement $1.6 \cdot 10^{-5}g \cdot m^{-1}$ de q . Il est très délicat de connaître la masse linéaire avec cette précision, et il est donc préférable dans la mesure du possible de ne pas utiliser ce paramètre dans l'expression de la forme du fil.

Influence de la détermination des paramètres h et f h et f sont des dénivelées qui doivent être mesurées. La sensibilité de la connaissance verticale du fil à la précision avec laquelle sont faites ces mesures est indiquée dans le tableau ci-dessous. L'incertitude sur la position du fil augmente lorsqu'on s'éloigne de l'origine du repère dans lequel on exprime son équation, que cette origine soit le milieu ou une des extrémités du fil.

Précision d'une mesure de h ou f	Incertitude maximale sur la forme du fil
$\pm 3\mu m$	$\pm 3.4\mu m$
$\pm 4\mu m$	$\pm 4.5\mu m$
$\pm 5\mu m$	$\pm 5.7\mu m$

Il ressort de cette étude des paramètres déterminant la courbe verticale du fil qu'il est préférable, pour la détermination de la géométrie de cette dernière, de recourir à l'équation 3.3c. Cette équation présente l'avantage de ne pas faire apparaître la masse linéaire du fil, qui est trop difficile à connaître avec la précision requise.

3.1.2.2 Equation dans le plan horizontal

Lorsque la pesanteur et la tension sont les deux seules forces qui s'appliquent au fil, celui-ci suit dans le plan horizontal une ligne droite joignant ses deux extrémités.

En présence de mouvements d'air transversaux, il peut adopter également une forme de chaînette. Des essais dans le tunnel du LEP² ont révélé des vents latéraux très faibles, difficilement mesurables, qui sont en régime turbulent et auraient donc tendance à faire osciller un fil. Leur effet peut donc être annulé en ajustant le temps d'intégration de la mesure d'écart, ou plus simplement, comme nous le prévoyons, en utilisant des gaines pour abriter les fils des mouvements d'air.

L'utilisation du fil comme référence géométrique est directe dans le plan horizontal. En ce qui concerne le plan vertical, il est important de déterminer avec la plus grande précision possible les dénivelées h et f .

Faisons le bilan de quels peuvent être dans notre contexte les avantages et les inconvénients de l'utilisation des WPS, ainsi que l'emploi auquel on peut les destiner.

3.1.3 Avantages des fils tendus

Voyons les avantages de l'utilisation des fils tendus comme références géométriques :

- possibilité de mesures d'écarts de précision micrométrique dans un milieu radioactif ;
- possibilité d'utiliser simultanément un grand nombre de capteurs sur la même ligne de référence ;
- grande longueur couverte par rapport à la précision des mesures ;
- très bonne définition planimétrique, il suffit de connaître la position des deux extrémités ;
- très bonne définition verticale à condition de mesurer deux dénivelées avec suffisamment de précision.

²Large Electron Positron collider

3.1.4 Inconvénients des fils tendus

L'inconvénient majeur des fils tendus réside dans leur utilisation comme référence verticale. Les deux dénivelées permettant de déterminer l'équation de la courbe verticale doivent être mesurées et ramenées dans un repère cartésien avec la plus grande précision possible.

3.1.5 Utilisation des fils tendus dans le système d'alignement du CLIC

Les fils tendus constituent une très bonne référence géométrique bidimensionnelle couvrant une longue distance avec relativement peu d'inconnues associées. Ils conviennent donc pour constituer le réseau métrologique d'ordre supérieur utilisé lors de l'alignement initial de l'accélérateur.

De plus, on peut équiper d'écartomètres les éléments à déplacer pendant la circulation du faisceau. Une fois le réseau de fils déterminé, les mouvements peuvent ainsi facilement être contrôlés par mesure directe d'écarts au fil.

Le fil constitue donc une référence géométrique très intéressante à condition de disposer d'une autre référence précise dans la dimension verticale. Cela nous amène à l'étude des lignes hydrostatiques.

3.2 Les niveaux hydrostatiques

Un réseau de niveaux hydrostatiques, encore appelés HLS³, fonctionne selon le principe des vases communicants comme l'illustre la figure 3.5. Le réseau est constitué de pots reliés entre eux par un tube. Celui-ci est rempli d'eau et d'air qui y circulent librement. Pour s'affranchir des variations différentielles de pression atmosphérique le tube est mis à l'air libre en un seul endroit. Sur chaque pot vient s'emboîter, d'une façon étanche, un capteur qui mesure par une technique capacitive la distance qui le sépare de la surface de liquide au repos.

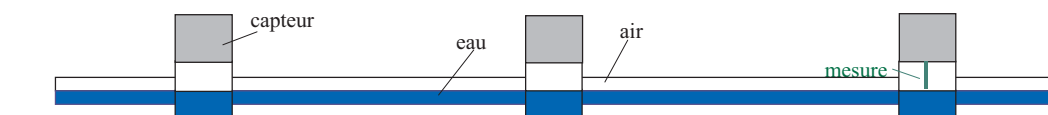


FIG. 3.5 – Principe des niveaux hydrostatiques

³Hydrostatic Levelling System

3.2.1 Caractéristiques des HLS

Chaque capteur est aussi équipé d'une sonde thermique ce qui permet de s'assurer que la température aux différents points de mesure est homogène (des différences trop importantes fausseraient les mesures, le coefficient de dilatation de l'eau à 20°C étant d'environ 10^{-4}). Les pots, les tubes et l'enveloppe du capteur sont en acier inoxydable. Pour éviter les dépôts de sel lorsqu'on est confronté à de fortes évaporations, on utilise de préférence de l'eau déminéralisée, et l'ajout d'un biocide permet d'éviter la prolifération de la flore et de faune microscopiques. L'électronique de conditionnement est, suivant le besoin, intégrée au capteur ou déportée de plusieurs mètres. Les caractéristiques techniques des HLS sont données dans le tableau ci-dessous.

Caractéristiques des capteurs HLS	
Géométrie de l'ensemble pot + capteur	Cylindrique $D \times H = 100 \times 120$ mm
Plage de mesure	0-5 mm
Bande passante	faible, liée à la forme du réseau
Résolution	$0.2 \mu\text{m}$
Répétabilité	$\pm 1 \mu\text{m}$
Précision absolue après linéarisation	$\pm 1 \mu\text{m}$
Signal de sortie proportionnel à la distance	0-10 volts
Signal de sortie proportionnel à la température	0-10 volts

Voyons quelles sont les caractéristiques essentielles de la référence géométrique utilisée par les HLS.

3.2.2 Aspects essentiels de la géométrie des lignes hydrostatiques

Les lignes hydrostatiques par rapport auxquelles les HLS mesurent des hauteurs sont des équipotentielles du champ de pesanteur. En première approximation nous considérons que celles-ci suivent une courbure sphérique ayant pour rayon celui du globe terrestre.

Nous voulons utiliser ces lignes comme références verticales pour le positionnement des éléments de l'accélérateur selon une droite rectiligne. Les trajectoires différentes suivies par une surface d'eau au repos et par une ligne droite sont illustrées sur la figure 3.6. La dénivelée à l'extrémité de la ligne droite est bien trop importante pour envisager de n'utiliser qu'une seule ligne hydrostatique tout au long d'un linac.

Afin de limiter l'écart vertical séparant les HLS du linac à des valeurs raisonnables, il sera donc nécessaire d'utiliser plusieurs lignes hydrostatiques. Un montage comme celui

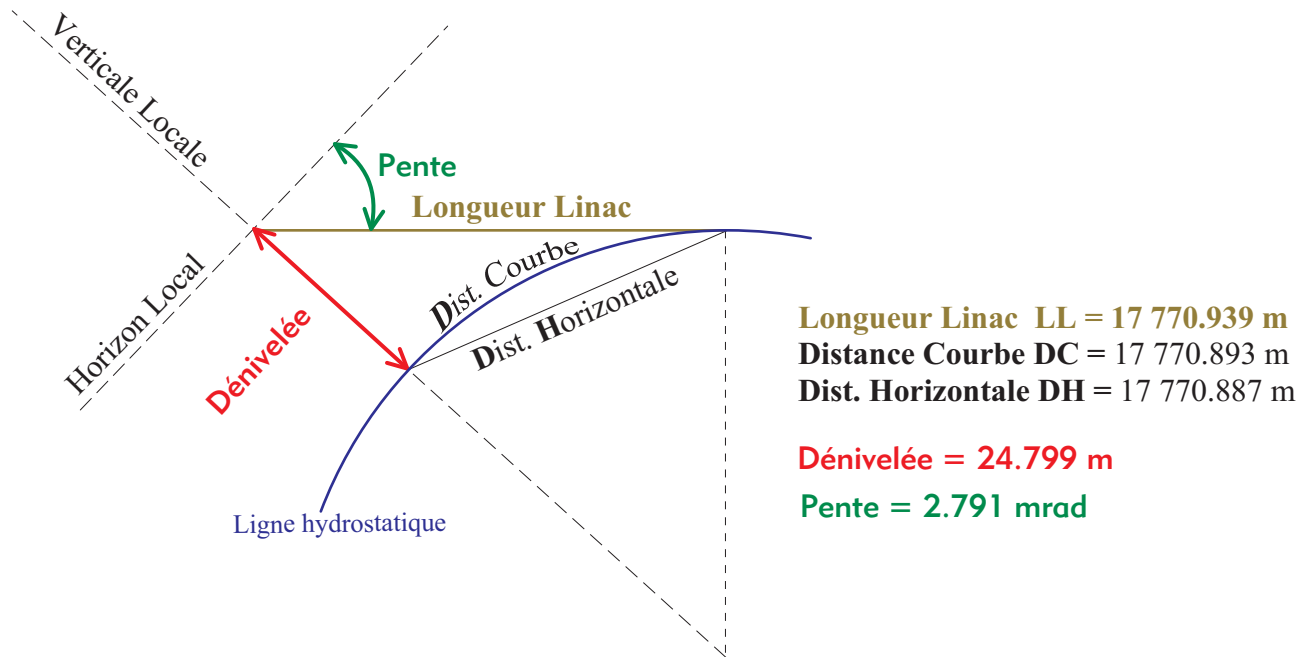


FIG. 3.6 – Ecart entre lignes droite et hydrostatique

de la figure 3.7 permet de connaître le position d'une ligne par rapport à la ligne voisine et d'assurer ainsi la continuité de la référence géométrique.

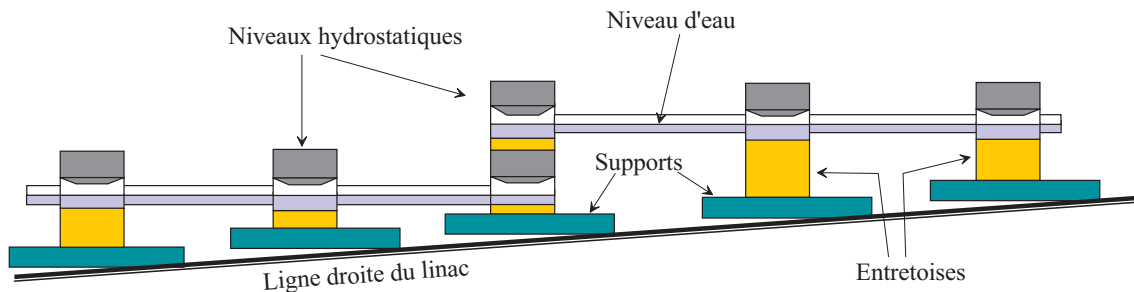


FIG. 3.7 – Fin et début de lignes hydrostatiques

3.2.2.1 Avantages des lignes hydrostatiques

Il y a dans notre cas deux avantages à l'utilisation des lignes hydrostatiques comme références géométriques :

- elles offrent la possibilité de mesures de hauteurs d'une précision micrométrique (voir chap. 2), dans un milieu radioactif ;
- la longue référence continue qu'elles constituent permet d'obtenir des dénivelées (par rapport au niveau d'eau) très précises entre points très distants si on se réfère aux longueurs des portées d'un nivellement optique.

3.2.2.2 Inconvénients des lignes hydrostatiques

L'inconvénient majeur dans l'utilisation des lignes hydrostatiques comme référence verticale réside dans le fait que le niveau d'eau suit une équipotentielle du champ de pesanteur terrestre. Il est délicat de connaître avec suffisamment de précision la géométrie de cette dernière dans un repère nous permettant de matérialiser une droite rectiligne. Nous reviendrons sur ce problème dans le chapitre suivant consacré aux perturbations de la gravité.

3.2.2.3 Utilisation des lignes hydrostatiques dans le système d'alignement du CLIC

Les lignes hydrostatiques servent de référence géométrique pour la mesure des deux dénivelées nécessaires à la détermination de la courbe verticale des fils tendus. Elles sont aussi utilisées pour des mesures de dénivelées intervenant directement dans la détermination du réseau de référence. Il s'agit par exemple de dénivelées entre fils tendus successifs ou même plus éloignés, selon la connaissance que l'on aura de la géométrie de l'équipotentielle.

3.3 Les inclinomètres

Les inclinomètres (TMS⁴) bi-axiaux que nous utilisons mesurent des inclinaisons suivant deux axes orthogonaux horizontaux, parallèles à la face inférieure du capteur. Ils utilisent la verticale locale comme référence géométrique, ce que nous aborderons plus en détail dans le chapitre 4. Nous donnerons donc simplement ici les caractéristiques des capteurs.

3.3.1 Caractéristiques des TMS

Dans l'inclinomètre une masse est maintenue en lévitation par un procédé électrostatique. Les déplacements de la masse dus aux mouvements de l'instrument sont mesurés par des capteurs capacitifs et les valeurs traduites en angles. Extérieurement l'instrument se présente sous la forme d'un cube de 40mm de côté (voir fig. 3.8) ; il n'intègre aucun composant électronique. L'électronique de conditionnement est toujours déportée de quelques mètres pour être protégée des radiations.

⁴Tilt Meter System



FIG. 3.8 – Inclinomètre bi-axial

Caractéristiques des TMS	
Plage de mesure	± 0.010 radian
Résolution	10^{-7} radian
Répétabilité	$\pm 10^{-6}$ radian
Signal de sortie par axe de mesure, proportionnel à l'angle mesuré	± 10 volts

La face inférieure du capteur, parallèle aux axes de mesure, est usinée et garantit une précision absolue par rapport à la verticale de $\pm 10^{-4}$ radian.

Etant donné sa bande passante de 0 à 100Hz et sa technique de mesure l'instrument pourrait être utilisé comme accéléromètre basse fréquence, mais il n'a pas été caractérisé comme tel.

3.4 Les écartomètres optiques

Les écartomètres optiques RasNIK⁵ que nous employons sont présentés sur la figure 3.9.

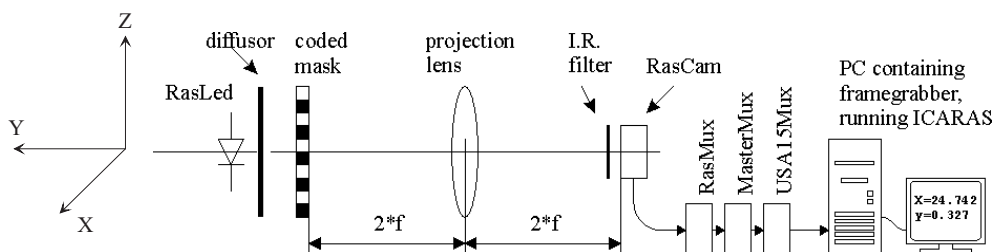


FIG. 3.9 – Principe du système RasNIK

⁵Read Alignment System from NIKEF

Un système RasNIK (van der Graaf et al. [26]) est un ensemble de deux éléments optoélectroniques et d'un élément optique. Une partie de l'image d'un masque codé, éclairé par un réseau de diode infrarouges à travers un diffuseur, est projetée sur une caméra numérique au moyen d'une lentille. Avec ce dispositif il est possible de déduire de l'image du masque l'écart de ce dernier par rapport à la droite de référence joignant la caméra et la lentille. En effet la caméra est reliée à un ordinateur qui analyse l'image, la compare à une image de référence et en déduit les écarts radiaux en (X) et (Z) (fig. 3.9) du masque. On peut également évaluer le mouvement longitudinal selon (Y) ainsi que les trois angles de rotation autour des directions (X), (Y) et (Z).

3.4.1 Caractéristiques techniques du RasNIK

Les caractéristiques techniques principales des RasNIK sont présentées dans le tableau ci-dessous. Ces capteurs offrent de plus l'avantage d'avoir un coût peu élevé.

Caractéristiques des RasNIK	
Plage de mesure	± 5 mm
Résolution	$0,1 \mu\text{m}$
Répétabilité	$\pm 1 \mu\text{m}$ pour la mesure d'écarts radiaux à 5m entre diode et récepteur

Voyons maintenant les aspects essentiels de l'utilisation d'une ligne optique comme axe de référence.

3.4.2 Aspects essentiels des lignes optiques

Nous ne reviendrons pas ici sur les lois de propagation d'un faisceau lumineux à travers une lentille mince.

L'avantage de l'utilisation des lignes optiques comme références géométriques est leur insensibilité à la gravité, qui comme nous l'avons vu complique l'utilisation des fils et des lignes hydrostatiques. Avec un système comme celui présenté au chapitre précédent, cela permet d'avoir des mesures d'écarts verticaux aussi précis que les écarts horizontaux.

L'inconvénient des lignes optiques est que la longueur sur laquelle elles peuvent être utilisées avec une précision satisfaisante est limitée par le milieu dans lequel elles se propagent. S'il s'agit de l'air, de faibles gradients de température peuvent créer des déviations déjà sensibles. Il faudrait donc opérer dans le vide pour s'affranchir de ces limitations, ce qui apporte d'autres contraintes.

Chapitre 4

Etude des perturbations de la gravité et de leurs conséquences

Afin de tirer bénéfice de la grande précision avec laquelle les capteurs font des mesures par rapport aux références géométriques présentées au chapitre 3, il est indispensable que ces dernières soient elles-mêmes définies avec une précision micrométrique dans un repère nous permettant de matérialiser une droite rectiligne comme celle d'un linac du CLIC.

Ces références étant pour la plupart sensibles à la pesanteur, il n'est plus possible dans ces conditions de considérer, comme nous l'avons fait pour des raisons de clarté de notre discours dans le chapitre précédent, que le champ de gravité terrestre est uniforme et sphérique, ou même perpendiculaire en tout point à un ellipsoïde modélisant la Terre.

Nous allons donc dans ce qui suit présenter les effets perturbateurs qui font que le champ de pesanteur n'a pas une géométrie d'ellipsoïde, et nous verrons dans quelle mesure cela affecte les éléments du système d'alignement du CLIC.

4.1 Champ de pesanteur de référence et effets perturbateurs

La forme de la Terre est définie par un ellipsoïde de référence dont les dimensions, pour l'ellipsoïde UIGG 1980 utilisé au CERN, sont les suivantes :

$$\text{demi grand axe } a = 6\,378\,137m$$

$$\text{aplatissement } f = 1/298.25$$

$$\text{excentricité } e^2 = 0.006\,694\,380\,022\,9$$

La gravité γ à la surface de cet ellipsoïde est donnée par la relation (4.1) définie par l'IUGG¹ (Vanicek et Krakiwsky [27, p.79]) :

$$\gamma = 9.7803185(1 + 0.005278895 \sin^2 \varphi + 0.000023462 \sin^4 \varphi) \left(1 - \frac{2h}{R}\right) \quad (4.1)$$

On constate que γ augmente avec la latitude géographique φ et diminue avec la hauteur h au-dessus de l'ellipsoïde. R désigne le rayon de courbure terrestre qui vaut environ $6378.7km$ dans la région du CERN. Le calcul des dérivées partielles de γ par rapport à φ et h permet d'estimer ses variations en fonction de ces deux paramètres :

$$\frac{\delta\gamma}{\delta\varphi} = 9.7803185(0.01055779 \sin \varphi \cos \varphi + 0.000093848 \cos \varphi \sin^3 \varphi) \left(1 - \frac{2h}{R}\right) \quad (4.2)$$

$$\frac{\delta\gamma}{\delta h} = \frac{-19.560637}{R} \quad (4.3)$$

Pour les environs de Genève, les valeurs de référence de φ , h et R sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi &= 48^\circ 16' \\ h &= 375m \\ R &= 6\,378km \end{aligned}$$

Les équations (4.2) et (4.3) nous permettent d'estimer les variations de latitude et de hauteur nécessaires pour observer une variation de γ de l'ordre de $-10^{-2}m \cdot s^{-2}$ (tableau 4.1).

$\Delta\gamma$	$-10^{-2}m \cdot s^{-2}$
$\Delta\varphi$	$-11^\circ 07' \simeq 1237km$
Δh	3261m

TAB. 4.1 – Variations de γ en fonction de la latitude et de l'altitude

Ce champ de gravité découlant de l'ellipsoïde de référence est en fait perturbé par les deux phénomènes ci-dessous que nous allons étudier dans ce qui suit.

- les anomalies du géoïde, constantes dans le temps ;
- les déformations de la Terre, variables dans le temps.

4.1.1 Anomalies du géoïde et forme des surfaces équipotentielles

Le géoïde est la surface équipotentielle de référence de la Terre réelle. Il résulte des anomalies de masse (proches ou lointaines) relativement à l'ellipsoïde de référence.

¹International Union of Geodesy and Geophysics

Le vecteur \vec{g} (pesanteur réelle) sur le géoïde ou sur une surface équipotentielle diffère en module et en direction du vecteur $\vec{\gamma}$ défini sur le point de l'ellipsoïde de référence correspondant (voir fig. 4.1).

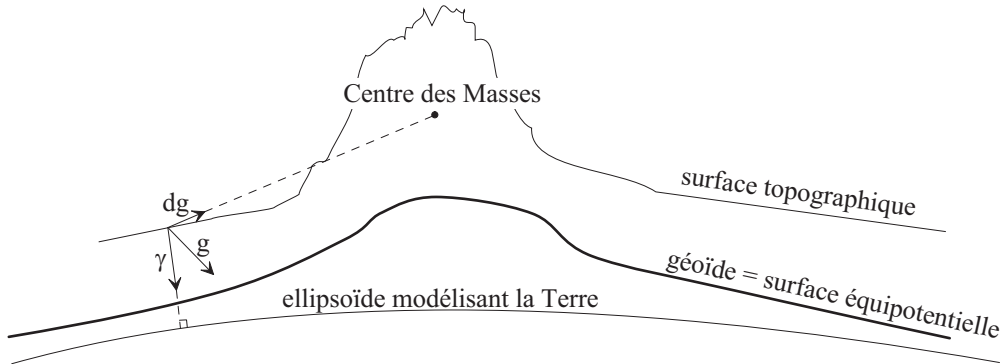


FIG. 4.1 – Forme des surfaces équipotentielles

Une étude du champ de gravité dans la région du CERN est présentée dans Bell [1]. Les résultats issus d'une simulation utilisant un modèle de masses couvrant une zone de $70 \times 50 \text{ km}$ indiquent une déviation maximale de la verticale de $15''$ (secondes sexagésimales) par rapport à l'ellipsoïde du système CERN, au niveau de la surface topographique, orientée perpendiculairement à la ligne des monts du Jura (la verticale sortante penche de $7''$ vers le sud et de $13''$ vers l'est).

L'anomalie du géoïde peut également s'exprimer par sa hauteur N à l'ellipsoïde de référence (voir fig. 4.2).

H , hauteur au-dessus du géoïde, est l'altitude du point P ; h , hauteur au-dessus de l'ellipsoïde, est appelée hauteur hypsométrique. On néglige en général l'écart entre les points G et G' ce qui permet d'exprimer l'anomalie du géoïde N comme $N = h - H$.

4.1.1.1 Anomalies du géoïde le long d'un possible site d'implantation du CLIC

Le groupe de métrologie du CERN a établi un profil géoïdal le long des 40km d'un possible site d'installation du CLIC. Ce profil (fig. 4.3) est basé sur le modèle de géoïde CHGEO98 établi par l'Office Fédéral de Topographie à Berne et donne l'anomalie N en fonction de la position le long des 40km. On s'aperçoit que les valeurs de N varient entre $+10 \text{ mm}$ et -20 mm .

Nous exploiterons ce profil plus loin lorsque nous étudierons l'impact des anomalies du géoïde sur les mesures faites avec les HLS.

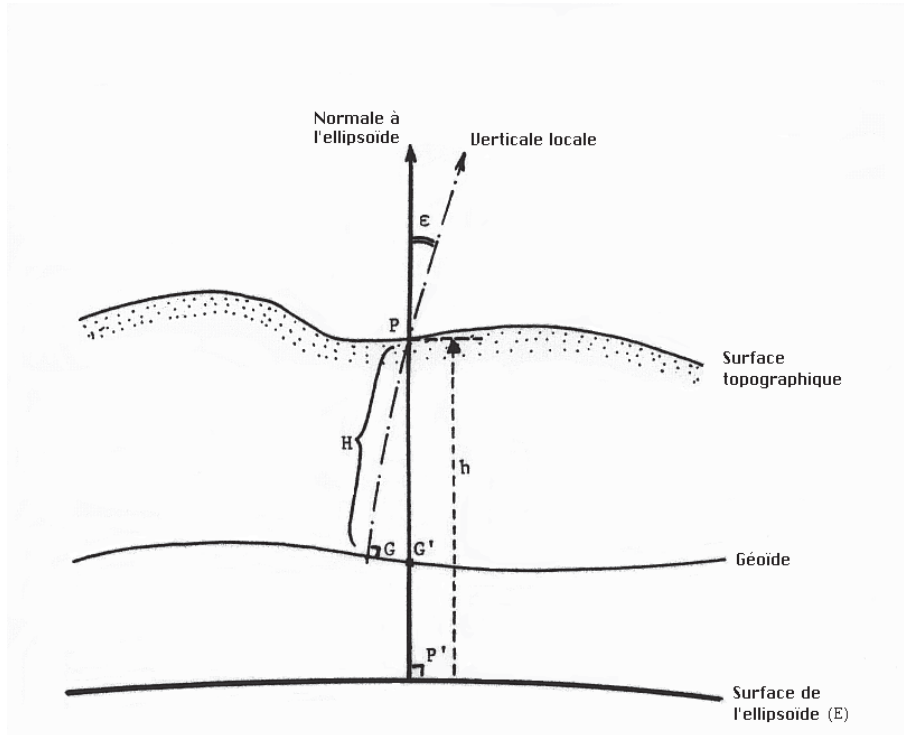


FIG. 4.2 – Anomalie du géοide

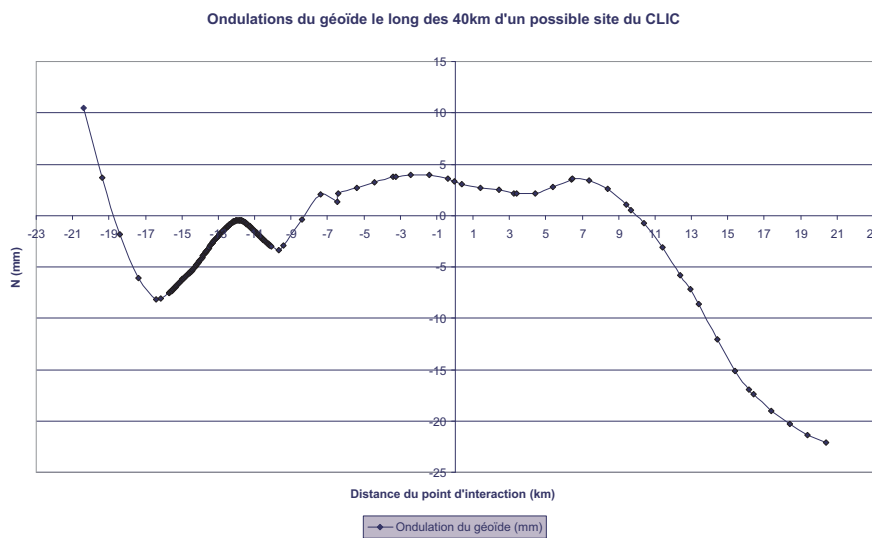


FIG. 4.3 – Profil géοidal le long du CLIC

4.1.1.2 Mesures de dénivelées et surfaces de référence

Dans de nombreuses applications on s'intéresse d'avantage aux dénivelées entre points qu'aux hauteurs par rapport à une surface de référence. C'est le cas pour le CLIC, les dénivelées mesurées avec les HLS entre paires de points permettant de s'assurer que le

profil en long de l'accélérateur est suffisamment proche de la ligne droite théorique.

L'ellipsoïde, qui est une des surfaces de référence altimétrique possible (voir fig. 4.2), est mieux défini mathématiquement que le géoïde et se prête donc mieux à une utilisation pour le contrôle d'une géométrie de ligne droite. Il est donc intéressant d'estimer quelles sont, pour des couples de points, les écarts entre différences de hauteurs hypsométriques (dénivelées par rapport à l'ellipsoïde) et différences d'altitudes (dénivelées par rapport au géoïde).

Pour effectuer cette estimation nous avons procédé à une étude que nous avons conduite de la manière suivante :

- sélection de deux ensembles de points (grille de maille 100m) définis en coordonnées géocentriques et contenus dans le plan de l'accélérateur LEP ; le premier ensemble correspond à une zone où le relief en surface est peu accidenté ; le second se situe au pied du Jura ;
- avec les programmes de transformation de coordonnées mettant en œuvre des modèles de géoïde [1] et d'ellipsoïde propres au CERN, calcul des hauteurs des points par rapport à chacune des surfaces de référence (fig. 4.2) ;
- calcul et comparaison des deux types de dénivelées entre paires de points distants de 100m.

La synthèse des résultats de ce calcul est présentée dans le tableau 4.2. Les résultats complets font l'objet de l'annexe 8.

	Relief en surface plat	Relief en surface accidenté
Nombre de paire des points	110	110
Différence moyenne (μm)	153	366
Différence maximale (μm)	246	458
Différence minimale (μm)	60	273

TAB. 4.2 – Ecart entre différences de hauteurs hypsométriques et différences d'altitude

4.1.2 Déformations de la Terre et attraction luni-solaire

La Terre peut se déformer sous l'action des forces de marées ou sous l'action des surcharges en surface : variation de pression atmosphérique, surcharge de neige et d'eau, surcharges océaniques lointaines. La déformation la plus importante résulte du phénomène de marée.

Ce phénomène résulte principalement de l'attraction de la Lune et du Soleil. En effet ces deux corps célestes agissent comme des masses perturbatrices et modifient le champ de gravité terrestre. Leur particularité est que leur effet en un point donné varie constamment avec leur position par rapport à la Terre.

L'accélération de la pesanteur \vec{g} change donc constamment en direction et en intensité. Les changements en intensité varient dans une plage de $\pm 2.4 \cdot 10^{-6} m \cdot s^{-2}$, alors que les changements en direction peuvent varier de $\pm 0''05$ (Melchior [19, chap. 1.5]).

Les déplacements du sol induits par les marées peuvent atteindre 40cm en 12h. Les effets de ces déplacements s'expriment en surface par les solutions du système différentiel assez complexe qui régit les déformations de la Terre. Ces solutions se nomment *nombre de Love*.

Pour les forces de marée qui dérivent d'un potentiel W_2 , le déplacement radial en surface $u_r(a)$, les déplacements tangentiels en surface $u_\theta(a)$ (nord-sud) et $u_\lambda(a)$ (est-ouest) ainsi que la variation du potentiel d'attraction $\Phi(a)$ s'écrivent, pour un point en surface à la distance a du centre de la Terre (Melchior [18, partie 2, chap.1]) :

$$\begin{aligned} u_r(a) &= h \frac{W_2}{g} \\ u_\theta(a) &= \frac{l}{g} \frac{\delta W_2}{\delta \theta} \\ u_\lambda(a) &= \frac{l}{g \sin \theta} \frac{\delta W_2}{\delta \lambda} \\ \Phi(a) &= k W_2 \end{aligned} \tag{4.4}$$

h, l, k : nombres de Love

g : pesanteur en surface

θ, λ : colatitude géocentrique et longitude

Le potentiel total perturbant le géoïde est donc égal à :

$$\Phi(a) + W_2(a) = (1 + k)W_2 \tag{4.5}$$

La hauteur ξ de la déformation de la surface équipotentielle est donnée par :

$$\xi = \frac{1 + k}{g} W_2 \tag{4.6}$$

Les valeurs communément admises pour h, k et l sont les suivantes (Jobert et Coulomb [13]) :

$$k = 0.3 \quad h = 0.6 \quad l = 0.9$$

4.2 Répercussions des perturbations sur l’alignement du CLIC

Les perturbations du champ de gravité décrites ci-dessus ont des conséquences sur l’utilisation des écartomètres à fil, des niveaux hydrostatiques et des inclinomètres. Nous allons dans ce qui suit essayer de quantifier les effets de ces perturbations sur les mesures faites à l’aide de ces capteurs. Nous pourrions ainsi déterminer si des corrections devraient être apportées à ces mesures pour éviter que l’information géométrique qui en est extraite soit faussée.

De plus, avant de nous intéresser aux mesures, il est également judicieux de s’interroger sur les effets qu’ont les déplacements du sol sur la structure d’ensemble de l’accélérateur.

4.2.1 Les déformations du sol et la ligne droite du CLIC

L’accélérateur sera solidaire du sol qui comme nous venons de le voir subit en permanence des déplacements induits principalement par les marées. Il est important d’évaluer l’effet de ces déplacements sur la géométrie de ligne droite de l’accélérateur afin de déterminer si celle-ci n’est pas soumise à des déformations trop importantes et incompatibles avec le bon fonctionnement du CLIC. Si ce devait être le cas, ces déformations devraient être compensées par le système d’alignement.

Nous verrons plus loin (voir paragraphe 4.2.3.2, équation (4.20)) qu’il est possible de calculer la valeur théorique de la déformation du sol u_r (équation (4.4)) en un point donné et à un moment donné.

Nous pouvons donc calculer u_r le long d’une ligne similaire à celle du CLIC et voir ainsi si la géométrie du sol (et donc de la structure de l’accélérateur) ne s’éloigne pas trop de la ligne droite.

A cet effet nous avons développé un programme informatique qui utilise notamment les éphémérides astronomiques de la connaissance de temps mises à disposition par le Bureau Des Longitudes. Ce programme permet de calculer la valeur théorique de la marée terrestre en fonction de la position sur le globe et du moment choisi. Il nous a permis d’effectuer une simulation dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 4.3. La ligne au long de laquelle nous avons calculé les déformations du sol passe par le site du CERN et est orientée comme le CLIC pourrait probablement l’être.

Le choix d’une simulation sur une année entière se justifie par la présence de la position du soleil et de la lune parmi les paramètres de calcul de u_r . Une durée d’un an nous permet de couvrir toutes les configurations terre-soleil et terre-lune.

Longueur de la ligne de simulation	40km
Orientation de la ligne par rapport au Nord	50°
Nombre de positions de calcul le long de la ligne	161 (une position tous les 250m)
Intervalle de temps entre deux époques de calcul	30mn
Durée couverte par la simulation	1 an (2000)
Nombre d'époques de calcul	17567

TAB. 4.3 – Caractéristiques de la simulation de déformations du sol

Pour chacun des 159 points compris entre les deux extrémités nous avons calculé à chaque date la distance qui le séparait de la droite joignant ces deux extrémités. Nous avons ainsi pu déterminer pour chaque époque de calcul la flèche maximale de la structure du CLIC par rapport à la ligne droite (figure 4.4).

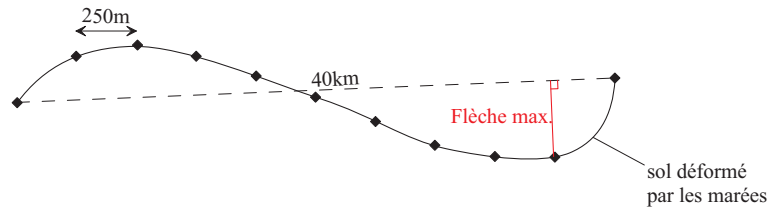


FIG. 4.4 – Flèche maximale de la structure du CLIC déformée par les marées

Sur une année, la flèche maximale que présente la ligne de 40km déformée par les marées terrestres est de $4.4\mu\text{m}$. La variation de la déformation du sol u_r le long de l'accélérateur peut donc être considérée comme linéaire. Cela nous permet de conclure que *la géométrie de ligne droite de la structure de l'accélérateur n'est pas rompue par les déformations du sol dues aux phénomènes de marées.*

4.2.2 Effet des variations de pesanteur sur les fils

Comme la tension appliquée au fil résulte d'un contrepois (voir fig. 3.1), le rapport q/H reste constant lorsque la composante verticale de \vec{g} varie uniformément. Nous pouvons donc déjà déduire des équations ci-dessus que *dans le plan vertical* le fil ne se déforme pas en cas de variations uniformes de l'accélération de la pesanteur.

Cependant d'autres types de perturbations sont susceptibles d'altérer la géométrie du fil.

4.2.2.1 Non-uniformité du champ de pesanteur

Les équations (3.3a) et (3.3b) ont été établies en considérant que \vec{g} était le même en tout point. Cependant ce n'est pas strictement vrai en réalité et il nous faut évaluer

les variations de l'intensité du champ de pesanteur qu'entraînent les trois phénomènes suivants :

Les variations de latitude Nous nous référons ici à l'équation (4.1). L'écart entre les attractions normales aux extrémités d'un fil de 100 m sera le plus grand si ce fil est orienté plein nord. Aux alentours du CERN, cet écart maximal serait ainsi de $\Delta g_\varphi \simeq 8 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Les anomalies du géoïde La déviation de la verticale due aux anomalies du géoïde n'est pas constante et diminue lorsque l'on s'éloigne du Jura (Bell [1]). En se plaçant dans le cas extrême où la déviation serait maximale (15'') à une extrémité du fil et nulle à l'autre, l'écart sur g serait de $\Delta g_m \simeq 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

L'attraction luni-solaire La position de la Lune et du Soleil par rapport aux deux extrémités d'un fil étant différente, il en résulte une altération différente de l'intensité de \vec{g} (voir 4.1.2). D'après nos calculs, pour la région du CERN, l'écart ainsi obtenu sur g est au maximum de : $\Delta g_{ls} \simeq 3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

Ainsi, les effets des masses avoisinantes et de l'attraction luni-solaire sur les variations de l'intensité du champ de pesanteur sont négligeables devant ceux provenant des variations de latitude. C'est donc uniquement celles-ci que nous allons prendre en compte ci-dessous pour évaluer les conséquences de la non-uniformité du champ de pesanteur sur la géométrie du fil.

Equation du fil dans un champ de pesanteur non-uniforme Considérons l'équilibre de la partie du fil comprise entre son point le plus bas C et un point quelconque M . Supposons dans un premier temps que le champ de pesanteur varie linéairement tout au long de ce fil (fig. 4.5).

Sur la portion CM agissent :

- le poids P
- les tractions H_b et S aux extrémités C et M . Les lignes d'action de ces forces sont tangentes à la courbe en ces points.

Désignons par x, z les coordonnées de M , par H', V les composantes de S , et par α l'angle de S et x . Les conditions d'équilibre donnent :

$$H' = H_b \quad \text{et} \quad V = P$$

La composante horizontale de la traction de la corde est donc constante, et égale à la traction appliquée par contrepoids . Par ailleurs :

$$\tan \alpha = \frac{V}{H'} = \frac{P}{H_b} = \frac{P}{H} \quad \text{mais on a aussi} \quad \tan \alpha = \frac{dz}{dx}$$

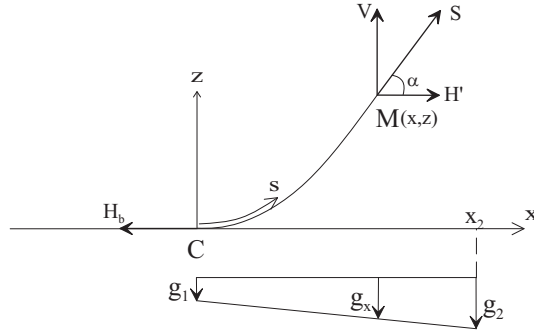


FIG. 4.5 – Portion de fil dans un champ de pesanteur non uniforme

d'où :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{P(x)}{H} \quad (4.7)$$

La résolution de cette équation différentielle nous fournira l'équation du fil mais il faut dans un premier temps déterminer la fonction $P(x)$.

Sur l'élément $ds(dx, dy)$ du fil s'applique $dP = M_L \cdot ds \cdot g(x)$ (M_L est la masse linéaire du fil). Comme $g(x)$ est constant sur ds , on peut sur cet élément approcher la courbe d'équilibre du fil par une parabole d'équation $z = c_1 x^2$, c_1 étant un coefficient indépendant de $g(x)$ (voir 3.3b) qui sera donc le même pour tous les éléments ds .

$$\text{On a : } ds^2 = dx^2 + dz^2$$

$$\text{d'où : } \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} = 2c_1 \sqrt{x^2 + \frac{1}{4c_1^2}}$$

$$\text{Par ailleurs : } g(x) = g_1 + \frac{x}{x_2}(g_2 - g_1)$$

$$\text{donc : } dP = M_L \cdot 2c_1 \sqrt{x^2 + \frac{1}{4c_1^2}} \cdot dx \cdot \left(g_1 + \frac{x}{x_2}(g_2 - g_1)\right)$$

Après intégration nous obtenons l'expression du poids du fil en fonction de l'abscisse x :

$$P(x) = c_3 \left(x \sqrt{x^2 + c_2^2} + c_2^2 \operatorname{argsh}(x/c_2)\right) + \frac{2c_4}{3} \left(\sqrt{(x^2 + c_2^2)^3} - c_2^3\right) \quad (4.8)$$

$$\text{avec : } c_1 = \frac{q}{2H} \quad c_2 = \frac{1}{2c_1} \quad c_3 = M_L \cdot c_1 \cdot g_1 \quad c_4 = \frac{M_L \cdot c_1 \cdot (g_2 - g_1)}{x_2}$$

On peut maintenant obtenir l'équation de la courbe d'équilibre du fil en intégrant (4.7) :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{P(x)}{H}$$

On obtient :

$$z(x) = \frac{1}{H} \left[\left(\frac{c_3}{3} + \frac{c_4 x}{6} \right) \sqrt{(x^2 + c_2^2)^3} + \left(c_3 c_2^2 x + \frac{c_4 c_2^4}{4} \right) \operatorname{argsh} \frac{x}{c_2} + \left(\frac{c_4 c_2^2 x}{4} - c_3 c_2^2 \right) \sqrt{x^2 + c_2^2} + 2c_2^3 \left(\frac{c_3 - c_4 x}{3} \right) \right] \quad (4.9)$$

Application numérique Une application numérique va nous permettre de comparer l'équation (4.9) qui correspond au champ de pesanteur non uniforme, avec l'équation (3.3b) correspondant au champ uniforme. Nous verrons ainsi s'il est nécessaire de prendre en compte les variations de latitude dans la définition de la géométrie du fil. Nous avons pris pour Δg la valeur maximale de $8 \cdot 10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ indiquée plus haut, pour un fil orienté plein nord.

Avec :

$$\begin{aligned} x_2 &= 50 \text{m} & M_L &= 28 \cdot 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \\ g_1 &= 9,806\,386\,693 \text{m} \cdot \text{s}^{-2} & g_2 &= 9,806\,387\,493 \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \\ H &= 20 \text{kg} \times g_2 = 196,227\,750 \text{N} & g_2 - g_1 &= 8 \cdot 10^{-7} \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \end{aligned}$$

Le tableau 4.4 reporte les écarts entre (4.9) et (3.3b) ($z(x)$ désigne l'ordonnée du fil calculée avec (4.9), $A(x)$ désigne celle calculée avec (3.3b)).

$x(\text{m})$	$z(x) - A(x) (\mu\text{m})$
1	-0,003
5	-0,089
10	-0,357
20	-1,427
30	-3,211
40	-5,708
50	-8,918

TAB. 4.4 – Écarts entre fils plongés dans des champs de gravité uniforme et non-uniforme

On peut voir que les écarts atteignent des valeurs non négligeables quand on s'éloigne de la zone centrale du fil. Ce résultat théorique devra être confirmé par l'expérience. Il faudra commencer par vérifier si le fil est effectivement déformé du fait des latitudes différentes auxquelles se trouvent ses extrémités. On devra alors s'assurer que l'équation 4.9 est suffisamment proche de la réalité, pour ainsi pouvoir corriger cet effet lors de l'utilisation des fils pour l'alignement vertical.

4.2.2.2 Courbure du champ de pesanteur

Nous avons vu en 3.1.2 que la courbure terrestre, qui en première approximation est aussi celle du champ de pesanteur, représente environ $200\mu\text{m}$ sur 100m (fig. 3.3). Pour évaluer les effets de ce phénomène sur la forme du fil, on peut calculer l'équation de ce dernier dans un champ de forces comme celui présenté sur la figure 4.6.

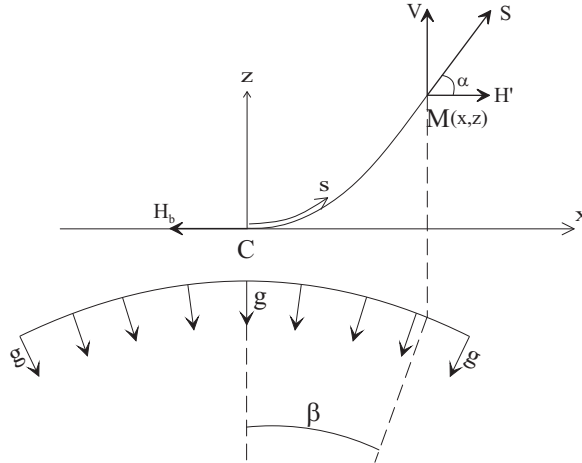


FIG. 4.6 – Fil dans un champ de pesanteur courbe

Equation du fil dans un champ de pesanteur courbe Nous considérerons qu'à l'origine \vec{g} est parallèle à l'axe Z. Pour un point d'abscisse x , les composantes verticale g_v et longitudinale g_l de \vec{g} sont données par les expressions suivantes, R_T étant le rayon terrestre :

$$g_v = g \cdot \cos\beta \quad g_l = g \cdot \sin\beta \quad \beta \simeq \frac{x}{R_T}$$

Considérons l'équilibre de la partie du fil comprise entre son point le plus bas C et un point quelconque M de coordonnées (x, z) . Sur la portion de fil CM agissent :

- la composante verticale P_v de l'attraction terrestre ;
- la composante longitudinale P_l de l'attraction terrestre ;
- les tractions H_b et S en C et M . Les lignes d'action de ces forces sont tangentes à la courbe du fil en ces points.

Désignons par H' , V les composantes de S , et par α l'angle de S et x . Les conditions d'équilibre donnent :

$$H' = H_b + P_l \quad \text{et} \quad V = P_v$$

La traction H_b au point le plus bas s'obtient en considérant l'équilibre des composantes horizontales des forces agissant sur la portion de fil entre C et l'extrémité où est appliquée

la tension par contrepoids H . Les conditions d'équilibre donnent, en considérant pour l'instant que le point le plus bas se trouve au milieu du fil de longueur L :

$$H_b = H - P_l\left(\frac{L}{2}\right)$$

Par ailleurs :

$$\tan \alpha = \frac{V}{H'} = \frac{P_v}{P_l + H_b} \quad \text{mais on a aussi} \quad \tan \alpha = \frac{dz}{dx}$$

d'où :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{P_v(x)}{P_l(x) + H_b} \quad (4.10)$$

Il nous faut donc pour commencer déterminer les fonctions $P_v(x)$ et $P_l(x)$.

Sur un élément infinitésimal d'abscisse t et de longueur ds s'exercent les attractions élémentaires suivantes :

$$dP_v = g \cdot \cos \frac{t}{R_T} \cdot M_L \cdot ds \quad dP_l = -g \cdot \sin \frac{t}{R_T} \cdot M_L \cdot ds$$

Si l'on suppose qu'on peut localement approcher la courbe d'équilibre par une parabole d'équation $z = at^2$, on peut exprimer ds en fonction de dt :

$$\text{On a : } ds^2 = dt^2 + dz^2$$

$$\text{d'où : } ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt = 2a\sqrt{x^2 + \frac{1}{4a^2}} dt$$

$P_v(x)$ et $P_l(x)$ s'obtiennent alors par intégration :

$$P_v(x) = 2a \cdot g \cdot M_L \int_0^x \cos \frac{t}{R_T} \cdot \sqrt{t^2 + \frac{1}{4a^2}} dt \quad (4.11)$$

$$P_l(x) = -2a \cdot g \cdot M_L \int_0^x \sin \frac{t}{R_T} \cdot \sqrt{t^2 + \frac{1}{4a^2}} dt \quad (4.12)$$

En intégrant 4.10 on peut alors obtenir l'équation de la courbe d'équilibre du fil.

$$z(x) = \int_0^x \frac{P_v(t)}{P_l(t) + H_b} dt \quad (4.13)$$

$$\text{avec : } H_b = H + 2a \cdot g \cdot M_L \int_0^{L/2} \sin \frac{t}{R_T} \cdot \sqrt{t^2 + \frac{1}{4a^2}} dt$$

Application numérique Une application numérique va nous permettre de comparer 4.13 et 3.3b, et d'évaluer ainsi s'il est nécessaire de prendre en compte la courbure du champ de pesanteur.

Avec :

$$\begin{aligned}
 g &= 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} & L &= 100\text{m} \\
 H &= 200 \text{ N} & M_L &= 28 \cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot \text{ m}^{-1} \\
 R_T &= 6\,378\,000\text{m} & a &= \frac{g \cdot M_L}{2H} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1}
 \end{aligned}$$

Le tableau 4.5 reporte les écarts sur les coordonnées calculées par les relations (4.13) et (3.3b) ($z(x)$ désigne l'ordonnée du fil calculée avec (4.16), $A(x)$ désigne celle calculée avec (3.3b)).

$x(\text{m})$	$z(x) - A(x)$ (nm)
1	0,000
5	0,000
10	-0,001
20	0,011
30	0,078
40	0,272
50	0,690

TAB. 4.5 – Écarts entre fils plongés dans des champs de pesanteur courbe et rectiligne

Les écarts restent très largement inférieurs à $1\mu\text{m}$. *Les effets de la courbure du champ de pesanteur sur les fils des WPS sont donc négligeables.*

4.2.2.3 Effet des anomalies du géoïde sur le fil

Supposons dans un premier temps que le long d'un fil de 100 m la déviation de la verticale due aux anomalies du géoïde est constante dans l'espace.

Nous avons déjà vu précédemment que dans ce cas le fil n'est pas déformé dans le sens vertical. Cependant il pourrait être déformé transversalement ou longitudinalement selon l'orientation de la composante horizontale de \vec{g} .

Déformation transversale Supposons que la composante horizontale de \vec{g} soit orientée perpendiculairement au fil. La projection horizontale du système des forces est analogue à celui de la figure 3.2. Par conséquent, dans un plan xy , l'équation de la courbe d'équilibre

du fil est également une chaînette :

$$y = \frac{H}{q_t} \left(\operatorname{ch} \left(\frac{q_t x}{H} \right) - 1 \right) \quad \text{très bien approchée par} \quad y = \frac{q_t x^2}{2H} \quad (4.14)$$

Où : H est la tension appliquée au fil

q_t est l'attraction transversale du fil par unité de longueur

Une application numérique nous permet d'évaluer la déformation du fil tendu sur une longueur L , dans la configuration suivante, pour une verticale déviée d'un maximum de $15''$ perpendiculairement au fil :

$$g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

fil tendu sur une longueur $L = 100 \text{ m}$

$$H = 200 \text{ N}$$

masse linéaire $M_L = 28 \cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$

$$q_t = g \sin(15'') M_L = 2,036 \cdot 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$$

Avec ces valeurs la flèche est de :

$$f = \frac{q_t (L/2)^2}{2H} = 1,27 \mu\text{m}$$

Pour un fil tendu sur 100 m la déformation transversale est donc légèrement supérieure à $1 \mu\text{m}$. Si le CLIC devait se construire dans un site où l'on rencontre de telles déviations, il faudrait donc connaître ces dernières et effectuer les corrections nécessaires lors de l'utilisation du fil pour l'alignement horizontal.

Déformation longitudinale Supposons maintenant que \vec{g} possède une composante horizontale orientée parallèlement au fil, et évaluons les déformations subies par le fil du fait de cette attraction longitudinale. Considérons l'équilibre de la partie du fil comprise entre son point le plus bas C et un point quelconque M . La projection verticale du système des forces est représentée sur la figure 4.7.

Sur la portion de fil CM agissent :

- la composante verticale P_v de l'attraction terrestre : $P_v = q_v \cdot s$, q_v étant l'attraction verticale par unité de longueur ;
- la composante longitudinale P_l de l'attraction terrestre : $P_l = q_l \cdot s$, q_l étant l'attraction longitudinale par unité de longueur (sens arbitraire) ;
- les tractions H_b et S en C et M . Les lignes d'action de ces forces sont tangentes à la courbe du fil en ces points.

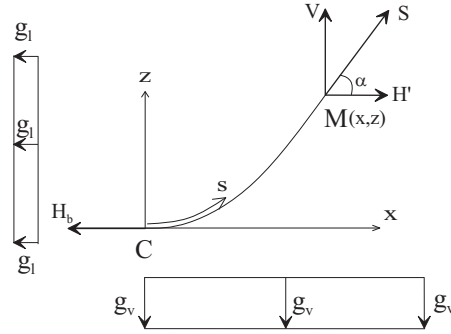


FIG. 4.7 – Portion de fil soumis à une attraction longitudinale

Désignons par x, z les coordonnées de M , par H', V les composantes de S , et par α l'angle de S et x . Les conditions d'équilibre donnent :

$$H' = H_b + P_l \quad \text{et} \quad V = P_v$$

La traction H_b au point le plus bas s'obtient en considérant l'équilibre des composantes horizontales des forces agissant sur la portion de fil entre C et l'extrémité où est appliquée la tension par contrepoids H . Les conditions d'équilibre donnent, en considérant pour l'instant que le point le plus bas se trouve au milieu du fil de longueur L :

$$H_b = H - q_l \cdot \frac{L}{2}$$

Par ailleurs :

$$\tan \alpha = \frac{V}{H'} = \frac{P_v}{P_l + H_b} \quad \text{mais on a aussi} \quad \tan \alpha = \frac{dz}{dx}$$

d'où :

$$\frac{dz}{dx} = \frac{P_v(x)}{P_l(x) + H_b} \quad (4.15)$$

La résolution de cette équation différentielle nous permettra de déterminer la courbe d'équilibre du fil mais il faut dans un premier temps déterminer les fonctions $P_v(x)$ et $P_l(x)$, qui nous l'avons vu sont proportionnelles à $s(x)$. Pour calculer $s(x)$ nous supposons que l'on peut dans un premier temps approcher la courbe du fil par une parabole d'équation $z = ax^2$.

$$\text{On a : } ds^2 = dx^2 + dz^2$$

$$\text{d'où : } \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} = 2a\sqrt{x^2 + \frac{1}{4a^2}}$$

$$\text{Après intégration : } s(x) = a\left(x\sqrt{x^2 + \frac{1}{4a^2}} + \frac{1}{4a^2} \operatorname{argsh}(2ax)\right)$$

On peut maintenant déterminer la courbe d'équilibre du fil en intégrant (4.15). On obtient :

$$z(x) = \int_0^x \frac{q_v \cdot a \cdot t \sqrt{t^2 + \frac{1}{4a^2}} + \frac{1}{4a^2} \operatorname{argsh}(2at)}{q_l \cdot a \cdot t \sqrt{t^2 + \frac{1}{4a^2}} + \frac{1}{4a^2} \operatorname{argsh}(2at)} dt + H_b \quad (4.16)$$

Une application numérique va nous permettre de comparer la courbe définie par l'équation (4.16) ci-dessus, avec l'équation (3.3b) correspondant à une attraction sans composante horizontale. Nous verrons ainsi s'il est nécessaire de prendre en compte une attraction longitudinale dans la définition de la géométrie du fil. Nous nous placerons dans la situation la plus défavorable où la verticale est déviée de 15" parallèlement au fil, avec les valeurs numériques ci-dessous :

$$\begin{array}{ll} g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} & L = 100 \text{ m} \\ H = 200 \text{ N} & M_L = 28 \cdot 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1} \\ g_v = g \cdot \cos(15'') = 9,999\,999\,973\,56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} & g_l = g \cdot \sin(15'') = 0,000\,727\,220\,52 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \\ q_v = g_v \cdot M_L = 28,000 \cdot 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} & q_l = g_l \cdot M_L = 2,036 \cdot 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} \\ a = \frac{g_v \cdot M_L}{2H} = 6,999\,999\,981 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} & H_b = H - q_l \cdot \frac{L}{2} = 199,999\,989\,818\,9 \text{ N} \end{array}$$

Le tableau 4.6 reporte les écarts sur les coordonnées calculées par les relations (4.16) et (3.3b) ($z(x)$ désigne l'ordonnée du fil calculée avec (4.16), $A(x)$ désigne celle calculée avec (3.3b)). Les valeurs négatives de x correspondent à l'autre moitié du fil pour lequel on aurait $H_b = H + q_l \cdot L/2$.

Dans un repère centré sur le point le plus bas des courbes d'équilibre du fil, les écarts entre la parabole et la courbe obtenue en prenant en compte une attraction longitudinale maximale restent largement inférieurs à $1\mu\text{m}$. On voit également que les valeurs prises de part et d'autre du point C sont suffisamment symétriques pour considérer que le point le plus bas du fil n'est pas déplacé longitudinalement. *L'effet des anomalies du géoïde sur la géométrie longitudinale d'un fil WPS est donc négligeable dans notre cas.*

$x(\text{m})$	$z(x) - A(x)$ (nm)	$x(\text{m})$	$z(x) - A(x)$ (nm)
1	0,000	-1	0,000
10	0,032	-10	-0,039
20	0,123	-20	-0,162
40	0,559	-40	-0,581
50	1,012	-50	-0,770

TAB. 4.6 – Écart entre fils soumis à une attraction avec et sans composante horizontale

4.2.2.4 Effets de l’attraction luni-solaire

Comme les anomalies du géoïde, la Lune et le Soleil entraînent une déviation de la verticale, qui est elle variable dans le temps. Cette déviation n’excède jamais $0.05''$ d’après Melchior [18, p.20], ce qui est une valeur bien inférieure aux $15''$ que nous avons considéré ci-dessus pour l’étude de l’influence des anomalies du géoïde, qui nous l’avons vu est négligeable pour les fils. Nous pouvons donc aussi négliger la déviation de la verticale créée par la Lune et le Soleil. Par ailleurs, nous avons aussi vu en 4.2.2.1 que la non-uniformité du champ de pesanteur induite par l’attraction de la Lune et du Soleil était négligeable. *L’effet de l’attraction luni-solaire sur la géométrie des fils WPS est donc négligeable dans notre cas.*

4.2.3 Gravité et utilisation des HLS

L’eau au repos dans le réseau de tubes reliant les pots HLS a pour but de fournir une surface de référence pour l’alignement vertical du CLIC, par rapport à laquelle des dénivelées sont mesurées. Ceci n’a bien sûr de sens que si l’on connaît avec une précision suffisante la géométrie de la surface de référence elle-même, qui est une équipotentielle du champ de pesanteur. Ces équipotentielles comportent des anomalies (voir 4.1.1) constantes, alors que les déformations induites par l’attraction luni-solaire sont variables dans le temps. Nous allons donc voir dans ce qui suit les répercussions de ces deux phénomènes sur l’utilisation des HLS.

4.2.3.1 Effets des anomalies du géoïde

Dénivelées et surfaces de référence Les niveaux hydrostatiques mesurent des hauteurs par rapport à une équipotentielle du champ de pesanteur matérialisée par la surface de l’eau au repos dans les tubes du réseau HLS.

L’étude présentée en 4.1.1.2 permet d’évaluer l’approximation qui serait faite en considérant les dénivelées calculées avec les HLS comme des dénivelées hypsométriques, se rapportant donc à l’ellipsoïde. L’intérêt d’une telle approximation réside dans le fait que

l'ellipsoïde est parfaitement défini mathématiquement et qu'il est donc tout à fait adapté au positionnement d'une ligne droite.

Le tableau 4.2 qui présente les résultats de cette étude nous montre que les écarts entre les différences de hauteurs hypsométriques et les différences d'altitude sont trop importants pour que ces deux types de dénivelées puissent être confondues. Ces résultats concernent en effet des couples de points distants de 100m, et les écarts sont donc largement trop grands si on les compare à la précision de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m que nous cherchons à atteindre.

Malgré ces écarts importants entre types de dénivelées, il se pourrait cependant que sur des portions de 200m le géoïde s'approche suffisamment d'une droite rectiligne pour que les mesures HLS puissent être assez directement exploitées. Cette éventualité fait l'objet du paragraphe suivant.

Rectitude d'une équipotentielle par rapport à l'ellipsoïde Nous avons exploité le profil géoïdal présenté en 4.1.1.1. Le géoïde est une équipotentielle particulière et on peut donc raisonnablement supposer que le profil de la figure 4.3 peut être considéré comme celui de l'eau dans les tubes HLS.

Il est important de réaliser qu'on peut interpréter ce profil comme étant celui qu'aurait l'accélérateur dans un repère cartésien si on partait du principe que les lignes hydrostatiques suivent un trajectoire parallèle à l'ellipsoïde et qu'on se basait sur cette hypothèse pour effectuer des corrections permettant de revenir à une ligne droite.

Comme on peut s'en apercevoir le profil comprend une section avec une densité de points plus élevée, qui s'élève à un point tous les 20 ou 40m, alors que sur les deux autres sections elle est seulement d'un point par kilomètre.

Nous avons utilisé ce semis de points plus dense pour évaluer la rectitude du géoïde, qui donne donc une bonne indication de la rectitude qu'aurait l'accélérateur si on supposait que les lignes hydrostatiques ont une courbure parfaitement elliptique.

Pour tous les segments de 200m compris dans le semis dense, nous avons calculé l'écart maximal par rapport à chaque segment des points du profil compris entre les deux extrémités de ce segment (fig. 4.8).

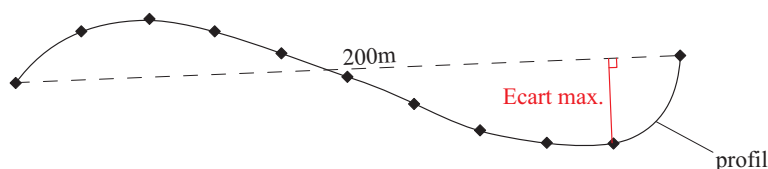


FIG. 4.8 – Calcul des défauts de rectitude

Les résultats de ce calcul sont présentés dans la figure 4.9. La moyenne quadratique des défauts de rectitude sur 200m est de $\pm 8.4\mu\text{m}$.

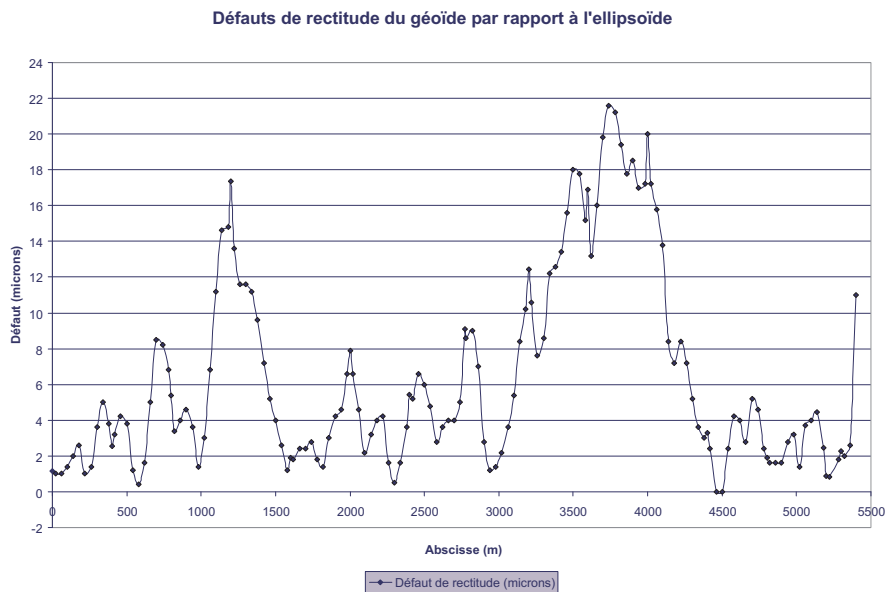


FIG. 4.9 – Défauts de rectitude du profil

Bien que leur moyenne quadratique soit inférieure au seuil des $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m pour la rectitude du CLIC, ces défauts sont importants. En effet, ce seraient les défauts du CLIC si ce dernier pouvait être parfaitement aligné par rapport à l'équipotentielle. Or cela n'est pas possible puisque les observations et les liaisons mécaniques du réseau de métrologie apportent également leur lot d'erreurs.

L'approximation effectuée en négligeant le fait que les lignes hydrostatiques n'ont pas une courbure elliptique serait donc sans doute trop large, d'autant plus que les calculs que nous avons effectués se basent sur un modèle de géoïde susceptible de présenter des écarts par rapport à la réalité. *La connaissance de la géométrie des équipotentielles de la pesanteur est par conséquent indispensable à l'utilisation des HLS pour l'alignement.* La précision requise (quelques microns sur les dénivelées entre points distants d'une centaine de mètres) est très inhabituelle en gravimétrie, et le groupe de métrologie du CERN a entrepris les démarches permettant de connaître la meilleure précision que permettent les techniques actuelles pour ce type de détermination.

4.2.3.2 Effets des déformations de la Terre et de l'attraction luni-solaire

Les HLS sont affectés par les marées terrestres puisque le sol sur lequel est fixé tout le système d'alignement se déforme sans cesse, principalement en raison de l'attraction

luni-solaire, comme nous l'avons vu en 4.1.2. Cette attraction engendre également un phénomène de marées aquatiques pour l'eau contenue dans les tubes du réseau hydrostatique, traduction directe des déformations de l'équipotentielle que sa surface matérialise.

La combinaison de ces deux phénomènes de marées se répercute sur les mesures HLS, comme nous allons le voir ci-dessous.

Manifestation des marées dans les mesures HLS On considère dans un état de référence (sans potentiel de marée) deux points A et B assez proches l'un de l'autre munis chacun d'un HLS. L'ensemble est de niveau (fig. 4.10).

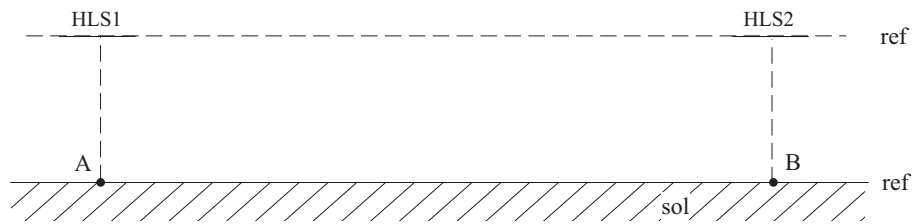


FIG. 4.10 – Deux HLS voisins : état de référence

Introduisons un potentiel de marée W_2 . Nous avons une déformation de la Terre qui se traduit par un déplacement du sol $u_r(A)$ et $u_r(B)$ (fig. 4.11) et par un déplacement de l'équipotentielle $\xi(A)$ et $\xi(B)$ (fig. 4.12).

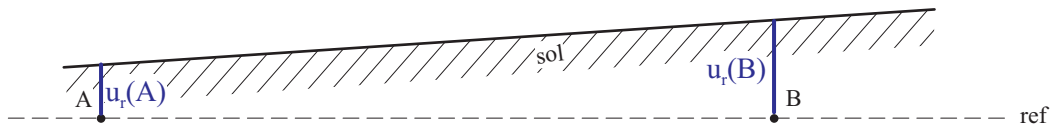


FIG. 4.11 – Deux HLS voisins : déplacements du sol

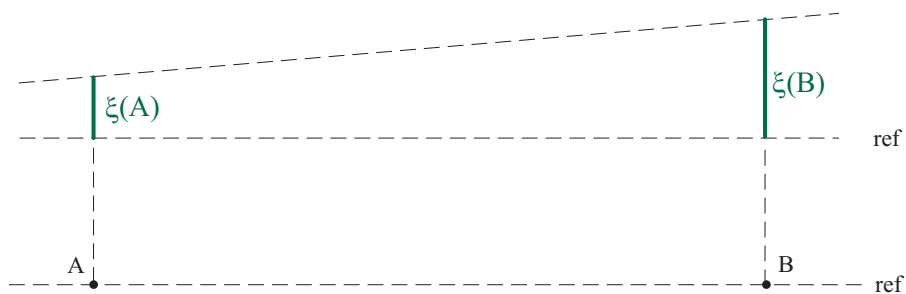


FIG. 4.12 – Deux HLS voisins : déplacements de l'équipotentielle

L'effet total du potentiel W_2 est montré par la figure 4.13.

On peut introduire en A et B la hauteur de l'équipotentielle par rapport au sol. Soit n cette hauteur. On a :

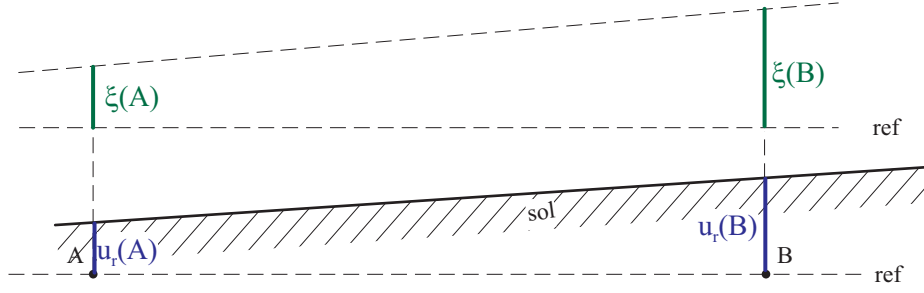


FIG. 4.13 – Deux HLS voisins : effet total d'un potentiel de marée

$$n(A) = \xi(A) - u_r(A) \quad \text{et} \quad n(B) = \xi(B) - u_r(B)$$

Les relations précédentes peuvent facilement être écrites à l'aide des nombres de Love (voir 4.1.2). On a :

$$u_r = h \cdot \frac{W_2}{g} \quad \text{et} \quad \xi = (1 + k) \cdot \frac{W_2}{g}$$

D'où :

$$n(A) = (1 + k - h) \cdot \frac{W_2(A)}{g} \quad \text{et} \quad n(B) = (1 + k - h) \cdot \frac{W_2(B)}{g}$$

La différence de niveau entre B et A est donc donnée par :

$$n(B) - n(A) = (1 + k - h) \cdot \frac{W_2(B) - W_2(A)}{g} \quad (4.17)$$

Nous avons vu en 4.2.1 que les marées terrestres n'affectent pas la rectitude de l'accélérateur, mais font seulement varier l'inclinaison de l'ensemble. Les effets des marées lus sur les HLS doivent donc être corrigés et ne pas être interprétés comme des défauts d'alignement. Nous allons voir quelles sont les valeurs théoriques des marées qui résultent de l'attraction luni-solaire et les confronter ensuite à des enregistrements que nous avons fait sur une ligne hydrostatique au CERN.

Correction de l'effet des marées sur les HLS D'après Melchior [18, p.15], l'attraction perturbatrice de la Lune ou du Soleil est dérivée du potentiel W_2 suivant :

$$W_2 = \frac{GM_t(M_c/M_t)}{2} \cdot \frac{a^2}{r^3} \cdot (3 \cos^2 z - 1) \quad (4.18)$$

G : constante gravitationnelle de Newton

M_t, M_c : masses de la Terre et du corps céleste considéré

a : distance du point considéré au centre de la Terre

r : distance du corps céleste considéré à la Terre

z : angle zénithal du corps céleste considéré au point considéré

G, M_t et M_c sont connus. a se calcule avec les formules de géodésie, connaissant les coordonnées du point considéré. z et r se calculent à l'aide des éphémérides astronomiques.

Or au point considéré de la surface terrestre, l'accélération de la pesanteur vaut :

$$g = \frac{GM_t}{a^2} \quad (4.19)$$

Le potentiel perturbateur W_2 peut donc s'écrire aussi, si on prend uniquement en compte l'attraction de la Lune et du Soleil :

$$W_2 = g \left(\frac{m_l \cdot a^4}{2r_l^3} (3 \cos^2 z_l - 1) + \frac{m_s \cdot a^4}{2r_s^3} (3 \cos^2 z_s - 1) \right) \quad (4.20)$$

m_l, m_s : rapport des masses de la Lune et du Soleil à celle de la Terre

z_l, z_s : angles zénithaux de la Lune et du Soleil au point considéré

r_l, r_s : distances de la Lune et du Soleil à la Terre

Tests de correction de mesures réelles Nous avons installé dans une zone calme du CERN une ligne hydrostatique d'une longueur d'environ 70m. Aux extrémités de celle-ci sont placés deux pots HLS, qui lisent la distance qui sépare leur surface de référence du plan d'eau libre (fig. 4.14). Des enregistrements des valeurs des capteurs peuvent être effectués à la fréquence désirée. Connaissant les coordonnées géodésiques des deux HLS, nous avons utilisé l'équation (4.20) afin de corriger les différences des lectures $l_{HLS2} - l_{HLS1}$.

La figure 4.15 illustre les résultats que nous avons obtenus. L'essai que nous présentons couvre une période de 4 jours (393 enregistrements à raison d'un tous les quarts d'heure).

On s'aperçoit que la différence $HLS_1 - HLS_2$ corrigée des effets de marées présente à la fois un mouvement plus général de diminution, et des ondulations résiduelles de période semi-diurne et d'amplitude supérieure à $2 \mu\text{m}$. La diminution traduirait plutôt un mouvement général du sol. Les mouvements résiduels peuvent être attribués pour partie

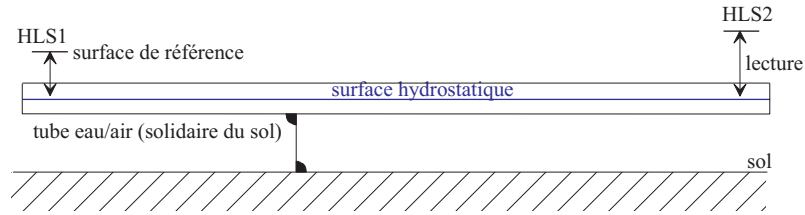


FIG. 4.14 – Dispositif utilisé pour les essais avec les HLS

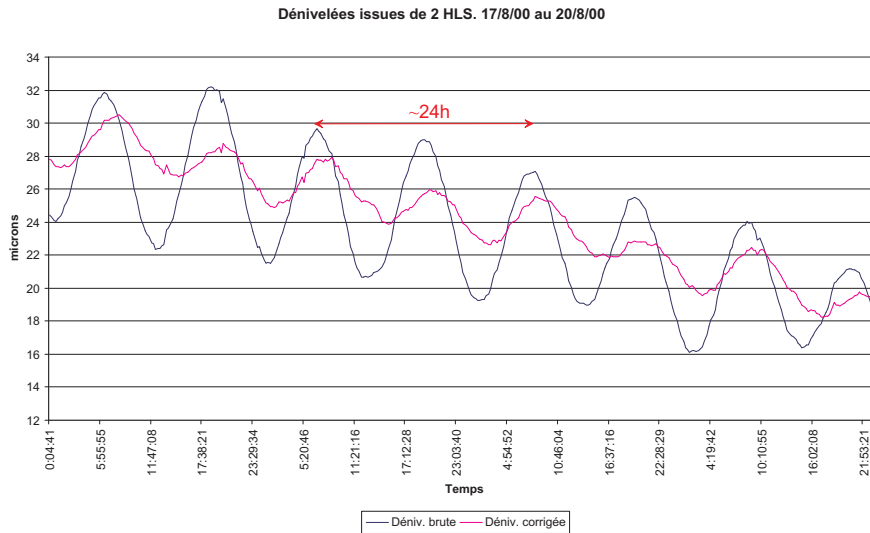


FIG. 4.15 – Différences HLS_1-HLS_2 : brute et corrigée de l'effet des marées aquatique et terrestre

à la précision des données utilisées dans (4.20), mais correspondent aussi à d'autres phénomènes, qui restent à cerner et qui peuvent correspondre à des défauts d'alignement : mouvements périodiques du sol autres que ceux dus aux marées terrestres (effets thermiques, alternance nuit/jour, ...), échauffement local de l'eau, ...

Il nous faut savoir si ce signal corrigé traduit bien des variations de hauteur par rapport à une droite rectiligne qui tangue sous l'effet des marées, ou si la correction apportée doit être améliorée. La formule (4.20) est en effet très générale, et il est possible en analysant des enregistrements in situ couvrant une période de 1 à 3 mois de définir les paramètres de marées correspondant à un emplacement particulier (renseignement communiqué par M. Ducarme de l'Observatoire Royal de Belgique lors d'une conversation téléphonique). C'est une solution qui sera certainement retenue pour le CLIC. En effet les HLS feraient partie des premiers équipement installés, et tout le temps nécessaire serait donc disponible pour effectuer les enregistrements permettant d'établir un modèle local des marées.

Voyons aussi si les paramètres utilisés pour calculer les corrections sont connus avec

suffisamment de précision.

Précision des corrections Il est nécessaire d'évaluer la précision des corrections que nous calculons à l'aide de (4.20). Le tableau 4.7 récapitule les précisions des paramètres utilisés dans le test illustré par la figure 4.15. Les précisions indiquées pour z_l et z_s sont en fait les moyennes calculées sur un an. Pour un corps céleste donné z s'obtient en effet comme suit :

$$\cos z = \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos(\theta - \alpha) \quad (4.21)$$

Où : φ est la latitude du lieu considéré $\sigma_\varphi \simeq \pm 5\text{m}$ (pour notre test)

δ est la déclinaison, un angle entre l'astre considéré et le plan équatorial

$\sigma_{\delta_l} = \pm 0.03''$ pour la Lune et $\sigma_{\delta_s} = \pm 0.3''$ pour le Soleil

θ est le temps sidéral au lieu considéré $\sigma_\theta = \pm 1.2 \cdot 10^{-7}\text{h}$

α est l'ascension droite, un angle entre l'astre considéré et le méridien origine

$\sigma_{\alpha_l} = \pm 0.03''$ pour la Lune et $\sigma_{\alpha_s} = \pm 0.3''$ pour le Soleil

Paramètre	Type	Précision
m_l	constante physique	$\pm 1 \cdot 10^{-9}$
m_s	constante physique	$\pm 1 \cdot 10^{-2}$
z_l	éphémérides et géodésie	$\pm 0,14''$
z_s	éphémérides et géodésie	$\pm 0,32''$
r_l	éphémérides	$\pm 4\text{m}$
r_s	éphémérides	$\pm 15\text{km}$
a	géodésie	$\pm 5\text{m}$

TAB. 4.7 – Précisions des paramètres utilisés pour le calcul des corrections de marées

Les nombres de Love sont connus avec suffisamment de précision pour les considérer exacts (on connaît aujourd'hui jusqu'à leur sixième décimale mais la première suffit pour nos besoins). Nous avons calculé la précision a priori des corrections apportées, pour une période d'une année. La figure 4.16 illustre les résultats obtenus.

On s'aperçoit que la précision a priori des corrections que nous apportons reste toujours bien meilleure que $\pm 1\mu\text{m}$. Ce résultat est pour l'instant tout à fait satisfaisant et pourra être amélioré encore le cas échéant. En effet, les points que nous avons considéré pour notre essai n'étaient positionnés qu'à $\pm 5\text{m}$ par rapport au centre de la Terre, alors que les méthodes de géodésie actuelles permettent aisément d'atteindre une précision meilleure que $\pm 1\text{m}$. A titre indicatif, avec cette dernière valeur, la précision des corrections apportées aux lectures HLS serait d'environ $\pm 0,3\mu\text{m}$.

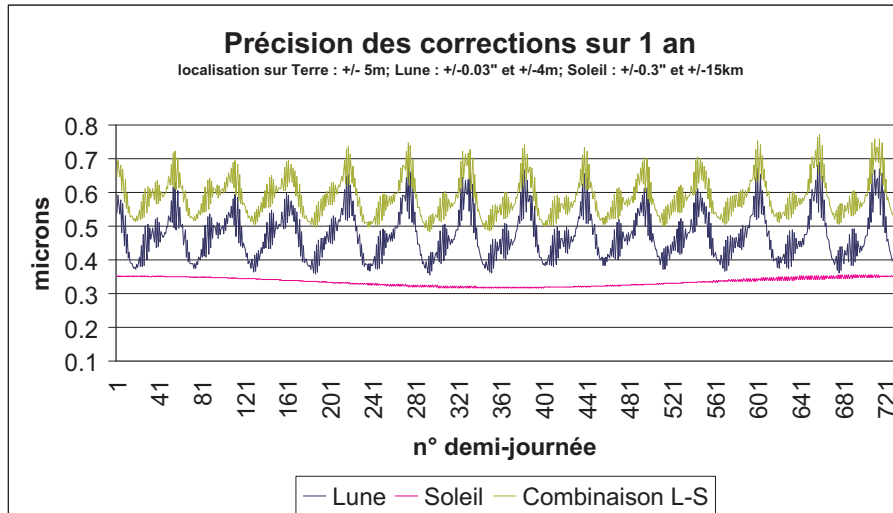


FIG. 4.16 – Précision des corrections apportées aux lectures HLS

4.2.4 Utilisation des TMS

Les angles donnés par les TMS sont des angles par rapport à la verticale locale. Cette dernière étant déviée, il nous faudra éventuellement apporter des corrections aux lectures faites sur les inclinomètres de manière à pouvoir ramener nos calculs à un repère nous permettant de maîtriser la ligne droite du CLIC. Nous allons donc étudier dans quelle mesure la déviation de la verticale altère l'information obtenue des TMS et quelles sont les éventuelles corrections à apporter.

4.2.4.1 Effet de l'attraction luni-solaire

D'après Melchior [18], la déviation de la verticale due à l'attraction de la Lune et du Soleil ne dépasse pas $0.05''$, c'est-à-dire $2.4 \cdot 10^{-7}$ rad. Or la précision des capteurs TMS n'est actuellement que de 10^{-6} rad : la déviation est imperceptible. *L'effet de l'attraction luni-solaire sur l'utilisation des TMS est donc négligeable avec l'équipement actuel.*

4.2.4.2 Effet des masses avoisinantes

La figure 4.1 illustre l'effet des masses avoisinantes sur la direction de la verticale locale. Les résultats présentés dans Bell [1] indiquent sur le site du CERN des déviations de l'ordre de la seconde sexagésimale ($4.8\mu\text{rad}$) avec un maximum de $15''$. Ces valeurs sont suffisamment importantes pour altérer sensiblement l'information donnée par les TMS et leur effet doit être corrigé pour atteindre la fiabilité de $1\mu\text{rad}$ qu'on peut attendre du capteur. Un modèle suffisamment précis du géoïde local, duquel les déviations de la verticale puissent être déduites avec une précision meilleure que $\pm 1\mu\text{rad}$, s'avère donc

nécessaire, tout comme pour les HLS.

4.3 Synthèse des effets de la gravité

Les conséquences des perturbations du champ de gravité sur l'alignement du CLIC ont été étudiées.

La non-uniformité du champ de pesanteur ainsi que la déviation de la verticale sont susceptibles de déformer sensiblement les fils des WPS, mais ces deux effets peuvent facilement être corrigés.

Dans la configuration CLIC, pour l'utilisation des HLS, il sera nécessaire de prendre en compte l'effet des déformations du géoïde ainsi que celui de l'attraction luni-solaire.

Les perturbations engendrées par les déformations du géoïde nécessitent une définition très précise des équipotentielles de la pesanteur; une étude complémentaire devra être menée pour déterminer si les techniques actuelles permettent d'atteindre le niveau de précision requis. Si tel ne devait pas être le cas, l'utilisation des HLS pour le CLIC serait fortement compromise et il faudrait alors mettre au point une solution alternative qui puisse servir de référence verticale.

L'effet de la Lune et du Soleil, que nous avons corrigé lors d'essais que nous avons effectués, semble pouvoir être cerné avec la précision requise.

L'utilisation des inclinomètres est soumise aux mêmes restrictions que les niveaux hydrostatiques en ce qui concerne la connaissance des équipotentielles de la pesanteur et donc des déviations de la verticale.

Chapitre 5

Développement d'un logiciel de calcul

Nous avons vu au chapitre précédent que le champ de gravité terrestre était à l'origine de certaines difficultés pour l'emploi, à un niveau de précision satisfaisant, des techniques métrologiques que nous avons retenues. Les résultats que nous avons présentés nous permettent cependant de supposer raisonnablement que la majorité de ces problèmes peuvent être surmontés ou qu'il devrait être possible de les contourner.

Nous avons donc fait l'hypothèse qu'il existait une solution à chacune des difficultés présentées au chapitre 4. Cela nous a permis de poursuivre la démarche conduisant à une configuration optimale du système d'alignement.

Cette démarche consistait principalement à réaliser des simulations informatiques permettant de déterminer les précisions d'alignement obtenues avec les différentes variantes possibles du réseau métrologique. Nous avons donc besoin d'un outil performant de calcul de compensation par les moindres carrés qui nous permette d'analyser la propagation des erreurs et ainsi d'optimiser le réseau.

Le logiciel LGC¹ développé et utilisé dans le groupe de métrologie du CERN à l'époque de notre étude répondait à ce genre de besoins. Il présentait cependant l'inconvénient majeur de ne pas permettre de traiter les observations bidimensionnelles d'écart au fil et de distances entre fils. Ce logiciel, dont le code source représente environ 10 000 lignes de langage Fortran, avait subi de nombreuses mises à jour si bien que sa maintenance était devenue très difficile.

Cela explique qu'un effort important de ce travail de thèse a été consacré au développement d'un nouveau outil, appelé *LGC++*. Nous présentons dans ce chapitre les éléments importants de cette partie de notre étude, qui au-delà du projet CLIC devait permettre d'aboutir à un outil adapté à tous les projets de recherche en métrologie menés au CERN. Nous commencerons par présenter le modèle mathématique de simulation et de résolution de systèmes métrologiques surdéterminés mis en œuvre dans le logiciel. Nous exposerons

¹Logiciel Général de Compensation

ensuite les aspects essentiels de la méthodologie adoptée pour l'élaboration du logiciel. Nous poursuivrons par la description du modèle sur lequel ce dernier repose. Nous finirons par une section dédiée à quelques points importants de l'implémentation de ce modèle.

5.1 Simulation et résolution de réseaux métrologiques surdéterminés

La méthode des moindres carrés est très couramment utilisée dans de nombreuses disciplines pour la détermination de paramètres inconnus liés par un modèle mathématique connu à des observations redondantes. C'est une des méthodes que le logiciel que nous avons développé peut mettre en œuvre, et c'est celle qui a été utilisée dans les simulations pour le CLIC. Nous allons dans cette section en présenter les aspects essentiels.

5.1.1 Grandeurs et notations

Considérons dans ce qui suit que nous cherchons à déterminer u paramètres inconnus notés x_j , avec $j = 1 \dots u$. Leurs valeurs ajustées sont notées X_j , avec $j = 1 \dots u$.

La détermination de ces paramètres est basée en partie ou totalement sur un nombre n d'observations dont les valeurs brutes sont notées l_i , avec $i = 1 \dots n$. Ces observations sont affectées d'erreurs accidentelles dont on suppose que la distribution est normale. La différence entre la valeur la plus probable L_i de l'observation, connue après détermination des paramètres, et sa valeur brute l_i est appelée le *résidu* noté v_i .

Les observations sont en général pondérées en fonction de leur précision. Plus une observation est précise, plus son poids noté p_i est fort. Généralement la valeur attribuée à ce poids est l'inverse de l'écart moyen quadratique de l'observation.

Nous avons donc :

- u paramètres inconnus x_j , $j = 1 \dots u$;
- n observations l_i , $i = 1 \dots n$;
- n résidus $v_i = L_i - l_i$, $i = 1 \dots n$.

5.1.2 Principe de la méthode

On démontre que la valeur la plus probable du vecteur X des inconnues est obtenue lorsque la somme pondérée des carrés des résidus est minimale.

La détermination des paramètres inconnus est donc basée sur la réalisation de la condition suivante :

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot v_i^2 = \text{minimum} \quad (5.1)$$

5.1.3 Equations d'observations, équations de condition

Le modèle mathématique connu entre les observations et les paramètres inconnus s'exprime par un système de r équations qui ont la forme suivante :

$$f(x_1, \dots, x_u, l_1, \dots, l_n) = 0$$

La méthode des moindres carrés ne peut s'appliquer que lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$n + u > r > u$$

La quantité $r - u$ est appelée *redondance* ou *degré de liberté* du système d'équations.

Il arrive très souvent que les observations puissent explicitement être exprimées en fonction des paramètres. Dans ce cas les équations correspondantes sont appelées *équations d'observation* et sont de la forme :

$$L_i = f_i(X_1, \dots, X_u)$$

Il est possible également que ces équations expriment des conditions entre les observations, sans faire intervenir les paramètres. On parle dans ce cas-là d'*équations de condition* qui sont de la forme :

$$g_k(L_1, \dots, L_n) = 0$$

Le système surdéterminé dont la résolution doit conduire à la détermination des paramètres a donc la forme ci-dessous. Nous supposons que toutes les équations sont des équations d'observation ou de condition, ce qui était le cas dans notre étude.

$$\left\{ \begin{array}{ll} L_1 & = f_1(X_1, \dots, X_u) \\ \vdots & \vdots \quad \vdots \\ L_n & = f_n(X_1, \dots, X_u) \\ g_1(L_1, \dots, L_n) & = 0 \\ \vdots & \vdots \quad \vdots \\ g_c(L_1, \dots, L_n) & = 0 \end{array} \right. \quad (5.2)$$

5.1.4 Linéarisation

Les équations du système 5.2 présentent l'inconvénient de ne pas être affines. Sous cette forme le système ne peut pas être résolu selon une méthode systématique. On procède donc à des développements limités, selon la formule de Taylor. A cet effet on calcule des valeurs approchées pour les paramètres, que nous noterons X_j^0 .

Les équations d'observation deviennent ainsi :

$$l_i + v_i = f_i(X_1^0, \dots, X_u^0) + \frac{\delta f_i}{\delta x_1} (X_1 - X_1^0) + \dots + \frac{\delta f_i}{\delta x_u} (X_u - X_u^0) \quad (5.3)$$

En posant :

$$l_i^0 = f_i(X_1^0, \dots, X_u^0) \quad (5.4)$$

L'équation 5.3 s'écrit encore :

$$\sum_{j=1}^u \frac{\delta f_i}{\delta x_j} (X_j - X_j^0) = l_i - l_i^0 + v_i \quad (5.5)$$

Remarques :

- les inconnues du système ne sont plus les paramètres mais les ajustements $(X_j - X_j^0)$ qui y sont apportés ;
- les dérivées partielles sont calculées en attribuant aux paramètres leurs valeurs approchées ;
- les termes d'ordre supérieur à 1 sont négligés dans les développements de Taylor.

Les équations de condition sont elles aussi linéarisées :

$$g_k(l_1, \dots, l_n) + \frac{\delta g_k}{\delta l_1} (L_1 - l_1) + \dots + \frac{\delta g_k}{\delta l_n} (L_n - l_n) = 0 \quad (5.6)$$

L'équation 5.6 s'écrit encore :

$$g_k(l_1, \dots, l_n) + \sum_{i=1}^n \frac{\delta g_k}{\delta l_i} (v_i) = 0 \quad (5.7)$$

5.1.5 Notations matricielles

Les notations matricielles suivantes peuvent être adoptées pour les éléments du système 5.2 :

- A : matrice $((n + c) \times u)$ des coefficients $\delta f_i / \delta x_j$ (les c dernières lignes sont nulles) ;
- B : matrice $((n + c) \times n)$ des coefficients $\delta g_k / \delta l_i$ (les n premières lignes sont nulles) ;
- L : vecteur-colonne à n lignes des valeurs brutes des observations l_i ;
- V : vecteur-colonne à n lignes des résidus v_i des observations ;
- P : matrice $(n \times n)$ des poids des observations. Dans le cas le plus répandu d'observations indépendantes, cette matrice est diagonale et l'élément à la position (i, i) est le poids de l'observation l_i ;

- X : vecteur-colonne à u lignes des corrections d'ajustement ($X_j - X_j^0$ à apporter aux paramètres ;
- W : vecteur-colonne à $(n + c)$ lignes des valeurs approchées des fonctions f_i et g_k (les n premières lignes sont occupées par les valeurs $f_i(X_1^0, \dots, X_u^0)$, les c dernières par les valeurs $g_k(l_1, \dots, l_n)$).

Avec ces notations le système 5.2 linéarisé peut s'écrire sous forme d'équation matricielle :

$$W + AX + BV = 0 \quad (5.8)$$

Lorsqu'il n'y a que des équations d'observation, ce qui était le cas dans les calculs que nous avons effectués, cette équation prend la forme simplifiée suivante :

$$W + AX - V = 0 \quad (5.9)$$

5.1.6 Détermination des inconnues du système surdéterminé

La condition des moindres carrés 5.1 s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$${}^tVPV = \text{minimum} \quad (5.10)$$

En appliquant cette condition au modèle mathématique linéarisé 5.8, on parvient à résoudre le système.

L'expression générale des corrections d'ajustement est la suivante :

$$X = - \left({}^tA(BP^{-1}{}^tB)^{-1}A \right)^{-1} \cdot {}^tA(BP^{-1}{}^tB)^{-1}W \quad (5.11)$$

Les résidus des observations s'obtiennent par :

$$V = -P^{-1}{}^tB \left(BP^{-1}{}^tB \right)^{-1} (AX + W) \quad (5.12)$$

On définit le facteur de variance comme étant la quantité :

$$\sigma_0^2 = \frac{{}^tVPV}{r - u} \quad (5.13)$$

Cette quantité peut être considérée comme la précision d'une observation de poids 1.

La précision avec laquelle les inconnues sont déterminées se déduit de la matrice Σ_X des variances/covariances des inconnues qui se calcule de la manière suivante :

$$\Sigma_X = \sigma_0^2 \left({}^tA(BP^{-1}{}^tB)^{-1}A \right)^{-1} \quad (5.14)$$

Lorsqu'il n'y a que des équations d'observations cette expression se simplifie et devient :

$$\Sigma_X = \sigma_0^2 ({}^t APA)^{-1} \quad (5.15)$$

L'écart-type du paramètre X_j se déduit du terme d'indice j de la diagonale de la matrice Σ_X :

$$\sigma_{X_j} = \sigma_0 \sqrt{\Sigma_{X_{j,j}}} \quad (5.16)$$

5.1.7 Processus itératif

Lorsque les inconnues du système sont déterminées, les corrections d'ajustement sont apportées aux paramètres approchés afin d'obtenir leurs valeurs ajustées.

On fixe en général un critère de convergence qui permet de savoir si la solution du système est stable ou si une itération additionnelle du calcul est nécessaire. On estime que la solution est stable lorsqu'aucune des corrections d'ajustement n'est supérieure en valeur absolue au critère de convergence.

S'il s'avère qu'une itération supplémentaire est nécessaire, les valeurs ajustées des paramètres sont utilisées comme valeurs approchées pour cette itération supplémentaire.

5.1.8 Méthode de simulation

Le principe des simulations est d'attribuer des valeurs simulées aux observations du réseau. Cela permet de calculer ensuite ce dernier comme s'il s'agissait d'un réseau réellement observé, et d'estimer l'effet des perturbations pouvant affecter sa géométrie. S'agissant d'une première étude du réseau, ces perturbations furent dans notre cas limitées aux erreurs gaussiennes des mesures.

Dans la méthode de simulation employée au CERN (Mayoud [16]), les valeurs provisoires des inconnues sont considérées comme idéales. Elles sont utilisées dans le programme pour calculer la valeur idéale de chaque observation. Un générateur de nombres gaussiens ajoute ensuite à cette valeur idéale une erreur de mesure aléatoire en tenant compte de l'écart-type a priori de la mesure. Renouveler cette opération plusieurs fois permet d'obtenir un ensemble de réseaux à compenser.

Les statistiques issues des résultats de cet ensemble de réseaux donnent alors une très bonne indication de l'aptitude du réseau modélisé à répondre aux objectifs que l'on s'est fixé.

5.2 Méthodologie Orientée-Objet

Le logiciel de calcul développé pour mener ces simulations devait répondre aux critères suivants :

- grande souplesse de mise à jour, afin de pouvoir être adapté facilement aux différents projets de métrologie et à l'évolution de ces derniers ;
- clarté et modularité du modèle sous-jacent, afin que plusieurs personnes puissent développer chacune des parties distinctes du logiciel et que ces développements puissent ensuite être combinés sans difficulté.

Ces critères nous ont amenés à choisir une approche Orientée-Objet (OO) pour le développement de cet outil. On parle souvent de la programmation par objets comme d'un *paradigme*, un ensemble de théories, standards et méthodes qui représentent une façon d'organiser les connaissances (Budd [3]). Cette technique a pris son essor au courant des années 1990 et constitue une nouvelle façon de concevoir les calculs et de structurer les informations, par rapport par exemple au langage Fortran très populaire dans le milieu scientifique. Nous allons présenter ci-dessous les aspects essentiels de ce paradigme. Nous verrons qu'il permet d'aborder un problème avec des méthodes très familières pour celui qui les met en œuvre, puisqu'elles sont très semblables à celles employées dans la vie quotidienne.

5.2.1 Objets, messages et méthodes, attributs

En programmation OO, l'action est déclenchée par la transmission d'un message à un agent (un objet) *responsable* de l'action. Le code du message indique l'action demandée ; on l'accompagne d'informations complémentaires (les arguments) nécessaires à son exécution. Si l'agent accepte le message, il s'engage à répondre à la demande, et va pour ce faire appliquer une méthode. On peut faire l'analogie avec la démarche que nous employons souvent et qui nous amène à nous adresser à la personne dont les responsabilités la rendent susceptible de répondre à une certaine requête. C'est autour de cette notion de responsabilités que les comportements sont structurés et décrits dans une application OO.

Les notions de collaboration entre objets et de masquage de l'information font également partie des fondements du paradigme de l'Orientation Objet. En effet, selon le principe de délégation qui lui aussi nous est familier, un objet va très souvent s'adresser à d'autres objets qui vont effectuer des tâches, lui permettant ainsi de répondre au message qu'on lui a adressé. On parle de masquage de l'information parce que l'expéditeur du message n'a pas besoin de savoir par quels moyens ou avec quelles données sa demande sera réalisée.

Les objets n'ont pas seulement des méthodes, mais ils ont aussi des attributs qui les caractérisent. Ainsi on retrouve dans notre programme des objets représentant des longueurs auxquels on peut envoyer des messages leur demandant de renvoyer leur valeur dans différentes unités. Ces objets doivent bien sûr renfermer un attribut numérique dans lequel est stocké la longueur représentée. Les objets sont donc définis par leur comportement (leur réponse aux messages qu'on leur adresse) ainsi que par leur état décrit par leurs attributs.

5.2.2 Classes et instances, héritage

Le logiciel que nous avons développé fait bien sûr intervenir des objets qui représentent les positions spatiales intervenant dans le calcul. Il serait très fastidieux d'écrire un code spécifique à chacun de ces objets, d'autant plus qu'on attend d'eux qu'ils aient le même comportement.

Cela nous amène à une autre notion essentielle de la programmation OO, celle de *classes* et *instances*. Tous les objets sont les instances d'une classe; la méthode invoquée par un objet en réponse à un message est déterminée par sa classe. Tous les objets d'une classe donnée utilisent la même méthode en réponse au même message et ont la même structure d'attributs.

De plus, des classes peuvent partager certaines de leurs caractéristiques. On peut considérer par exemple qu'une observation de distance horizontale et une observation de distance zénithale ont toutes les deux un point visé qu'on peut leur demander d'indiquer. Ces propriétés communes peuvent être décrites une seule fois dans le code grâce à la notion d'*héritage*. Les classes peuvent être organisées en une structure hiérarchique. Une *sous-classe* hérite des propriétés d'une *superclasse* plus élevée dans l'arbre d'héritage. Ainsi, dans notre modèle, les classes représentant les distances horizontales et zénithales vont-elles toutes deux hériter d'une superclasse renfermant les propriétés communes à toutes les observations visant un point (fig. 5.1), et le code décrivant ces propriétés peut n'être écrit qu'une seule fois. Une telle superclasse est appelée une *superclasse abstraite* car elle est destinée uniquement à la création de sous-classes et n'a pas d'instances propres.

5.2.3 Polymorphisme

L'envoi d'un message peut sembler très similaire à l'appel d'une procédure, dans lequel on retrouve le masquage de l'information. En effet l'action y est déclenchée par un appel de procédure, qui pour répondre à la demande peut elle-même faire appel à d'autres procédures.

La différence essentielle se situe cependant dans l'interprétation du message. En effet,

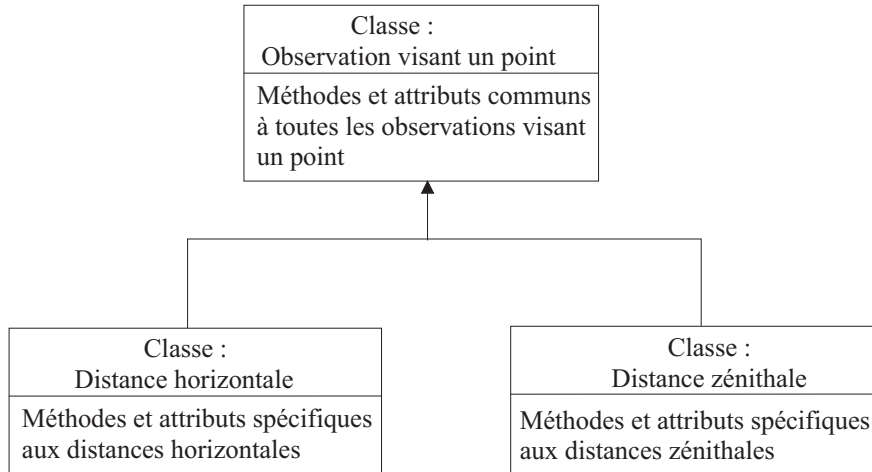


FIG. 5.1 – Classes et héritage

un *receveur*, l'agent destinataire, est désigné à l'intérieur de tout message. Des receveurs différents peuvent être destinataires du même message et employer chacun une méthode différente pour répondre à celui-ci. Il arrive souvent que le receveur désigné ne soit pas connu avant l'exécution du message. C'est pourquoi on dit qu'il y a une liaison *différée* entre le message (fonction ou nom de procédure) et le code (méthode) utilisé pour y répondre. Cette situation contraste avec la liaison prédéfinie des noms avec des parties de code (à la compilation ou à l'édition de liens) dans les appels de procédure traditionnels. Le fait que des receveurs de classes différentes puissent répondre au même message est appelé *polymorphisme* et constitue également un des fondements de la programmation par objets.

5.2.4 La programmation vue comme une simulation

Il se dégage de cet aperçu de la méthodologie Orientée-Objet que les programmes sont vus comme une grande famille d'agents autonomes, les objets. Chaque objet est responsable de tâches spécifiques. C'est par l'interaction des objets que le programme fonctionne. Programmer devient alors une *simulation* d'un modèle de l'univers.

Il est également important de noter que cette méthodologie réduit l'interdépendance des composants logiciels et permet ainsi le développement de systèmes informatiques réutilisables. Lors de notre travail nous avons pu constater que de tels composants peuvent être créés et testés comme des entités indépendantes, sans interaction avec d'autres parties du code. Cela a beaucoup facilité la répartition du travail en équipe ainsi que sa mise en commun.

Cette méthodologie rend également plus aisée la phase de modélisation puisqu'elle permet aux programmeurs de voir les problèmes d'un point de vue plus abstrait. On

peut en effet définir les objets et les manipuler simplement à l'aide des messages qu'ils comprennent, avec une description des tâches qu'ils ont à effectuer, sans entrer dans les détails de l'implémentation.

5.3 Modèle objet du logiciel

Nous allons dans cette section présenter la modélisation Orientée-Objet qui a été adoptée pour ce logiciel. Cela illustrera les concepts de la méthodologie OO que nous avons présentés précédemment.

Pour la clarté de l'exposé nous distinguerons les différents groupes fonctionnels que comprend ce modèle. Nous illustrerons notre propos par des diagrammes conformes aux conventions UML² qui sont présentées dans la figure 5.2.

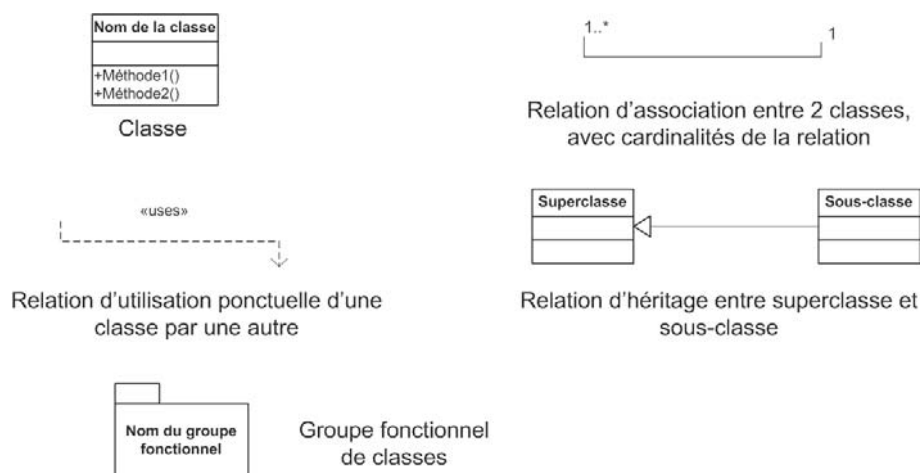


FIG. 5.2 – Notations UML

5.3.1 Données de base

Le modèle du logiciel comprend un groupe fonctionnel pouvant être désigné comme les données de base. Les objets de ce groupe ont pour but de représenter le réseau métrologique qui fait l'objet du calcul. On y retrouve donc toutes les observations, les contraintes ainsi que les points et objets-cible qu'elles mettent en jeu. La plupart de ces éléments sont identifiés par un attribut alphanumérique. L'organisation de ce groupe fonctionnel est décrit par la figure 5.3. Dans la modélisation du réseau métrologique que nous avons adoptée pour *LGC++*, toutes les observations sont faites depuis une station instrument. Certaines de ces stations sont susceptibles d'accueillir une ou plusieurs séries de mesures alors que d'autres n'accueillent toujours qu'une observation unique.

²Unified Modeling Language

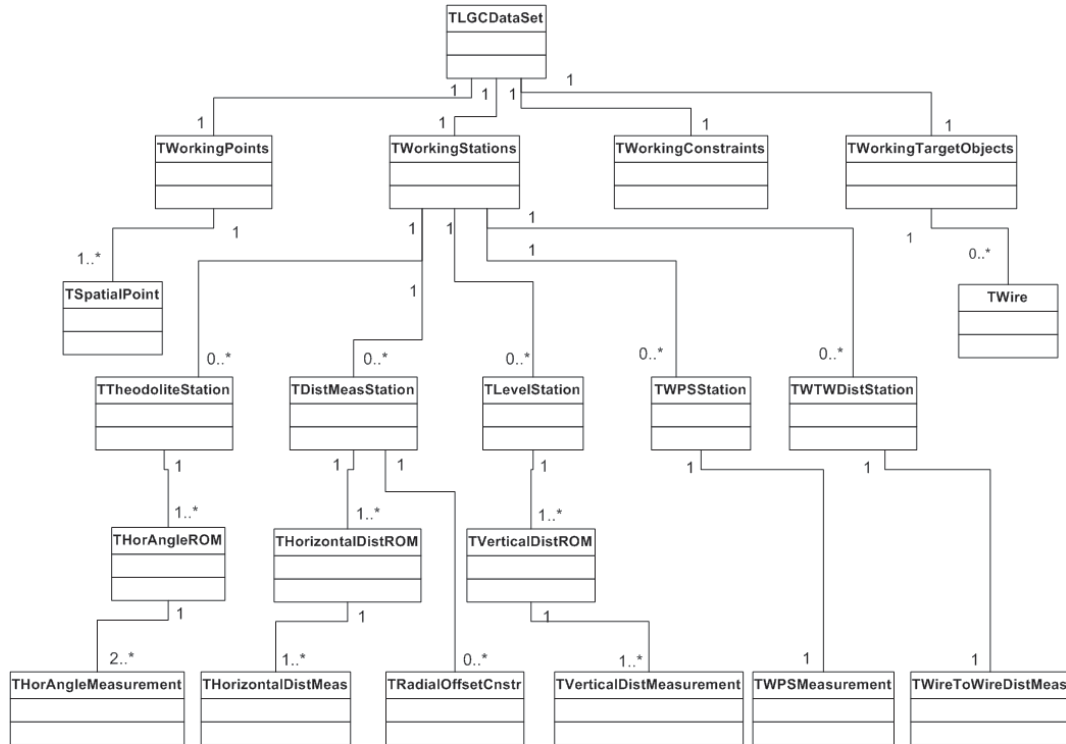


FIG. 5.3 – Données de base

Les responsabilités des différents objets de la figure 5.3 sont les suivantes :

- un objet `TLGCDataSet` regroupe et donne accès à toutes les données de base ;
- les trois données membres principales de cet objet sont des instances de `TWorkingStations`, `TWorkingPoints`, `TWorkingTargetObjects` et `TWorkingConstraints` dont les responsabilités respectives sont de stocker et donner accès à toutes les stations instruments, tous les points, tous les objets-cible et toutes les conditions entre observations du réseau modélisé ;
- les objets dont le nom finit en `Station` représentent les différents types d’instruments de mesure modélisés dans *LGC++* ;
- les objets dont le nom finit en `ROM` sont des séries de mesures qui accueillent une ou plusieurs observations individuelles ;
- les objets dont le nom finit en `Measurement` ou `Meas` représentent les observations individuelles.

Le modèle objet comprend un certain nombre de superclasses abstraites desquelles héritent les classes dont sont issus les objets des données de base. Les relations d’héritage correspondantes sont données sur la figure 5.4. Les méthodes des superclasses indiquées sur cette figure sont héritées par les sous-classes, leur implémentation étant décrite une seule fois au niveau de la superclasse. Ainsi par exemple, la superclasse abstraite `TAMeasurement`

comprend-elle la définition de la méthode `getTargetPoint()` qui permet d'accéder au point visé par les mesures que les instances des classes qui en héritent représentent.

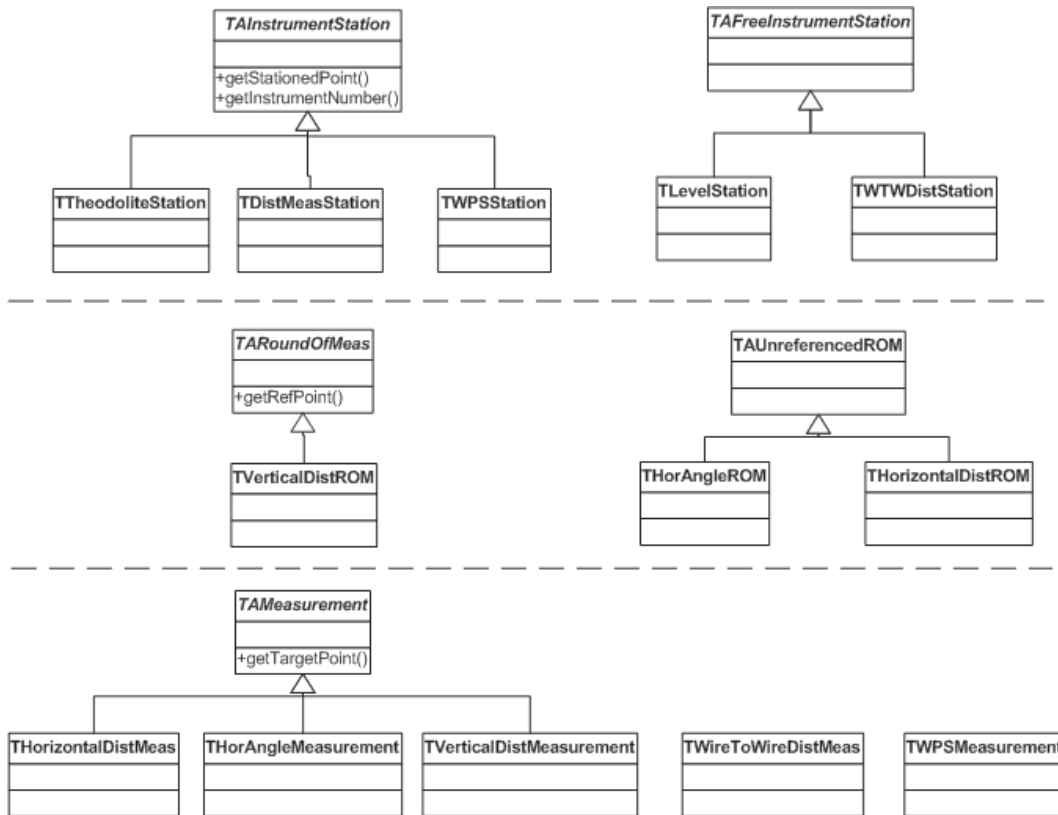


FIG. 5.4 – Relations d'héritage pour les données de base

L'ensemble de ces données de base et en particulier les valeurs numériques qu'elles contiennent ne sont pas modifiées durant le calcul. En effet, afin de pouvoir par exemple appliquer des méthodes de compensation différentes au même réseau, le modèle que nous avons élaboré prévoit que toutes les opérations de calcul se fassent sur des jeux de données distincts de ces données de base.

5.3.2 Données de calcul

Les calculs n'agissent donc pas directement sur les données de base mais sur un jeu de données qui est issu de celles-ci et qu'on peut désigner comme les données de calcul. Nous avons prévu que *LGC++* utilise un jeu de données de calcul différent pour chaque méthode de compensation pouvant être appliquée au même jeu de données de base. De plus, cette organisation permet d'enchaîner plusieurs simulations sans avoir à recharger les valeurs approchées des paramètres entre chacune de ces simulations.

La seule méthode que nous avons mise en œuvre dans le cadre de notre étude est la méthode des moindres carrés. La figure 5.5 présente donc le modèle-objet des données de calcul pour une compensation par les moindres carrés. Le préfixe LSCalc des noms de classes est une abréviation de "Least Squares Calculation".

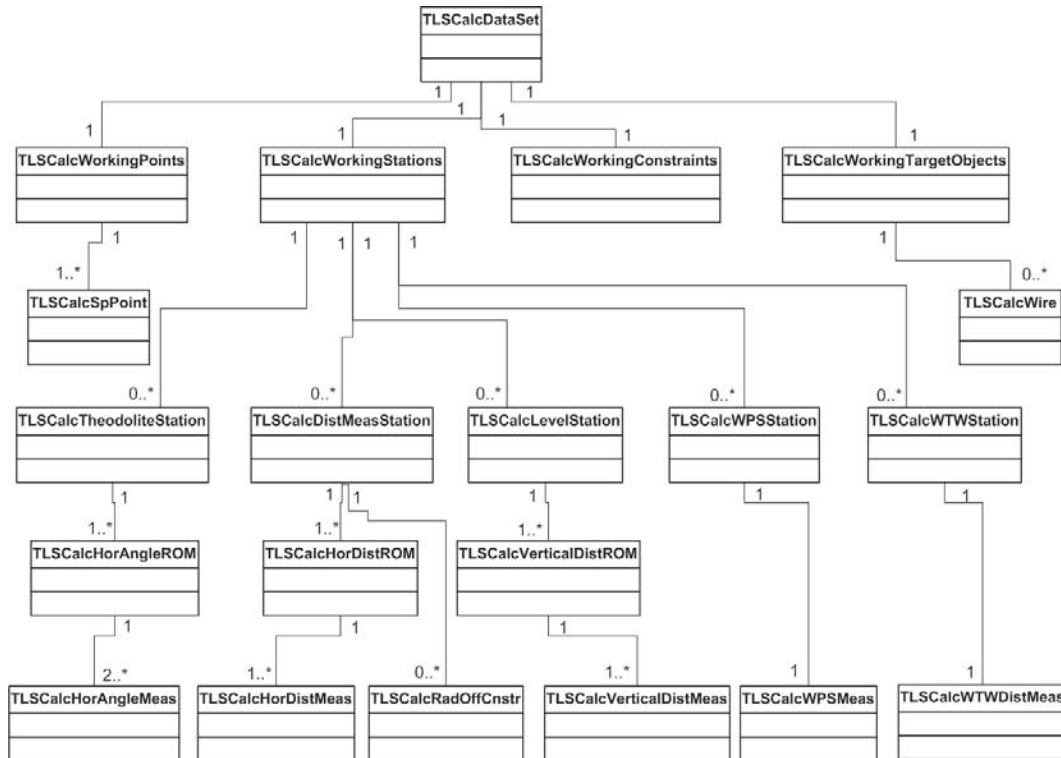


FIG. 5.5 – Données de calcul

L'analogie du modèle de la figure 5.5 avec celui de la figure 5.3 est très grande. Les objets qui appartiennent aux données de calcul s'initialisent à partir des données initiales, en ne copiant d'elles que ce qui leur est nécessaire. Les informations comme les attributs alphanumériques servant à identifier les éléments ne sont donc pas reproduites. Elles peuvent néanmoins être accédées à travers un lien gardé dans chaque objet de calcul vers son homologue des données de base.

Outre les attributs copiés des données initiales, les objets de calcul en contiennent d'autres propres au calcul, comme ceux destinés à contenir les valeurs estimées des inconnues ou les résidus des observations, ou encore des indices numériques d'inconnue, d'observation ou d'équation propres à chacun et qui permettent de repérer les éléments correspondants dans les matrices intervenant dans le calcul.

La figure 5.6 présentent les relations d'héritage entre les objets constituant les données de calcul et leurs superclasses abstraites. Là aussi l'analogie avec la figure 5.4 est grande. Les superclasses ne s'occupent plus de l'accès aux attributs alphanumériques, mais gèrent

par contre dans certains cas, comme pour `TALSCalcMeasurement`, les indices d'inconnue, d'observation et d'équation des instances de ses sous-classes.

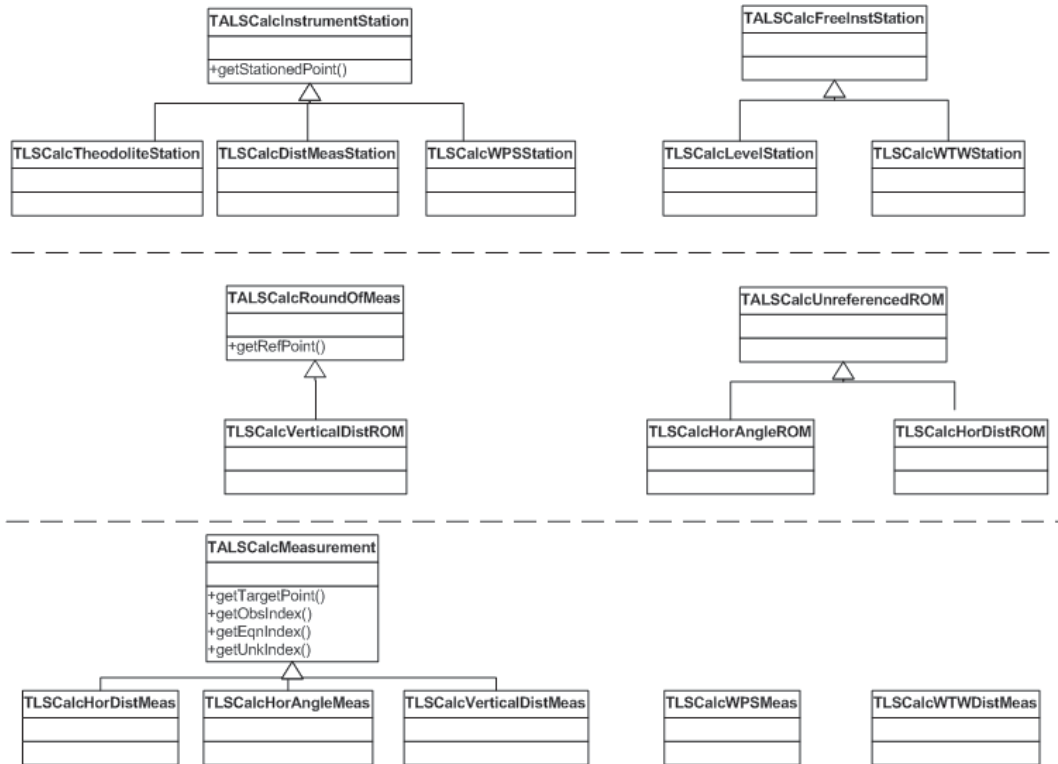


FIG. 5.6 – Relations d'héritage pour les données de calcul

5.3.3 Opérations de calcul

LGC++ met en œuvre les opérations matricielles exposées en 5.1.6 pour calculer le réseau, selon le modèle objet présenté sur la figure 5.7.

Dans ce modèle, c'est une instance de `TLSCalculation` qui est responsable de la gestion de toutes les opérations d'un calcul par les moindres carrés.

Le jeu de données de calcul `TLSCalcDataSet` étant constitué (voir 5.3.2), celui-ci est transmis à l'objet `TLSCalcInputMatricesFiller` qui a pour responsabilité d'apporter les contributions de chaque équation du système surdéterminé aux objets représentant les matrices A , B et W présentées en 5.1.5, qui sont gérées par l'instance de `TLSCalcInputMatricesFiller`.

Pour que ces contributions soient apportées aux matrices, l'objet `TLSCalcInputMatricesFiller` va déléguer ce travail et faire appel pour chaque type d'équation rencontrée à un objet spécialisé dans le calcul des contributions de ce type d'équation. Les mécanismes de polymorphisme expliqués en 5.2.3 sont utilisés afin que le code de `TLSCalcInputMatricesFiller` soit indépendant du type de référentiel dans lequel tout le calcul s'effectue. Cela veut dire que cet objet, bien que responsable du remplissage des matrices avec les coefficients

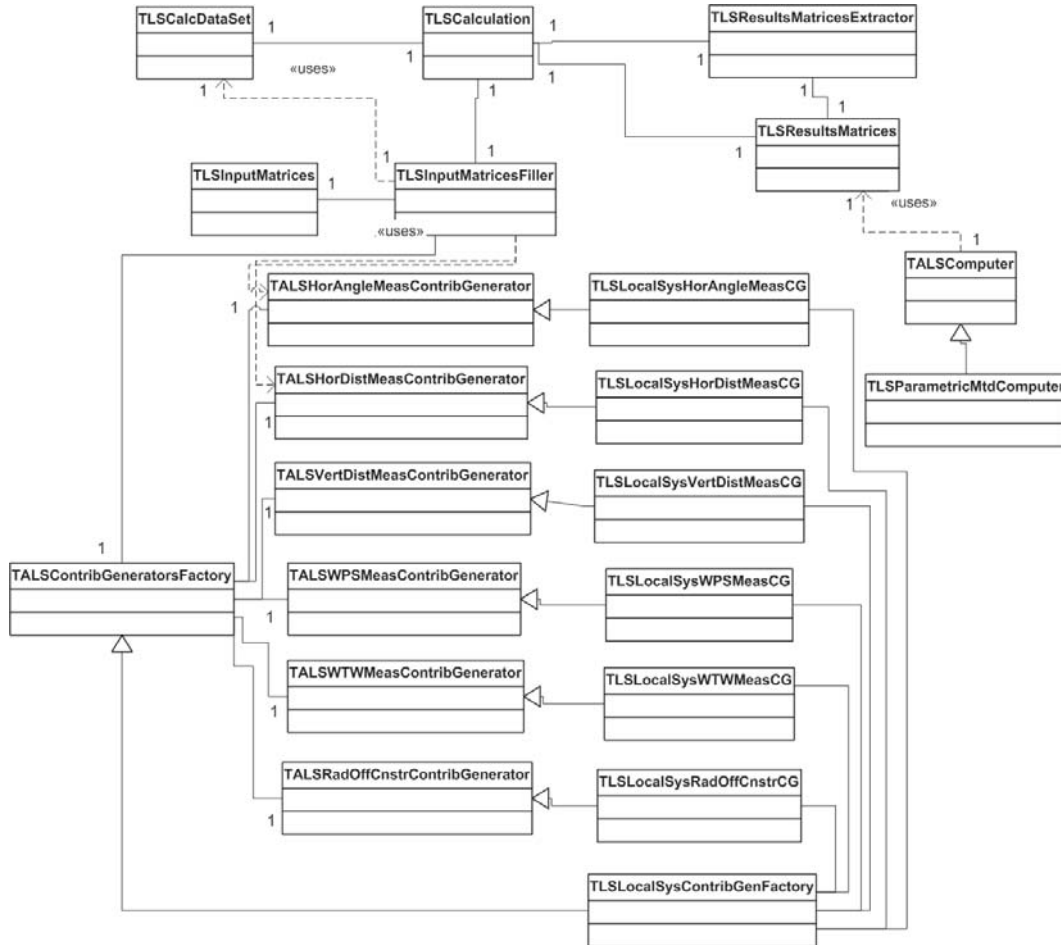


FIG. 5.7 – Opérations de calcul

appropriés, va envoyer les mêmes messages, que les mesures soient exprimées dans un système cartésien ou qu'elles soient exprimées sur un ellipsoïde et doivent donc être réduites avant calcul. Pour permettre cette transparence, son code prévoit la collaboration avec un objet de type `TALSContribGeneratorsFactory` qui a pour responsabilité de mettre à disposition les générateurs de contributions spécialisés, sous la forme d'un objet de type `TALSHorDistMeasContribGenerator` si on prend l'exemple du traitement d'une distance horizontale. Cependant les classes `TALSContribGeneratorsFactory` et `TALSHorDistMeasContribGenerator` sont des classes abstraites qui ne sont jamais instanciées. En fait c'est l'objet `TLSCalculation` qui, en réponse à un message lui indiquant le type de référentiel dans lequel le calcul se déroule, va instancier la sous-classe appropriée de `TALSContribGeneratorsFactory` et la transmettre à l'objet `TLSInputMatricesFiller` de manière transparente pour ce dernier.

Lorsque l'objet `TLSInputMatricesFiller` a terminé son travail de remplissage des matrices, l'objet `TLSCalculation` va déléguer la réalisation des opérations matricielles

à un objet de type `TALSCComputer`, dont il va instancier une des sous-classes en fonction du type d'équations que comprend le système surdéterminé à résoudre. Si par exemple le système est composé uniquement d'équations d'observation, comme c'était le cas des calculs que nous avons conduit dans le cadre de notre étude, une instance de la sous-classe `TLSParametricMtdComputer` sera utilisée. Cette manière de procéder permet d'utiliser des formes simplifiées des formules générales présentées en 5.1.6 et de réduire ainsi la durée de traitement du calcul.

Ensuite, les matrices contenant les résultats de ces opérations de calcul sont gérées par une instance de `TLSResultsMatrices`. Lorsque des résultats ont été calculés, l'objet `TLSCalculation` va faire appel à une instance de `TLSResultsMatricesExtractor` dont la responsabilité est d'interroger séquentiellement les données de calcul afin d'obtenir leurs indices et de retrouver et extraire ainsi des matrices résultats les paramètres estimés correspondants. C'est également lors de cette opération que les résultats sont analysés pour savoir par exemple si une itération supplémentaire est nécessaire. Si oui, l'objet `TLSCalculation` demande à tous les éléments des données de calcul de se préparer pour l'itération suivante (les valeurs estimées deviennent les valeurs provisoires).

5.3.4 Vue globale du fonctionnement de `LGC++`

Le fonctionnement général d'un calcul avec `LGC++`, qui fait intervenir les groupes fonctionnels d'objets que nous avons présentés dans les sections précédentes, est illustré sur la figure 5.8.

Le seul objet à être instancié dans le corps principal du programme est une instance de la classe `TLGCApplication`. Cet objet est responsable de la lecture d'un fichier de données représentant un réseau à calculer ainsi que de l'écriture des résultats de ce calcul dans un autre fichier. En réponse au message `writeProjetSolution()`, il s'occupe également de dialoguer avec l'instance de la classe `TLGCProject` avec laquelle il collabore. C'est ce dernier objet qui va en fait mettre en œuvre les groupes fonctionnels que nous avons présentés auparavant et va permettre de fixer un certain nombre de critères pour le calcul.

Voici les actions entreprises en réponse aux messages présentés sur la figure 5.8 qu'un objet `TLGCProject` reçoit :

- `computeObservedSolution()` demande au projet de calculer une solution du réseau basée sur les valeurs mesurées des observations ;
- `runSimulations()` demande au projet d'effectuer n simulations du comportement du réseau de métrologie, selon la méthode exposée en 5.1.8 ;
- `setSimulationsNbr()` permet d'indiquer le nombre n de simulations que l'on souhaite effectuer ;

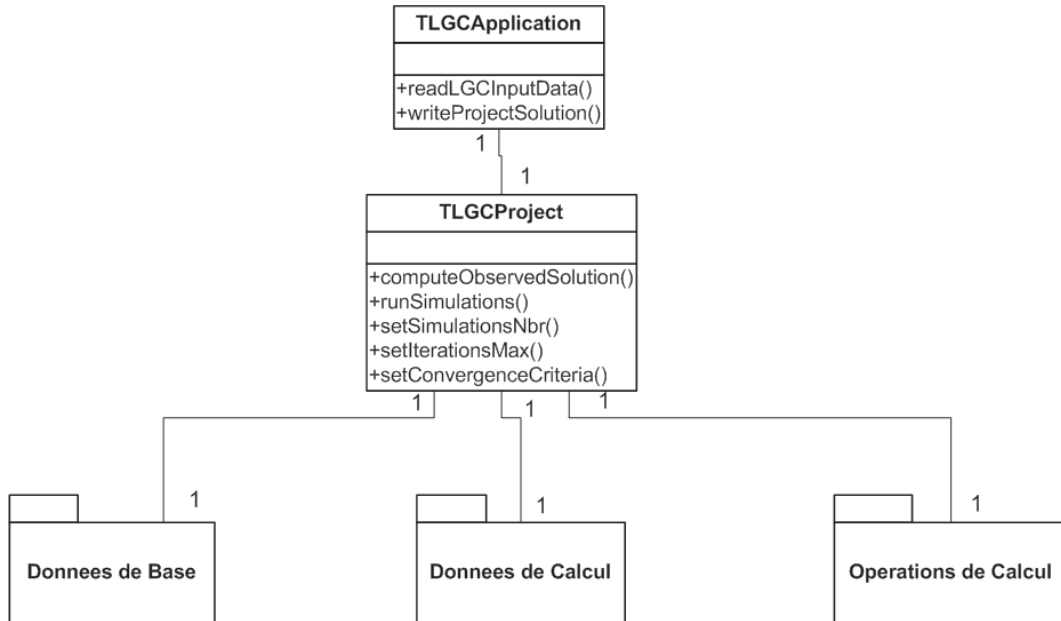


FIG. 5.8 – Fonctionnement général de LGC++

- `setIterationsMax()` permet de fixer le nombre d'itérations du calcul (voir 5.1.7) au-delà duquel on considère qu'il n'est pas possible de converger vers une solution stable ;
- `setConvergenceCriteria()` permet de fixer le critère de convergence (voir 5.1.7) qui permet de décider si une itération supplémentaire du calcul est nécessaire ;

5.3.5 Éléments importants de l'implémentation du modèle

Outre le modèle-objet présenté ci-dessus, apportons également quelques commentaires concernant son implémentation en C++, et en particulier sur la mise en œuvre des opérations matricielles ainsi que sur le stockage de grandes quantités d'éléments.

5.3.5.1 Opérations matricielles

Les opérations matricielles étant au cœur du traitement du réseau métrologique modélisé, il était crucial que ce type de calculs puissent être réalisés en satisfaisant les critères suivants :

- assurance d'un résultat juste ;
- possibilité d'effectuer des opérations sur de grandes matrices (milliers de lignes et de colonnes) ;
- rapidité d'exécution ;
- facilité d'intégration dans notre programme en C++.

La librairie mathématique NAG³ [14], disponible au CERN sous forme de librairie Fortran ou C, répondait aux quatre critères énumérés ci-dessus. C'est une librairie très complète qui couvre un grand nombre de domaines des mathématiques, et notamment les opérations matricielles. Elle est utilisée dans de nombreux domaines scientifiques et est donc solidement testée et optimisée. Le langage C++ pouvant directement utiliser des bibliothèques en C, nous avons facilement pu l'intégrer dans notre développement.

Le langage C n'étant pas orienté-objet, les matrices et les vecteurs se présentent dans cette librairie sous forme de tableaux qui sont envoyés comme arguments à des fonctions ou des procédures. Afin de rendre cette partie du code homogène avec le reste, nous avons donc enveloppé ces fonctions et ce stockage dans des classes que nous avons appelé **TMatrix** et **TColumnVector**, ce qui nous a permis de manipuler ces éléments mathématiques sous forme d'objets, d'usage plus convivial.

Les matrices de réels que nous traitons occupaient un espace mémoire considérable (donner un exemple). Etant donné que nous avons effectué tous nos calculs sur un PC équipé de 512Mo de mémoire vive, nous nous sommes retrouvés parfois dans l'impossibilité d'allouer l'espace mémoire suffisant à nos calculs (voir 6) et avons dû sectionner ceux-ci.

Or il est très fréquent, et c'était le cas dans notre étude, que les matrices d'un traitement de réseau métrologique par les moindres carrés soient des matrices à trous, dont la majorité des éléments sont en fait nuls. Des procédés de stockage et d'utilisation de telles matrices existent, qui sont optimisés pour réduire l'empreinte-mémoire de ces dernières. La librairie NAG propose certains de ces procédés mais nous n'avons malheureusement pas eu le temps de les mettre en œuvre. Cette amélioration figure en tête des prochaines étapes du développement de LGC++ dans l'optique de son utilisation pour l'étude CLIC.

5.3.5.2 Stockage de grandes quantités d'éléments

Le logiciel que nous avons développé implique la gestion des objets représentant les éléments du réseau métrologique. Ces objets sont en nombre important et requièrent donc dans le programme des structures de données appropriées pour leur stockage, leur accès et leur manipulation.

La librairie STL⁴ [11], qui fait partie intégrante du langage C++ (standard ISO), propose de telles structures de données appelées encore conteneurs. Les avantages de ces conteneurs sont les suivants :

- gestion automatique de l'allocation de mémoire lors de l'insertion d'un nouvel élément dans le conteneur ;

³Numerical Algorithms Group

⁴Standard Template Library

- mécanismes très efficaces de parcours du conteneur et de recherche d'un élément particulier ;
- rapidité d'exécution ;
- utilisation des gabarits qui permettent d'utiliser les conteneurs avec un type quelconque de données, que ce soit un des types prédéfinis de C++ ou un type utilisateur.

Les gabarits sont un mécanisme très puissant fourni par le langage C++. Ils permettent d'écrire un code unique pour une classe ou une fonction (le gabarit de classe ou de fonction) et de laisser ensuite le compilateur générer lui-même un code spécifique (classe-gabarit ou fonction-gabarit) en fonction du type de variable passée en argument à la classe ou à la fonction. Ainsi, la librairie STL propose-t-elle un gabarit de classe `list` qui permet la gestion de listes d'objets.

Nous avons beaucoup utilisé les conteneurs `list` dans notre logiciel, qui utilise ainsi ces classes-gabarit dans les données de base et les données de calcul pour gérer tous les points, toutes les stations-instrument par type, tous les observations par type, etc...

Exemples :

- une instance de classe gabarit `list< TWPSStation >` est utilisée dans les données de base pour gérer toutes les stations de mesures d'écart au fil ;
- une instance de classe gabarit `list< TSpatialPoint >` est utilisée dans les données de base pour gérer tous les points du réseau ;
- une instance de classe gabarit `list< TLSCalcVerticalDistMeas >` est utilisée dans les données de calcul pour gérer toutes les mesures de distance verticale ;

La librairie STL est un des aspects du langage C++ qui contribue à sa puissance. Nous l'avons beaucoup utilisée dans le développement de LGC++ et avons apprécié l'efficacité qu'elle permet.

Chapitre 6

Détermination de la configuration optimale du réseau

Un des objectifs majeurs de cette recherche est la définition d'un réseau de métrologie permettant de satisfaire les contraintes d'alignement du CLIC.

Nous avons vu au chapitre 4 que la connaissance de la géométrie du champ de gravité terrestre devait être suffisamment fine pour que les capteurs métrologiques que nous avons retenus délivrent une information au niveau de précision requis. Les résultats que nous avons présentés nous permettent cependant de supposer raisonnablement que la majorité de ces problèmes peuvent être surmontés ou qu'il devrait être possible de les contourner.

Nous avons donc fait l'hypothèse qu'il existait une solution à chacune des difficultés présentées au chapitre 4 et avons mené une démarche qui nous a permis de nous rapprocher d'une configuration optimale du réseau.

Cette démarche consistait principalement à réaliser des simulations informatiques permettant de déterminer les précisions d'alignement obtenues avec les différentes variantes possibles du réseau. Ces simulations ont été réalisées à l'aide de l'outil de calcul que nous avons développé et qui est présenté au chapitre 5. Nous allons commencer par présenter la configuration de base du réseau métrologique que nous avons définie. Nous indiquerons les modélisations retenues pour chaque type d'observation, et nous finirons en exposant les différentes variantes de réseau testées ce qui nous conduira à la configuration que nous jugeons optimale.

6.1 Configuration du réseau de métrologie

Le but de cette section est de présenter la configuration de base du réseau de métrologie que nous projetons pour l'alignement du CLIC. Cette configuration est une extension de celle déjà utilisée avec succès pour l'alignement des éléments du CTF2 (voir annexe 7).

Les différentes variantes de ce réseau et la sélection du réseau optimal seront discutées dans la section traitant des simulations que nous avons effectuées.

Nous allons commencer par présenter la configuration des capteurs et références géométriques associées, et nous expliquerons comment nous comptons mener le calcul de ce réseau.

6.1.1 Disposition des capteurs d'alignement

Le schéma de notre projet de réseau de métrologie est présenté en annexe 1.

Nous avons vu que l'alignement initial consistait à aligner les points d'articulation des poutres sur lesquelles sont montées les cavités accélératrices.

Chaque point d'articulation est équipé d'un émetteur, d'une lentille et d'un récepteur RasNIK adjacents, selon la figure 6.1.

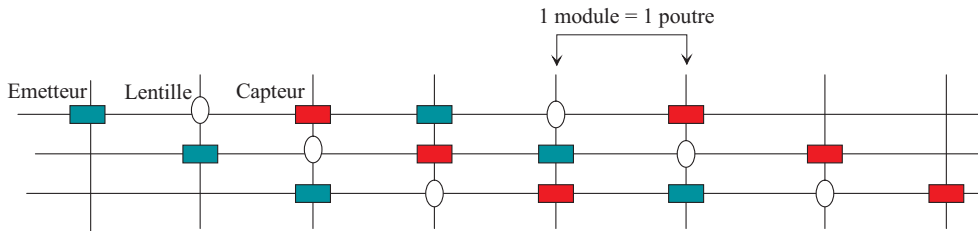


FIG. 6.1 – Recouvrement des lignes optiques

Cela permet de mesurer le défaut d'alignement de chaque articulation par rapport à la droite joignant la précédente et la suivante.

A intervalles réguliers d'une longueur typique d'environ 49m (22 modules), les points d'articulation sont rattachés à un réseau de fils tendus par deux mesures combinées d'écartométrie et d'inclinométrie. Ce réseau est constitué de deux rangées de fils d'environ 98m de long, parallèles aux linacs et se recouvrant sur la moitié de leur longueur (fig. 6.2). Les systèmes de fixation et de tension des fils sont montés sur des plateformes fixées sur la poutre de béton.



FIG. 6.2 – Recouvrement des fils

Les plateformes servent de support aux couples d'écartomètres à fils mesurant les écarts transversaux et verticaux entre deux extrémités de fils d'une rangée et le fil en recouvrement de la rangée parallèle. Ces mesures servent à déterminer le réseau de fils. Entre deux plateformes consécutives, au niveau du rattachement des poutres aux fils,

d'autres couples de WPS combinés avec des inclinomètres mesurent des écarts entre fils. Ce type de mesure permet d'améliorer la redondance du calcul des fils.

Ces plateformes servent également de support aux capteurs du réseau de nivellement hydrostatique. Leur inclinaison est mesurée à l'aide d'un inclinomètre bi-axial. Ainsi l'information altimétrique issue du HLS peut être utilisée pour la connaissance verticale des quatre WPS de la plateforme. Les niveaux hydrostatiques sont utilisés pour la détermination des deux dénivelées nécessaires à la connaissance de la forme verticale des fils, ainsi que pour des mesures de dénivelées entre fils voisins.

Les quadripôles magnétiques, indépendants des poutres, sont quant à eux équipés d'écartomètres et d'inclinomètres avec lesquels ils sont positionnés par rapport aux fils.

6.1.2 Etapes du calcul du réseau et du positionnement des éléments

La partie principale de la détermination du réseau réside dans le calcul de la position des fils tendus, qui peuvent être considérés comme le réseau primaire de métrologie.

Lorsque cette position est connue il est possible de déterminer les positions des articulations des poutres qui sont rattachées aux fils. On peut alors calculer le réseau secondaire qui est constitué des écartomètres optiques en recouvrement et qui est placé entre deux points de rattachement au réseau primaire. Le calcul de ce réseau secondaire est en même temps celui des positions des points d'articulation des poutres.

Enfin la position des quadripôles est déduite des mesures de l'inclinomètre et des écartomètres à fil dont chacun d'eux est équipé.

6.2 Modélisation des observations

Pour cette première étude il était suffisant d'exprimer toutes les observations et d'effectuer tous les calculs dans un référentiel cartésien local. Nous présentons ci-dessous les équations d'observation relatives à chaque type d'observation de notre réseau, ainsi que les remarques qui s'y appliquent.

6.2.1 Ecart orthogonaux par rapport à une droite

Dans le repère de la figure 6.3, les expressions classiques des écarts horizontal et vertical d'un point à une droite sont les suivantes [12] :

$$E_h = \frac{(S_B - S_A)(X_M - X_A) - (X_B - X_A)(S_M - S_A)}{\sqrt{(S_B - S_A)^2 + (X_B - X_A)^2}} \quad (6.1)$$

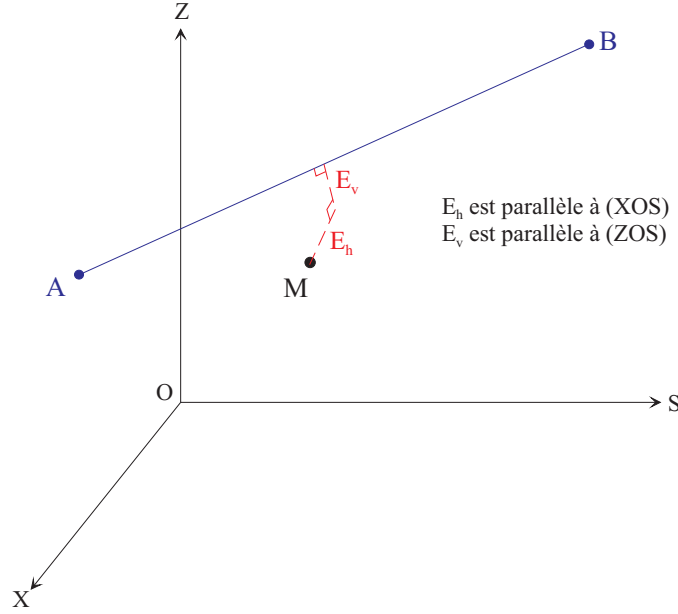


FIG. 6.3 – Ecart d'un point à une droite

$$E_v = \frac{(S_B - S_A)(Z_M - Z_A) - (Z_B - Z_A)(S_M - S_A)}{\sqrt{(S_B - S_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}} \quad (6.2)$$

Nous utilisons ces équations pour modéliser les observations faites avec les WPS et les RasNiK.

6.2.1.1 Modélisation des observations WPS

Dans le cas du WPS les écarts sont mesurés depuis le centre mécanique du capteur, et perpendiculairement aux surfaces mesurantes de ce dernier. La situation réelle n'est pas celle de la figure 6.3 pour deux raisons.

La première vient du fait que le fil n'est pas une droite. Il faudra donc déterminer la courbe du fil (voir 3.1.2) et effectuer des corrections afin que les écarts traités dans le calcul soient relatifs à la droite joignant les extrémités des fils.

La deuxième raison est due à l'orientation du capteur et du fil. Le fil n'est pas nécessairement parallèle à chacun des deux plans définis par les couples de surfaces mesurantes du capteur, et il faut connaître l'attitude de ce dernier dans le repère de travail. On peut pour commencer évaluer l'erreur commise si on néglige le fait que le fil peut être incliné par rapport au capteur (fig. 6.4) et qu'ainsi les écarts mesurés ne sont pas perpendiculaires au fil.

Le graphique de la figure 6.5 représente cette erreur en fonction de la distance mesurée et de différentes inclinaisons du fil par rapport aux surfaces mesurantes.

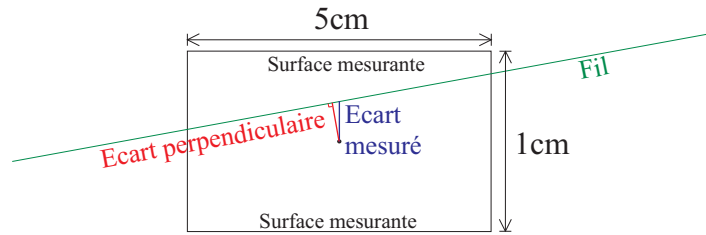


FIG. 6.4 – Fil non parallèle aux surfaces mesurantes

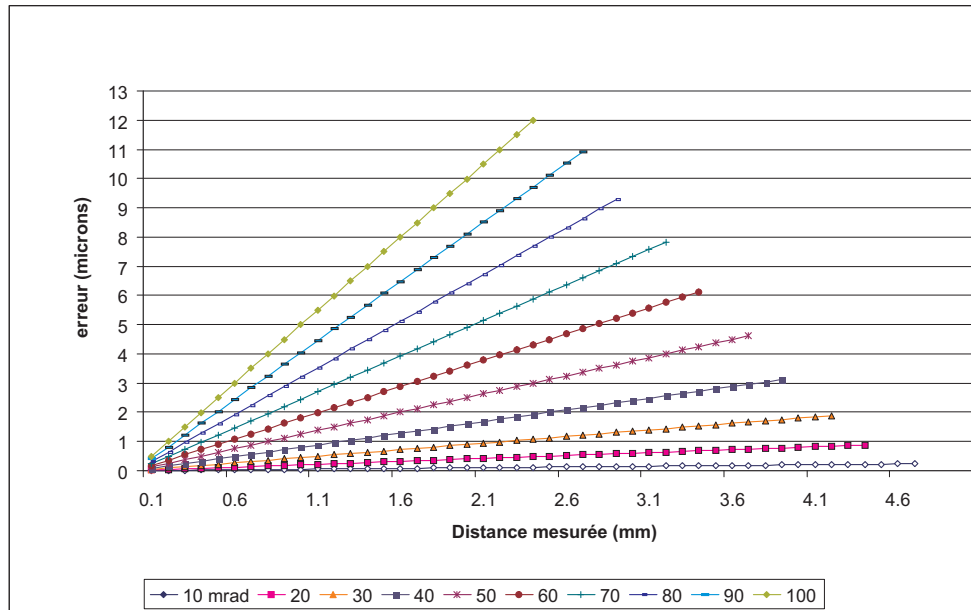


FIG. 6.5 – Erreurs dues à l'inclinaison du fil

Si l'on considère que les erreurs inférieures à $\pm 1\mu m$ sont insignifiantes, on s'aperçoit qu'on peut négliger l'inclinaison du fil si ce dernier se situe dans la zone centrale du capteur et si son inclinaison reste modérée (50 mrad représentent 1 mm sur 5 cm), ce qui est possible si l'implantation des éléments du réseau de métrologie (capteurs + plaques support) est adéquate.

Si on suppose que le fil et les surfaces mesurantes du capteur sont parallèles, il reste alors à connaître l'angle de rotation du capteur autour du fil (fig. 6.6) pour que les écarts mesurés puissent être exprimés dans le repère de travail.

Cet angle ne peut pas être directement mesuré, mais la connaissance de l'orientation du capteur par rapport à la plateforme qui le supporte ainsi que l'inclinomètre qui équipe cette dernière permettront de connaître l'inclinaison du capteur par rapport à la verticale locale. La déviation de cette dernière étant connue (voir 4), il est alors possible d'exprimer les écarts mesurés dans le repère de travail.

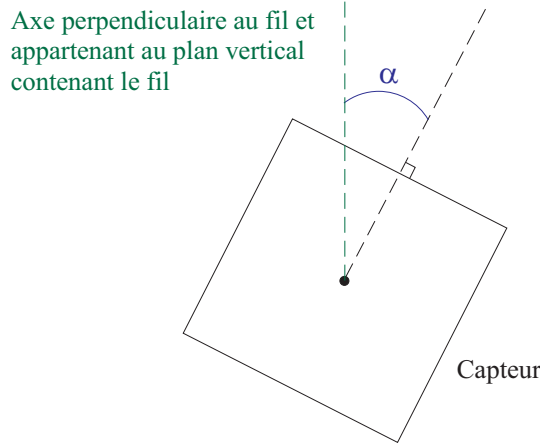


FIG. 6.6 – Angle de rotation du capteur autour du fil

6.2.1.2 Modélisation des observations RasNiK

Nous avons vu en 3.4 que les capteurs RasNiK mesuraient trois écarts et trois rotations autour de l'axe de référence du système qui est une droite rectiligne. En combinant ces informations avec les mesures d'inclinométrie effectuées à chaque articulation de poutre (où sont placés les RasNiK), il est possible d'exprimer les écarts mesurés dans le repère de travail avec les équations 6.1 et 6.2.

6.2.2 Ecart orthogonaux entre points de deux droites

Dans le réseau de métrologie du CLIC, les écarts de ce type sont utilisés afin de contribuer à la détermination des extrémités des fils. Leur expression mathématique doit donc se faire en fonction des coordonnées de ces derniers et non de celles des deux points le long des fils. Si on se réfère à la figure 6.7, cela revient à dire que les expressions des écarts horizontal et vertical E_h et E_v ne doivent pas faire intervenir les coordonnées des points M_1 et M_2 , mais celles des points A, B, C et D ainsi que les deux longueurs l_1 et l_2 .

Les expressions des coordonnées de M_1 et M_2 en fonction de ces paramètres se déduisent des égalités vectorielles suivantes :

$$\overrightarrow{AM_1} = \frac{l_1}{AB} \cdot \overrightarrow{AB} \quad \overrightarrow{CM_2} = \frac{l_2}{CD} \cdot \overrightarrow{CD}$$

Comme le montre la figure 6.7, les écarts E_h et E_v peuvent s'obtenir par projection des droites (AB) et (CD) sur les plans (XOS) et (ZOS). Ces projections permettent d'écrire les égalités vectorielles suivantes :

$$\overrightarrow{A_v M_{1v}} = \frac{l_1}{AB} \cdot \overrightarrow{A_v B_v} \quad (6.3)$$

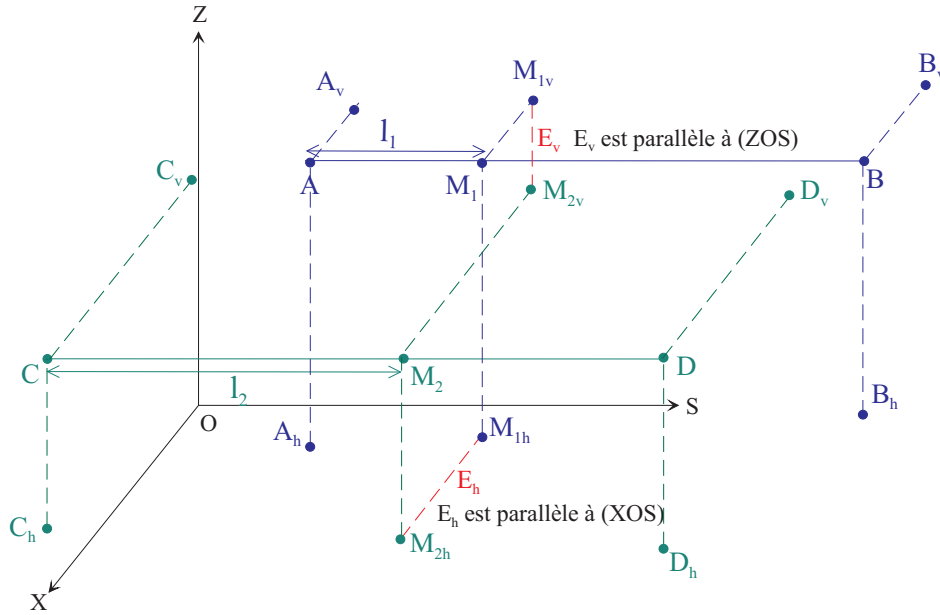


FIG. 6.7 – Ecart entre points de deux droites

$$\overrightarrow{C_v M_{2v}} = \frac{l_2}{CD} \cdot \overrightarrow{C_v D_v} \quad (6.4)$$

$$\overrightarrow{A_h M_{1h}} = \frac{l_1}{AB} \cdot \overrightarrow{A_h B_h} \quad (6.5)$$

$$\overrightarrow{C_h M_{2h}} = \frac{l_2}{CD} \cdot \overrightarrow{C_h D_h} \quad (6.6)$$

De ces égalités vectorielles peuvent être déduites les coordonnées des points M_{1v} et M_{2v} dans le plan (ZOS) :

$$M_{1v} \begin{pmatrix} S_{M_1} = S_A + (l_1/AB) \cdot (S_B - S_A) \\ Z_{M_1} = Z_A + (l_1/AB) \cdot (Z_B - Z_A) \end{pmatrix}$$

$$M_{2v} \begin{pmatrix} S_{M_2} = S_C + (l_2/CD) \cdot (S_D - S_C) \\ Z_{M_2} = Z_C + (l_2/CD) \cdot (Z_D - Z_C) \end{pmatrix}$$

On peut de même déduire les coordonnées des points M_{1h} et M_{2h} dans le plan (XOS) :

$$M_{1h} \begin{pmatrix} S_{M_1} = S_A + (l_1/AB) \cdot (S_B - S_A) \\ X_{M_1} = X_A + (l_1/AB) \cdot (X_B - X_A) \end{pmatrix}$$

$$M_{2h} \begin{pmatrix} S_{M_2} = S_C + (l_2/CD) \cdot (S_D - S_C) \\ X_{M_2} = X_C + (l_2/CD) \cdot (X_D - X_C) \end{pmatrix}$$

Les écarts E_h et E_v s'expriment ensuite simplement comme les distances respectives $M_{1h}M_{2h}$ et $M_{1v}M_{2v}$ ce qui nous conduit finalement aux expressions ci-dessous :

$$E_h = \left(\left[\left(S_A + \frac{l_1(S_B - S_A)}{AB} \right) - \left(S_C + \frac{l_2(S_D - S_C)}{CD} \right) \right]^2 + \left[\left(X_A + \frac{l_1(X_B - X_A)}{AB} \right) - \left(X_C + \frac{l_2(X_D - X_C)}{CD} \right) \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.7)$$

$$E_v = \left(\left[\left(S_A + \frac{l_1(S_B - S_A)}{AB} \right) - \left(S_C + \frac{l_2(S_D - S_C)}{CD} \right) \right]^2 + \left[\left(Z_A + \frac{l_1(Z_B - Z_A)}{AB} \right) - \left(Z_C + \frac{l_2(Z_D - Z_C)}{CD} \right) \right]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6.8)$$

Avec :

$$AB = \sqrt{(S_B - S_A)^2 + (X_B - X_A)^2 + (Z_B - Z_A)^2}$$

$$CD = \sqrt{(S_D - S_C)^2 + (X_D - X_C)^2 + (Z_D - Z_C)^2}$$

6.2.2.1 Modélisation des écarts entre fils

Nous réalisons ce type de mesures à l'aide de deux WPS mécaniquement solidaires (voir schéma du réseau en annexe 1), combinés avec un TMS.

Comme pour les WPS il faut au préalable déterminer la courbe verticale des fils afin de pouvoir ramener les écarts mesurés à des écarts par rapport aux droites.

Nous sommes également confrontés à l'incertitude sur E_h et E_v due à l'orientation des capteurs par rapport aux fils et par rapport à l'horizontale. Cette incertitude revient à une incertitude sur l_1 et l_2 .

Or nos calculs révèlent que dans le cas de deux fils de 100m, parallèles et distants de 20cm, l_1 et l_2 peuvent n'être connus qu'à $\pm 5mm$ sans que l'incertitude sur les écarts mesurés ne dépasse $\pm 1\mu m$. Une implantation précise des éléments du réseau de métrologie limitera l'inclinaison des capteurs par rapport aux fils. Comme de plus le TMS et la connaissance de la déviation de la verticale nous donneront l'inclinaison par rapport à cette dernière, on peut raisonnablement supposer que cette précision de $\pm 5mm$ sur l_1 et l_2 pourra être atteinte.

Nous pouvons donc nous ramener à l'utilisation des équations 6.7 et 6.8 pour l'expression des écarts mesurés dans le repère de travail, et considérer les paramètres l_1 et l_2 comme connus.

6.2.3 Distances verticales

Nous avons supposé pour notre calcul que les dénivelées mesurées avec les HLS pouvaient être exprimées dans le repère de travail (voir chapitre 4). L'équation utilisée pour la distance verticale entre deux points A et B est donc simple :

$$\Delta Z_A^B = Z_B - Z_A \quad (6.9)$$

6.3 Réseaux testés

La configuration type des réseaux testés est celle présentée en annexe 1. Nous avons séparé le calcul de la planimétrie de celui de l'altimétrie car cela nous permettait un gain de temps considérable au niveau du calcul. Nous avons également considéré le réseau de fils tendus comme un réseau primaire de métrologie et avons donc partiellement séparé le calcul de la position des extrémités des fils de celui de la position des articulations de poutres.

Par ailleurs, les fils et les poutres sont orientés suivant l'axe parallèle au faisceau ; la position en S des points inconnus important moins, nous l'avons toujours considéré comme fixe. Les inconnues calculées sont donc des coordonnées X et Z.

Nous exposerons les différentes configurations que nous avons testées avant d'aboutir à celles qui satisfont les précisions d'alignement imposées, en ne donnant des résultats complets que pour les configurations finales. Pour chacune de celles-ci, nous présenterons les résultats concernant les positionnements absolus et relatifs des éléments à aligner, ainsi que des informations sur les résidus des observations. Pour chaque donnée d présentée en graphique, nous avons tracé, pour un nombre n de simulations effectuées, les courbes suivantes :

– moyenne quadratique :

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}}$$

– moyenne arithmétique :

$$\frac{\sum_{i=1}^n |d_i|}{n}$$

– maximum :

$$\max\{|d_i|\}$$

– minimum :

$$\min\{|d_i|\}$$

6.3.1 Réseau de fils. Planimétrie

6.3.1.1 Caractéristiques et performances des réseaux testés

Ce calcul détermine uniquement la position planimétrique des extrémités des fils, sur toute la longueur d'un linac du CLIC, soit près de 14 000m. Les premiers et derniers points de chaque rangée sont considérés comme connus. Tous les autres points sont variables en X seulement. Le réseau de fils est rattaché avec une précision de $\pm 5\text{mm}$ à trois points connus du réseau topométrique souterrain, également répartis le long du linac.

Les paramètres du réseau que nous avons fait varier sont les suivants, illustrés sur la figure 6.8 :

- longueur l_f des fils ;
- précision σ_{EF} des observations d'écart entre extrémités de fils et fils en recouvrement ;
- précision σ_{FF} des observations d'écart entre fils ;
- nombre n_{FF} d'observations d'écarts entre fils entre deux plateformes d'abscisses voisines.

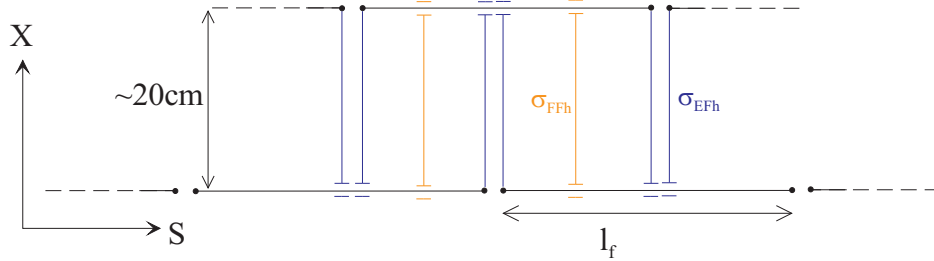


FIG. 6.8 – Réseau de fils. Planimétrie.

Les différentes configurations testées sont présentées dans le tableau 6.1 dont la dernière colonne renvoie le lecteur à un ou plusieurs graphiques proposés en annexe.

l_f	σ_{AF}	σ_{FF}	n_{FF}	Annexe(s)
70m	$\pm 10\mu\text{m}$	$\pm 10\mu\text{m}$	1	2a
70m	$\pm 5\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$	1	2b
70m	$\pm 5\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$	2	2c
70m	$\pm 5\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$	0	2d
100	$\pm 5\mu\text{m}$	$\pm 5\mu\text{m}$	1	2e, 2f, 2g, 2h

TAB. 6.1 – Configurations testées pour le réseau de fils en planimétrie

La première configuration fait intervenir des fils de longueur $l_f = 70\text{m}$, une longueur comparable à ceux qui avaient été modélisés avec succès lors du travail de thèse qui a précédé celui-ci (Mainaud [15]). Les précisions σ_{EFh} et σ_{FFh} de $\pm 10\mu\text{m}$ attribuées aux mesures faites avec les écartomètres est bien supérieure aux $\pm 1,4\mu\text{m}$ issus de la combinaison de deux mesures de WPS à $\pm 1\mu\text{m}$. Elle sont obtenues en considérant que la principale source d'imprécision sur les mesures d'écart entre extrémité de fil et fil en recouvrement ne provient pas des capteurs mais de l'incertitude sur la distance entre les deux centres mécaniques des capteurs, c'est à dire l'incertitude des dimensions du montage mécanique sur les plateformes. Pour $\pm 10\mu\text{m}$ d'erreur de mesure totale, $\pm 9,8\mu\text{m}$ sont ainsi attribués au positionnement des capteurs sur la plateforme.

Le graphique présenté en annexe 2a représente les défauts d'alignement des extrémités de fils sur une longueur Ld d'environ 210m (voir fig. 6.9), en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. Ces défauts constituent le critère déterminant pour juger si une configuration peut satisfaire les exigences posées. La moyenne quadratique de ces défauts est d'environ $\pm 30\mu\text{m}$ ce qui est supérieur aux $\pm 10\mu\text{m}$ visés.

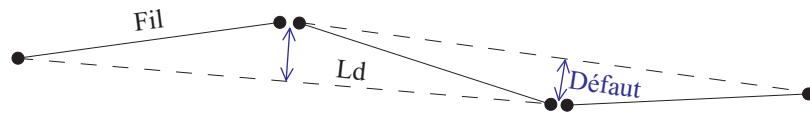


FIG. 6.9 – Défaut d'alignement des fils

Nous avons donc essayé d'améliorer ce résultat en attribuant des précisions σ_{EFh} et σ_{FFh} de $\pm 5\mu\text{m}$ aux deux types d'écarts mesurés. Comme le montre le graphique présenté en annexe 2b, la moyenne quadratique des défauts d'alignement baisse dans cette configuration jusqu'à $\pm 15\mu\text{m}$, ce qui reste néanmoins supérieur à l'objectif visé. Augmenter encore la précision des mesures d'écart n'aurait pas été réaliste, puisque dans cette configuration on considère déjà que la distance qui sépare les centres mécaniques des capteurs WPS est connue à $\pm 4,8\mu\text{m}$, ce qui est très contraignant.

L'autre moyen que nous avons alors envisagé pour réduire les défauts d'alignement fut de rajouter des mesures d'écarts entre fils. Ainsi le graphique en annexe 2c présente-t-il les défauts d'alignement des extrémités de fil dans un réseau comprenant deux observations d'écart entre fils entre chaque couple de plateformes consécutives. Comme on peut le constater sur ce graphique, les observations supplémentaires de ce type ne contribuent pas à réduire les défauts d'alignement des extrémités de fils, dont la moyenne quadratique reste aux alentours de $\pm 15\mu\text{m}$.

Pour nous convaincre du peu d'influence des observations d'écart entre fils sur les

défauts d'alignement des extrémités de ces derniers, nous avons testé une configuration ne comprenant aucune de ces observations. Les résultats de ces tests sont présentés sur le graphique en annexe 2d, sur lequel on peut constater que les défauts d'alignement des fils restent inchangés par rapport à la configuration précédente. D'autres essais que nous ne présentons pas plus longuement ici nous ont permis de constater que les mesures de fil à fil avaient très peu d'influence sur les défauts d'alignement des extrémités de fils, même lorsque leur précision était augmentée de façon irréaliste à par exemple $\pm 300\text{nm}$. Par manque de temps nous nous sommes limités pour notre étude à ce simple constat, mais la suite du travail sur le réseau d'alignement du CLIC devra certainement comprendre une analyse mathématique permettant de quantifier l'apport de chaque type d'observation dans le positionnement des éléments.

L'autre paramètre sur lequel nous pouvions jouer était la longueur l_f des fils. Nous avons donc testé un réseau avec des fils de longueur 100m et une précision de $\pm 5\mu\text{m}$ attribuée aux deux types d'écarts mesurés. Ce réseau représente 932 observations permettant de déterminer 614 inconnues.

Le graphique en annexe 2e représente l'écart des plateformes, et donc des extrémités des fils, par rapport à leur position idéale, en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces écarts atteint $\pm 1.3\text{mm}$.

Le graphique en annexe 2f, le plus important, représente les défauts d'alignement des extrémités de fils sur une longueur Ld d'environ 200m en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. On s'aperçoit que cette configuration permet d'atteindre, pour le réseau primaire de métrologie, la précision d'alignement relatif souhaitée de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m.

Les graphiques en annexes 2g et 2h présentent les résidus des deux types d'écarts observés. La moyenne quadratique des résidus des observations entre extrémités de fils et fil en recouvrement se situe à $\pm 2\mu\text{m}$, alors que celle des résidus des observations entre fils parallèles se situe vers $\pm 4\mu\text{m}$. Les précisions a priori de ces observations étant les mêmes, cela nous montre que le premier type d'écart a un rôle plus déterminant dans la position des points calculés que le second. Cela peut s'expliquer géométriquement puisque le premier type d'écart peut être considéré comme une observation directe de l'extrémité de fil concernée, ce qui n'est pas le cas du second. C'est un début d'explication de l'influence moindre des observations entre fils parallèles, mais cela nécessite d'être approfondi comme nous l'avons déjà exprimé plus haut.

Etant parvenus à une configuration du réseau primaire de métrologie qui permettait de limiter les défauts d'alignement des extrémités de fils aux $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m imposés, nous avons logiquement poursuivi par la détermination de la qualité de positionnement des articulations de poutres, qui constitue la finalité de l'alignement initial (voir 2.2.2).

6.3.2 Calcul combiné des fils et des poutres. Planimétrie

6.3.2.1 Caractéristiques et performances des réseaux testés

Les réseaux que nous avons testé permettent de déterminer simultanément la position planimétrique des extrémités de fils et des articulations d'une des rangées de poutres, sur une longueur d'environ 2km. Nous avons choisi une longueur plus courte que celle d'un linac parce que les défauts d'alignement, qui nous intéressent le plus, sont indépendants de la longueur de linac considérée. Cela nous permet d'éviter un calcul sur 14km qui aurait été d'un point de vue informatique beaucoup trop gourmand en mémoire et en temps. En effet, un tel calcul aurait d'après nos estimations nécessité l'allocation d'un espace contigu de mémoire vive d'environ 365Mo, uniquement pour la matrice A (voir 5.1.5) qui intervient dans le calcul de compensation. Une telle allocation de mémoire n'était malheureusement pas possible sur le PC que nous utilisons, équipé de 2 barrettes de 256Mo de RAM.

Les premiers et derniers points de chaque rangée de fil sont considérés comme connus, tous les autres points sont variables en X seulement. Les articulations des poutres sont positionnées les unes par rapport aux autres à l'aide du réseau d'observations RasNiK en recouvrement (fig. 6.1). Le réseau d'observations optiques est intégré au réseau de fils par l'intermédiaire de mesures WPS entre des articulations de poutres et les fils adjacents.

Nous avons gardé pour précision des observations d'écarts au fil celle que les tests présentés en 6.3.1 ont permis de déterminer, c'est-à-dire $\pm 5\mu\text{m}$ pour toutes les mesures faites avec les WPS. Les tests présentés en 6.3.1 nous ont confirmé que les déterminations de positions dans un réseau composé d'écarts à des segments de droite sont plus précises avec des segments longs. Les segments de droite auxquels se réfèrent les écartomètres optiques ne sont à cet égard pas très avantageux puisqu'ils ne font que 4,46m, soit la longueur de deux poutres. Nous avons donc dès les premiers tests attribué une précision maximale aux observations faites avec les RasNiK, c'est-à-dire $\pm 2\mu\text{m}$ qui se décomposent en $\pm 1\mu\text{m}$ pour la mesure elle-même et $\pm 1,7\mu\text{m}$ pour le positionnement du capteur par rapport à l'articulation, ce qui est très peu. Nous verrons dans la suite que les résultats obtenus nous ont confirmé cette nécessité d'attribuer une telle précision aux écarts optiques.

Le seul paramètre que nous ayons donc fait varier était le nombre de mesures de rattachement entre les articulations de poutres et les fils adjacents.

Le premier réseau que nous ayons testé comprenait des mesures de rattachement tous les 22 articulations, ce qui représente une longueur de 49,06m ou encore en moyenne trois rattachements par fil. Ce réseau représente 1065 observations permettant de déterminer 983 inconnues.

Le graphique en annexe 3a représente l'écart des extrémités des fils par rapport à leur

position idéale, en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces écarts atteint $\pm 0.15\text{mm}$. Ce résultat meilleur que celui du réseau précédent était prévisible puisque seulement 2km séparent les points connus. Cette amélioration ne doit en revanche rien à l'incorporation des mesures RasNiK, puisqu'un calcul du réseau de fils seul sur 2km donne exactement les mêmes résultats. Les écarts plus faibles par rapport à la position idéale sont donc bien dus uniquement à la longueur considérée plus courte.

Le graphique en annexe 3b représente les défauts d'alignement des extrémités de fils sur une longueur d'environ 200m en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces défauts se situe comme pour le réseau précédent à $\pm 10\mu\text{m}$. On peut donc en conclure que le fait de combiner les observations RasNiK et WPS n'améliore pas l'alignement relatif des fils.

Le graphique en annexe 3c représente les écarts des articulations de poutres par rapport à leur position idéale, en fonction de l'abscisse S de ces articulations. Le rattachement aux fils fait que l'allure générale est la même que pour la position de ces derniers. On note aussi l'augmentation systématique des écarts entre deux points de rattachement (49.06m).

Le graphique en annexe 3d représente les défauts d'alignement des articulations de poutres sur une longueur d'environ 200m. On retrouve une périodicité liée aux rattachements aux fils. La moyenne quadratique de ces défauts se situe aux alentours de $\pm 40\mu\text{m}$, ce qui est une valeur bien trop grande.

Nous avons donc cherché à améliorer ce résultat en rattachant plus souvent les poutres aux fils et nous n'avons abouti à un résultat satisfaisant qu'en faisant des rattachements toutes les 4 ou 5 articulations (l'espacement entre les rattachements n'est pas parfaitement régulier dans cette configuration, de manière à toujours avoir le même nombre de rattachements par fil). Les défauts d'alignement des poutres résultant d'un tel réseau sont présentés en annexe 3e. Cette configuration permet de se rapprocher considérablement des $\pm 10\mu\text{m}$ demandés, et constitue un bon compromis entre le nombre de rattachements (et donc de capteurs WPS) et la précision obtenue.

Le graphique en annexe 3f représente les résidus des observations WPS entre extrémités de fils et fils en recouvrement, pour un rattachement tous les 4 ou 5 modules. Leur moyenne quadratique se situe à environ $\pm 2.4\mu\text{m}$. Les résidus des observations WPS de rattachement poutres-fils, présentés en annexe 3g, sont moindres : leur moyenne quadratique se situe vers $\pm 2.0\mu\text{m}$. Cette légère différence n'est pas surprenante puisque les observations de rattachement concernent des points d'articulation qui sont contraints par les observations RasNiK, plus précises.

Ces dernières ont des résidus présentés en annexe 3h, dont la moyenne quadratique se situe vers $\pm 0.8\mu\text{m}$.

Ce sont les observations d'écarts entre fils parallèles qui ont les résidus les plus forts

(annexe 3i), pour des raisons déjà évoquées plus haut.

6.3.3 Réseau de fils. Altimétrie

6.3.3.1 Caractéristiques et performances des réseaux testés

Les réseaux de fils que nous présentons dans cette section permettent de déterminer uniquement la position altimétrique des extrémités des fils, sur toute la longueur d'un linac du CLIC. Les observations d'écart entre extrémités de fils et fils en recouvrement et entre fils parallèles sont analogues à celles des réseaux présentés en 6.3.1 mais elles se situent dans le plan vertical. Nous avons supposé qu'une solution aux problèmes posés par l'utilisation des HLS pour l'alignement vertical (voir 4) existe, et que la courbe verticale des fils pouvait donc être déterminée avec la précision requise. Cela revient à considérer qu'il est possible de mesurer des dénivelées sur une centaine de mètres au moins. Nous avons donc aussi incorporé au réseau des observations de distance verticale, à raison d'une par paire de plateformes consécutives (voir fig. 6.10) ce qui correspond à des observations indépendantes.

Les paramètres du réseau que nous avons fait varier présentés ci-dessous et sont illustrés sur la figure 6.10 :

- précision σ_{EFv} des observations d'écart entre extrémités de fils et fils en recouvrement ;
- précision σ_{FFv} des observations d'écart entre fils ;
- précision σ_{HLS} des observations de dénivelées avec les HLS.

La longueur des fils était fixée à 100m, valeur issue des tests présentés en 6.3.1.

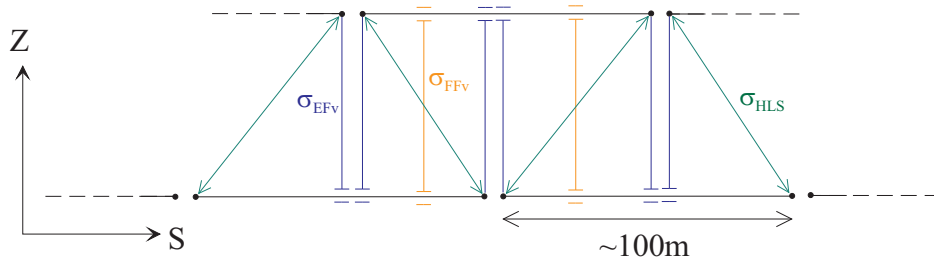


FIG. 6.10 – Réseau de fils. Altimétrie.

Dans la première configuration que nous avons testée, nous avons attribué une valeur de $\pm 10\mu\text{m}$ à σ_{HLS} et une valeur de $\pm 12\mu\text{m}$ à σ_{EFv} et σ_{FFv} . Ces valeurs sont supérieures à celles auxquelles nous avons abouti en 6.3.1 pour un réseau pourtant très similaire, mais nous espérons que les observations de nivellement hydrostatique allaient contribuer fortement à améliorer la détermination des positions. Ce réseau représente 1228 observations permettant de déterminer 614 inconnues.

Le graphique présenté en annexe 4a représente les défauts d'alignement en Z des extrémités de fils sur une longueur d'environ 200m, en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces défauts est d'environ $\pm 15\mu\text{m}$ ce qui est supérieur aux $\pm 10\mu\text{m}$ visés.

Nous avons donc essayé de parvenir à un résultat meilleur en fixant les précisions a priori σ_{EFv} et σ_{FFv} des mesures d'écart au fil à $\pm 8\mu\text{m}$, et celle des observations de différences de hauteur à $\pm 7\mu\text{m}$.

Le graphique en annexe 4b représente l'écart des extrémités des fils par rapport à leur position idéale, en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces écarts atteint $\pm 0.12\text{mm}$. Ce résultat est nettement meilleur que les $\pm 1.3\text{mm}$ du calcul du 6.3.1, et s'explique par l'ajout des observations HLS, qui n'ont pas d'équivalent en planimétrie.

Le graphique en annexe 4c représente les défauts d'alignement des extrémités de fils sur une longueur Ld d'environ 200m en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. On s'aperçoit que cette configuration permet d'atteindre, pour le réseau primaire de métrologie, la précision d'alignement relatif souhaitée de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m.

Les graphiques en annexes 4d, 4e et 4f présentent les résidus des deux types d'écarts observés et ceux des mesures de distances verticales. La moyenne quadratique des résidus des observations entre extrémités de fils et fil en recouvrement se situe à $\pm 5\mu\text{m}$, alors que celle des résidus des observations entre fils parallèles se situe vers $\pm 7\mu\text{m}$. Les résidus des observations HLS valent en moyenne $\pm 5\mu\text{m}$. Il y a un meilleur équilibre entre les résidus que pour le calcul planimétrique. Cela confirme comme on pouvait s'y attendre que les observations HLS améliorent la détermination des inconnues : il y a plus d'homogénéité dans l'influence de chaque type d'observation sur la solution finale, et on peut penser que cela améliore également la robustesse de la solution calculée.

Comme pour la planimétrie, nous avons ensuite poursuivi par la détermination de la qualité de positionnement des articulations de poutres.

6.3.4 Calcul combiné des fils et des poutres. Altimétrie

6.3.4.1 Caractéristiques et performances des réseaux testés

Les réseaux dont nous présentons les résultats dans cette section permettent de déterminer simultanément la position altimétrique des extrémités de fils et des articulations d'une des rangées de poutres, sur une longueur d'environ 2km.

Les premiers et derniers points de chaque rangée de fil sont considérés comme connus, tous les autres points sont variables en Z seulement. La configuration du réseau est ana-

logue à celle présentée en 6.3.2. Les mesures de rattachement des poutres aux fils sont faites tous les 4 ou 5 modules, espacement qui est issu des résultats présentés en 6.3.2. Il y a une mesure de dénivelée entre deux plateformes consécutives. Nous avons attribué à ces mesures une précision σ_{HLS} de $\pm 7\mu\text{m}$, conformément aux résultats issus du calcul des fils seuls. De même, les précisions a priori σ_{EFv} et σ_{FFv} des mesures d'écart au fil sont de $\pm 8\mu\text{m}$. Quant aux observations RasNiK, nous leur avons également attribué la même précision qu'en planimétrie, soit $\pm 2\mu\text{m}$. Ce réseau représente 1269 observations permettant de déterminer 983 inconnues.

Le graphique en annexe 5a représente l'écart des extrémités des fils par rapport à leur position idéale, en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces écarts atteint $\pm 0.04\text{mm}$. Ce résultat meilleur que celui du réseau du 6.3.2 était prévisible puisque nous connaissons déjà l'apport bénéfique des HLS sur la position verticale absolue des plateformes.

Le graphique en annexe 5b représente les défauts d'alignement des extrémités de fils sur une longueur d'environ 200m en fonction de l'abscisse S de ces extrémités. La moyenne quadratique de ces défauts se situe légèrement en-dessous de $\pm 10\mu\text{m}$. De même que pour la planimétrie, le fait de combiner les observations RasNiK, HLS et WPS n'améliore pas l'alignement relatif des fils.

Le graphique en annexe 5c représente les écarts des articulations de poutres par rapport à leur position idéale, en fonction de l'abscisse S de ces articulations. L'allure générale est toujours la même que pour la position des fils.

Le graphique en annexe 5d représente les défauts d'alignement des articulations de poutres sur une longueur d'environ 200m. La moyenne quadratique de ces défauts se situe aux alentours de $\pm 13\mu\text{m}$, tout comme pour le calcul planimétrique analogue du 6.3.2, et peut être considéré comme un résultat satisfaisant.

Le graphique en annexe 5e représente les résidus des observations WPS entre extrémités de fils et fils en recouvrement. Leur moyenne quadratique se situe à environ $\pm 6.0\mu\text{m}$. Les résidus des observations WPS de rattachement poutres-fils, présentés en annexe 5f, sont moindres : leur moyenne quadratique se situe vers $\pm 4.2\mu\text{m}$. Cette différence s'explique ici aussi par le fait que les observations de rattachement concernent des points d'articulation qui sont contraints par les observations RasNiK, plus précises.

Ces dernières ont des résidus présentés en annexe 5g, dont la moyenne quadratique se situe vers $\pm 0.8\mu\text{m}$.

Ce sont les observations d'écarts entre fils parallèles qui ont les résidus les plus forts (annexe 5h), pour des raisons déjà évoquées plus haut.

6.4 Réseau optimal

Faisons la synthèse de ces différents réseaux testés et décrivons le réseau optimal vers lequel nous orientent les résultats obtenus, ainsi que la manière de le calculer.

6.4.1 Décomposition du calcul

Il semble que le calcul puisse se faire en deux étapes, c'est-à-dire que le réseau de fils peut être calculé d'abord, et que seulement dans un deuxième temps on procède à la détermination des positions des articulations dans un calcul où les extrémités de fils sont alors connues. Cette hypothèse reste cependant à confirmer avec des simulations mettant en œuvre les mêmes valeurs observées sur les fils dans des calculs en deux étapes ou en bloc, et en comparant ensuite les positions obtenues par les deux méthodes. Pour parvenir à réaliser ces simulations, il faudrait les exécuter sur une machine équipée de plus de mémoire vive que celle que nous avons à notre disposition, ou alors et surtout mettre en œuvre des algorithmes spécifiques à l'utilisation de matrices à trous (voir 5.3.5.1) afin de réduire considérablement les besoins en RAM de LGC++.

Ces simulations sont en effet très importantes pour l'étude CLIC puisqu'elles permettront aux physiciens responsables des études sur le faisceau de particules de disposer de jeux de coordonnées des extrémités des poutres sur la totalité d'un linac. Ces jeux de coordonnées leur permettront de faire à leur tour des simulations à l'aide desquelles ils détermineront si la précision de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m qu'ils ont estimée nécessaire pour l'alignement des sections accélératrices (voir 2.1), et donc pour celui des poutres, permet effectivement d'obtenir un faisceau de particules répondant aux spécifications du projet.

6.4.2 Détermination de la position des fils

6.4.2.1 Planimétrie

En planimétrie, le réseau schématisé sur la figure 6.8 satisfait la contrainte d'alignement de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m.

La précision de $\pm 5\mu\text{m}$ sur les 2 types de mesures impliqués n'exprime pas seulement la précision des capteurs WPS mais aussi celle avec laquelle on connaît les dimensions des montages mécaniques. En admettant que les WPS déterminent les écarts à $\pm 1\mu\text{m}$, cela requiert de connaître avec une précision de $\pm 4.8\mu\text{m}$ la distance séparant sur une plateforme les centres mécaniques de deux capteurs. Il est donc probable qu'il faudra procéder à une calibration du montage de chaque plateforme et être attentif à la stabilité de ce dernier face aux variations de température notamment.

Cette tolérance stricte sur l'écart mesuré pourrait être quelque peu relâchée en aug-

mentant la longueur des fils, mais dans ce cas on est confronté à une moindre stabilité de ce dernier (sa fréquence propre diminue), ce qui n'est a priori pas un problème moins délicat.

6.4.2.2 Altimétrie

En altimétrie, le réseau schématisé sur la figure 6.10 satisfait la contrainte de $\pm 10\mu\text{m}$ sur 200m.

Les précisions des mesures ($\sigma_{HLS} = \pm 7\mu\text{m}$, $\sigma_{EFv} = \sigma_{FFv} = \pm 8\mu\text{m}$) peuvent être un peu plus larges qu'en planimétrie, du fait de la présence des mesures faites avec les niveaux hydrostatiques. Les mêmes remarques que pour la planimétrie concernant la connaissance des dimensions mécaniques s'appliquent bien sûr. Il faut de plus garder à l'esprit que les dénivelées mesurées par les HLS ainsi que les écarts obtenus avec les paires de WPS sont en fait des pseudo-observations, c'est-à-dire des observations directes corrigées des déformations de l'équipotentielle pour les premières et de la courbure verticale des fils pour les seconds. Selon le degré de connaissance de l'équipotentielle qu'il sera possible d'avoir (voir chap. 4), il est donc possible que ces précisions, bien que plus larges que dans le cas de la planimétrie, soient plus difficiles à atteindre.

6.4.3 Détermination de la position des poutres

Concernant la détermination des positions des poutres, un réseau de systèmes RasNiK en recouvrement (fig. 6.1) combiné avec des rattachements par WPS tous les 4 ou 5 modules permet d'atteindre une précision satisfaisante. Cette dernière pourrait être légèrement améliorée en rattachant tous les trois modules par exemple, cependant cela représenterait un nombre de WPS supplémentaires non négligeables, ce qui va à l'encontre de l'avantage financier représenté par l'utilisation des RasNiK pour l'alignement des poutres.

La seule différence à relever ici entre planimétrie et altimétrie se situe au niveau des observations de rattachement qui sont en fait des pseudo-observations, et auxquelles les mêmes remarques que précédemment s'appliquent.

Chapitre 7

Une alternative aux niveaux hydrostatiques

Les niveaux hydrostatiques que nous avons présentés au chapitre 3 constituent un outil relativement simple pour disposer d'une référence verticale. Cependant nous avons vu au chapitre 4 qu'il n'est pas certain, en raison de la finesse avec laquelle il est nécessaire de connaître la géométrie du champ de pesanteur (précision relative de quelque microns sur une centaine de mètres), qu'ils fournissent le niveau de précision nécessaire pour l'alignement du CLIC. Ce travail de recherche devait donc comprendre une réflexion sur ce que pourraient être les solutions alternatives capables de fournir une référence verticale suffisamment précise.

Il nous a semblé que les techniques optiques étaient les plus intéressantes à explorer. Il se trouve que l'université de Stanford aux Etats-Unis exploite depuis la fin des années 1960 l'accélérateur linéaire SLAC dont la rectitude est maintenue par référence à un faisceau laser. Nous avons donc étudié ce système d'alignement et tenté d'en tirer les éléments qui pourraient être adaptés au projet CLIC.

Dans ce chapitre la première section sera consacrée à la présentation du système d'alignement du SLAC. Après avoir pour débiter exposé le principe de base suivant lequel le faisceau laser est exploité, nous examinerons plus en détail les différents équipements importants qui sont mis en œuvre dans ce système et indiqueront les performances de chacun d'entre eux.

Cela nous permettra alors dans la deuxième section d'examiner pour chaque élément du système quelles sont les améliorations que les progrès technologiques pourraient permettre d'apporter. Cela nous amènera à faire une ébauche de ce que pourrait être une solution d'alignement pour le CLIC basée sur l'utilisation d'une ligne optique. Enfin nous donnerons les questions auxquelles il nous semble que des réponses devraient encore être

apportées si l'option d'une référence verticale optique devait être retenue pour ce projet d'accélérateur.

7.1 Le système d'alignement du SLAC

Le SLAC est un accélérateur linéaire de 3,05km de long permettant d'accélérer à une énergie de 50GeV des faisceaux d'électrons et de positons que l'on fait ensuite rentrer en collision. Son exploitation requiert une précision d'alignement relative de $\pm 250\mu m$ sur la totalité de sa longueur (Herrmannsfeldt [10]). Nous allons dans ce qui suit commencer par présenter le phénomène physique sur lequel se fonde le système d'alignement. Nous verrons ensuite quels sont les constituants importants de ce dernier, et nous indiquerons quelles sont leurs caractéristiques importantes.

7.1.1 Principe de base du système d'alignement

Le principe du système d'alignement du SLAC est illustré sur la figure 7.1. Il est basé sur l'utilisation de phénomènes de diffraction à l'aide de lentilles de Fresnel. Ces dernières se présentent dans cette application sous la forme de plaques métalliques dans lesquelles ont été usinés des motifs de trous rectangulaires comme cela est visible sur la figure 7.2.

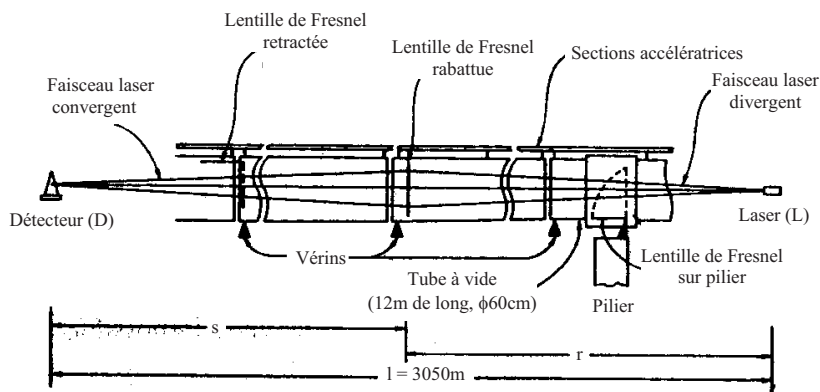


FIG. 7.1 – Principe du système d'alignement du SLAC

Lorsqu'une telle lentille est éclairée par un faisceau lumineux, elle se comporte comme une lentille convergente et une image de diffraction semblable à celle de la figure 7.3 se forme à une distance définie (Resnick et Halliday [22]).

Commentons plus en détail la figure 7.1 et voyons comment ce phénomène est exploité pour l'alignement de l'accélérateur :

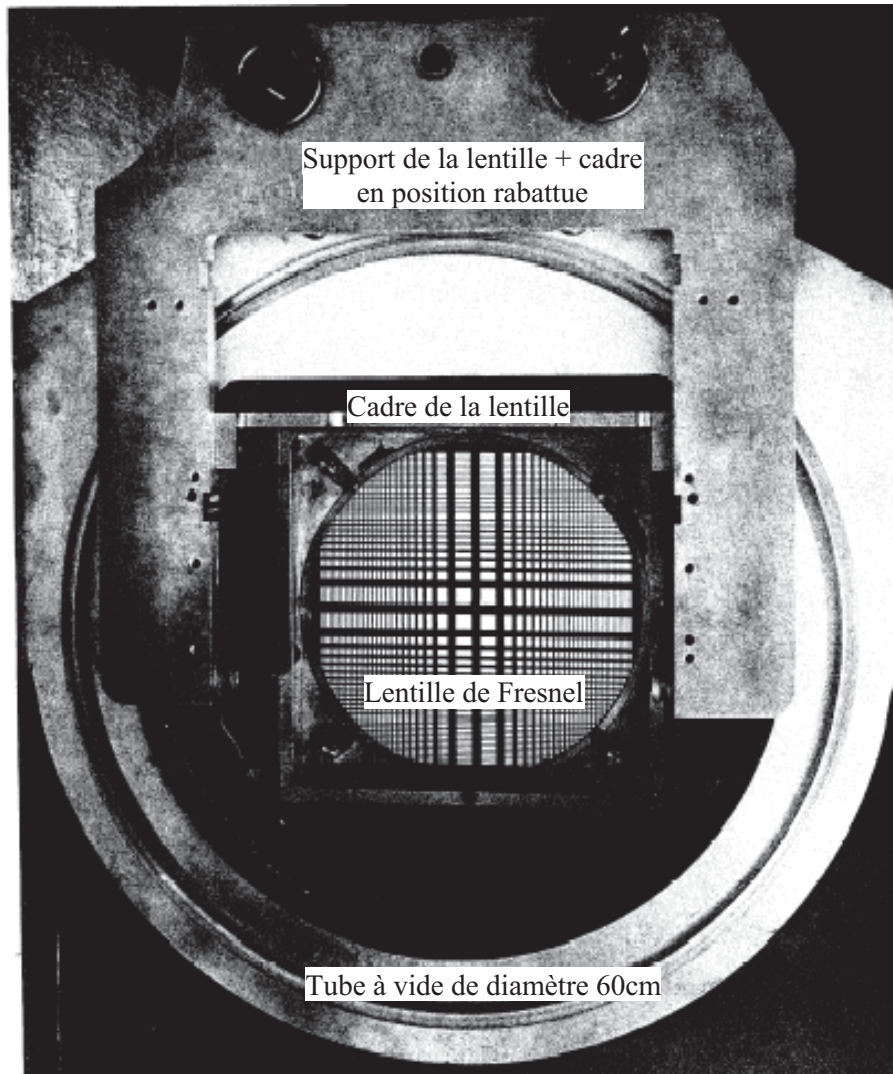


FIG. 7.2 – Lentille de Fresnel sur son support

- le faisceau laser, en se propageant dans un tube à vide de 60cm de diamètre, définit une ligne droite entre la source ponctuelle de lumière (L) et le détecteur (D) placés aux deux extrémités de l'accélérateur ;
- le tube à vide est un assemblage de modules de 12,2m de long chacun ; à chaque jonction de deux modules est placé un mécanisme qui permet de rabattre dans le faisceau une lentille de Fresnel ;
- la position sur le détecteur de l'image formée par une lentille permet de déterminer l'écart de cette dernière par rapport à la ligne optique de référence ;
- les cavités accélératrices, dont on veut assurer l'alignement, sont montées rigidement sur le tube à vide ; leur position peut être ajustée par l'intermédiaire de vérins verticaux et transversaux qui agissent sur ce tube.

L'alignement du SLAC se fait donc en insérant dans le faisceau une lentille à la fois

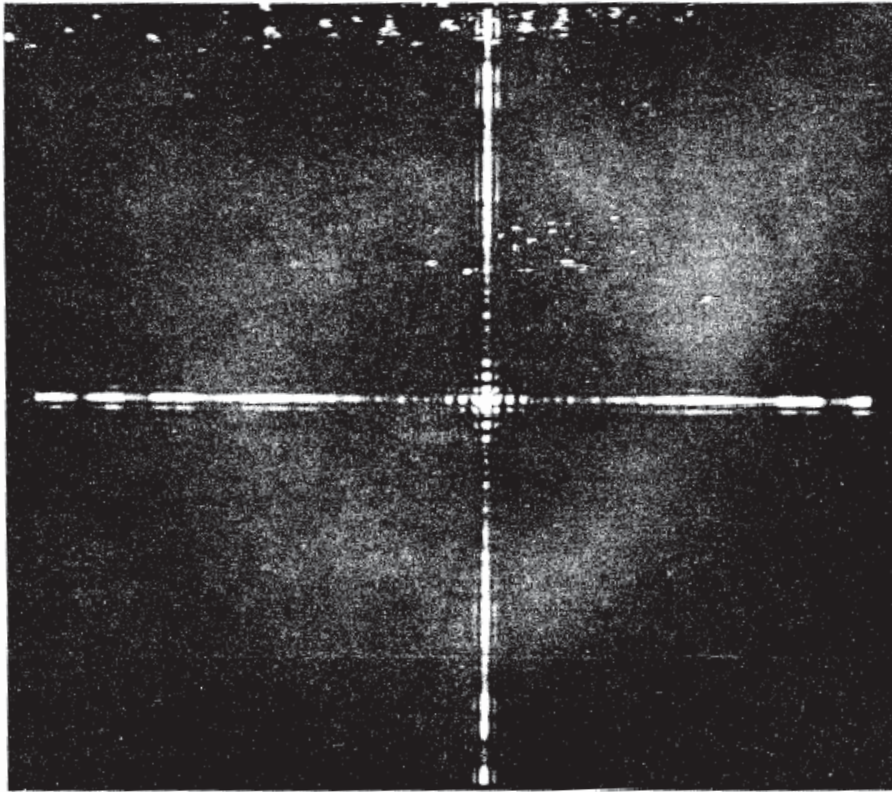


FIG. 7.3 – Image produite par une lentille de Fresnel

parmi les 277 dont est équipé l'accélérateur, et en procédant ensuite aux ajustements nécessaires par l'intermédiaire des vérins.

Examinons un par un les éléments essentiels de ce système d'alignement et voyons quelles sont leurs caractéristiques importantes.

7.1.2 La source lumineuse

Un laser à gaz hélium-néon produit le faisceau lumineux de longueur d'onde 633nm dont la puissance se situe entre 1 et 3 mW. Le faisceau, d'un diamètre de l'ordre du demi millimètre à la sortie du laser, traverse immédiatement une lentille divergente qui assure que la lentille de Fresnel la plus proche soit illuminée complètement.

7.1.3 Les lentilles de Fresnel

Les lentilles sont des carrés de cuivre plaqué de nickel dans lesquels sont usinés des motifs de trous rectangulaires analogues à celui de la figure 7.2. Elles sont montées dans

des cadres en inox de 36 cm de côté, L'option de lentilles en verre ordinaire fut rejetée en raison du noircissement que subit ce dernier dans un milieu radioactif ainsi que du coût de fabrication nettement plus élevé.

La position X_n du centre de la n -ième ouverture d'un motif de diffraction monodirectionnel comme celui de la figure 7.4 est donnée par l'équation (7.1). Le motif utilisé en réalité et présenté sur la figure 7.2 résulte de la superposition de deux tels motifs décalés de 90° .

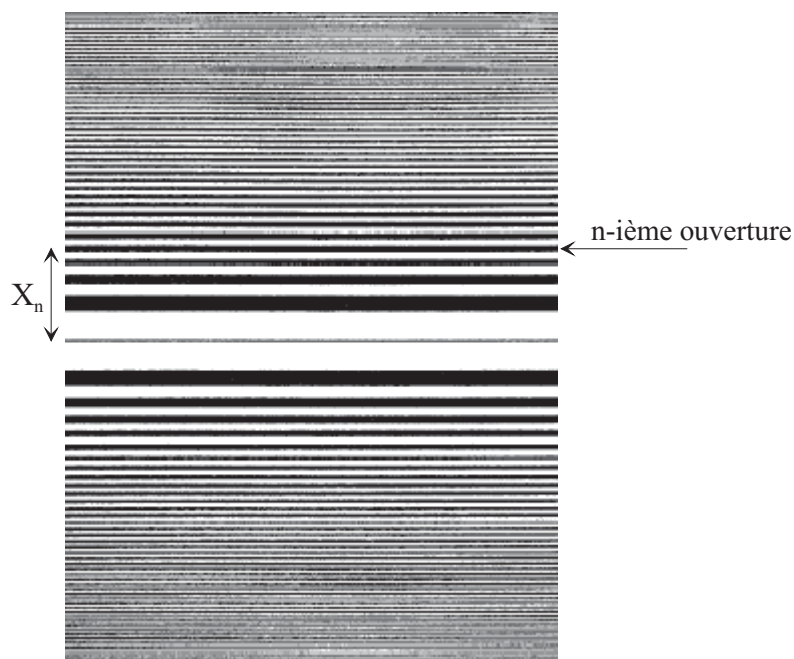


FIG. 7.4 – Motif de diffraction simple

$$X_n = \sqrt{4n \cdot \frac{\lambda r s}{2l}} \quad (7.1)$$

Où : l est la distance entre la source (L) et le détecteur (D)

r est la distance de la lentille considérée au détecteur (D)

s est la distance de la lentille considérée à la source (L)

λ est la longueur d'onde du faisceau lumineux qui éclaire la lentille

On s'aperçoit que r et s peuvent être commutés dans cette équation, ce qui explique que pour des positions des lentilles symétriques par rapport au milieu de l'accélérateur, les motifs soient identiques.

Le motif de la plupart des lentilles s'inscrit dans un carré de 30 cm de côté. Le nombre de lignes a été limité à 250 pour des raisons de facilité de fabrication. La lentille centrale ne compte que 46 lignes, alors que les lentilles aux extrémités comptent 250 lignes dans un carré de seulement 10cm de côté, leur ligne la plus étroite ne mesurant que 0,1mm.

7.1.4 Le système de détection

Le système de détection doit permettre de déceler un déplacement aussi petit que $25\mu\text{m}$ d'une quelconque lentille. La taille de la tache centrale de l'image produite (fig. 7.3) varie entre 0.1mm pour la lentille la plus proche du détecteur à 12.7mm pour la première lentille après la source. Les positions les plus délicates à déterminer sont celles des lentilles au milieu de l'accélérateur qui présentent les combinaisons les plus défavorables de taille de tache centrale (environ 5mm) et de grossissement (environ 2 :1). Le centre des images correspondantes doit être déterminé avec une précision de $\pm 50\mu\text{m}$ ($25\mu\text{m}$ de précision requise multipliée par le grossissement de 2 :1), ce qui correspond à 1% de la taille de la tache centrale.

Afin d'atteindre ce degré de précision, le détecteur est basé sur un dispositif électromécanique qui permet de balayer l'image dans les deux directions perpendiculaires. Le signal délivré correspond à la dérivée de l'intensité lumineuse par rapport à la position du détecteur. Cela permet de générer des graphes semblables à celui de la figure 7.5, et de déterminer le centre de la tache comme la position où la dérivée s'annule.

7.1.5 Tube à vide

Le tube dans lequel se propage le faisceau laser est mis sous vide afin de réduire au maximum les effets de réfraction dus à des éventuels gradients de température du milieu de propagation. Un système de pompage permet donc d'évacuer les 935m^3 du tube à $1,3 \cdot 10^{-5}\text{bar}$.

Les effets de l'air résiduel ont été estimés afin d'évaluer la stabilité de température nécessaire pour que les déviations dues à la réfraction n'excèdent pas $25\mu\text{m}$. Il s'est avéré qu'on pouvait tolérer jusqu'à 1°C d'écart entre le bas et le haut du tube évacué.

Par ailleurs des déflecteurs optiques installés autour des lentilles évitent à la fois que de la lumière ne contourne ces dernières et qu'un rayon issu directement de la source n'atteigne les parois du tube et s'y réfléchisse.

7.1.6 Mécanisme de support des lentilles

Les principaux éléments à aligner sont les sections accélératrices qui sont solidaires du tube optique. L'alignement étant basé sur la position des lentilles, il est donc primordial que le mécanisme qui lie ces dernières au tube soit le plus rigide possible, ce qui est d'autant plus délicat que les lentilles sont mobiles. Leur cadre en inox est donc monté sur un système de charnières à ressort qui assure que les lentilles viennent dans des positions en butée à la fois lorsqu'elles sont déployées et lorsqu'elles sont retractées. Les charnières sont montées sur la paroi intérieure supérieure d'un joint en aluminium de 8cm d'épaisseur

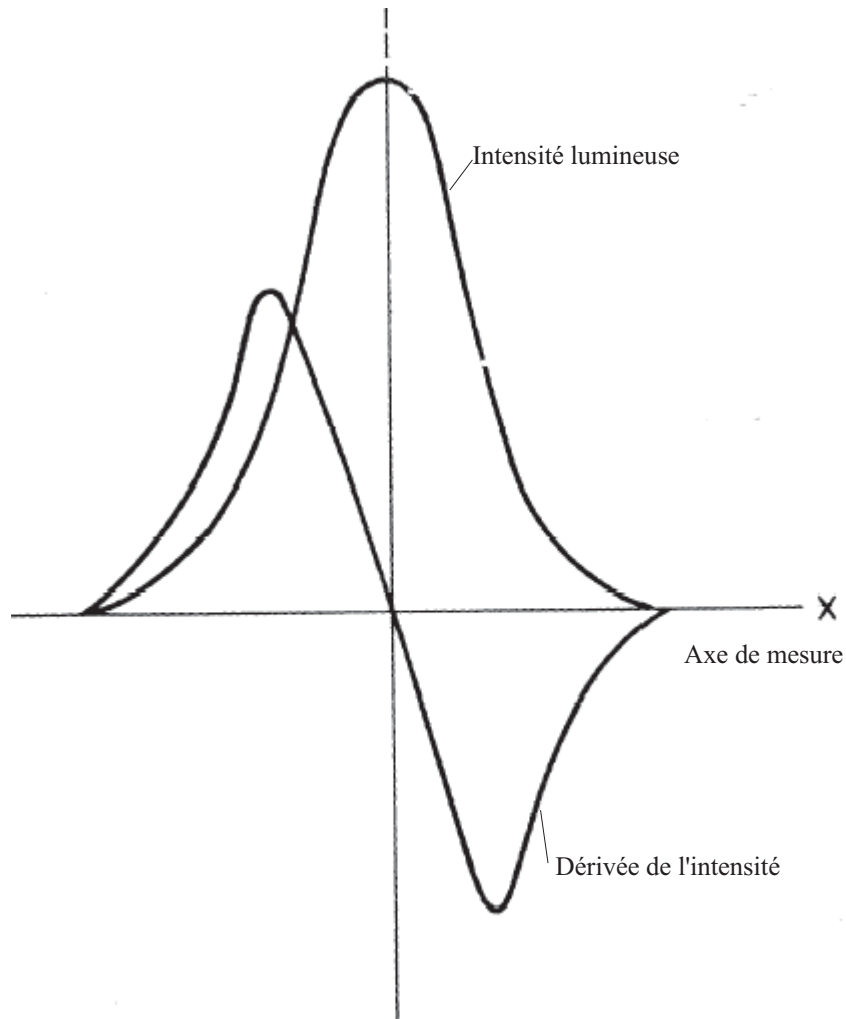


FIG. 7.5 – Graphe produit par le système de détection

qui est soudé sur l'extrémité finale de chaque module du tube optique.

Nous avons voulu mettre en évidence dans cette première section les caractéristiques essentielles d'un système d'alignement d'un accélérateur linéaire basé sur l'utilisation d'une ligne optique. L'accélérateur décrit était cependant sensiblement plus court que le CLIC et présentait des tolérances d'alignement nettement plus larges.

Nous allons donc consacrer la section suivante aux améliorations qui pourraient être apportées aux différents constituants du système afin d'en faire une adaptation qui pourrait éventuellement satisfaire les spécifications plus exigeantes du projet d'accélérateur du CERN.

7.2 Améliorations possibles pour un système adapté au CLIC

Nous allons considérer dans cette section que le principe suivant lequel la ligne optique est exploitée au SLAC pourrait servir également pour le CLIC. Si tel est le cas la détermination de la position des lentilles devrait cependant se faire avec plus de précision sur une distance cinq fois supérieure, mais offrirait l'avantage notable de fournir une référence de longue portée dans le plan vertical *et* le plan horizontal. Cela améliorerait la détermination des positions transverses X (voir 6.3).

Nous allons donc exposer les progrès technologiques qui pourraient permettre d'accroître les performances des trois éléments principaux que sont la source lumineuse, les lentilles de Fresnel et le détecteur, progrès qui constitueraient ainsi les premiers pas vers un système adapté au CLIC.

7.2.1 Améliorations possibles pour la source lumineuse

Les deux améliorations principales qui puissent être apportées au niveau de la source lumineuse sont les suivantes :

- diminution de la longueur d'onde ;
- augmentation de la puissance de sortie ;
- réduction de la surface émettrice.

L'intérêt d'utiliser une longueur d'onde plus courte s'explique notamment par l'équation (7.1) : si λ diminue, les lignes du motif de diffraction sont plus étroites et plus resserrées, il en résulte donc une image de résolution plus fine.

La longueur d'onde plus courte peut être obtenue en choisissant un matériau actif qui produit une longueur d'onde fondamentale plus courte que les 633nm du gaz hélium-néon. De tels lasers présentent néanmoins l'inconvénient d'être plus coûteux à acquérir et à faire fonctionner, et il serait sans doute préférable d'utiliser la seconde harmonique d'une source dont la longueur d'onde fondamentale serait plus élevée mais qui serait plus avantageuse financièrement.

Alors que le laser utilisé au SLAC délivre une puissance de quelques milliwatts seulement, la technologie actuelle permet d'atteindre facilement le watt. Un éclairage plus intense est un avantage si l'on considère la longueur plus grande du CLIC et le fait que des masques d'ordre supérieurs, aux motifs plus complexes transmettant moins de lumière, pourraient être utilisés.

Enfin l'utilisation d'une surface émettrice plus petite améliore la qualité de l'image. Des surfaces de diamètre inférieur à $10\mu\text{m}$ peuvent être obtenues par l'utilisation d'une

fibre optique à la sortie du laser.

7.2.2 Améliorations possibles pour la production de l'image de diffraction

Nous avons expliqué ci-dessus que l'utilisation d'une longueur d'onde plus courte permettrait d'affiner le motif de diffraction et donc les images produites. Usiner des ouvertures plus petites dans les plaques de métal n'est en effet pas un problème puisque les techniques actuelles permettent de produire les motifs avec une précision de $\pm 25\mu\text{m}$.

Par ailleurs, la précision de détermination de la position de la lentille pourrait être améliorée en employant un masque d'ordre supérieur dont la géométrie résulterait de la superposition de par exemple quatre masques élémentaires. Si la disposition de ces derniers était optimisée, chacun d'entre eux pourrait produire une image dans un quadrant différent de la surface de détection. La position de la lentille pourrait ainsi être déduite non plus de l'analyse d'une seule image mais de celle de quatre, d'où une précision de détermination renforcée.

7.2.3 Améliorations possibles pour le système de détection

Le mécanisme de détection de l'image de diffraction présenté plus haut nécessite un balayage de celle-ci. Ce balayage mécanique, nuisible en termes de précision, pourrait être évité par l'emploi d'un capteur CCD par exemple. Ce type de capteur est aujourd'hui disponible avec des dimensions permettant de couvrir toute l'image et de l'acquérir avec une très bonne résolution.

De surcroît, le fait de disposer de l'image sous forme numérique permet une détermination statistique de son centre en n'utilisant plus seulement la tache centrale mais plusieurs des pics d'intensité de part et d'autre de celle-ci (voir figure 7.6), ce qui permet également de renforcer la précision de détermination.

7.3 Vers un système adapté au CLIC

Faisons la synthèse des éléments de ce chapitre que nous avons donné jusqu'ici et voyons quelles seraient les démarches à conduire pour déterminer si l'alignement du CLIC pourrait utiliser comme référence primaire une ligne optique.

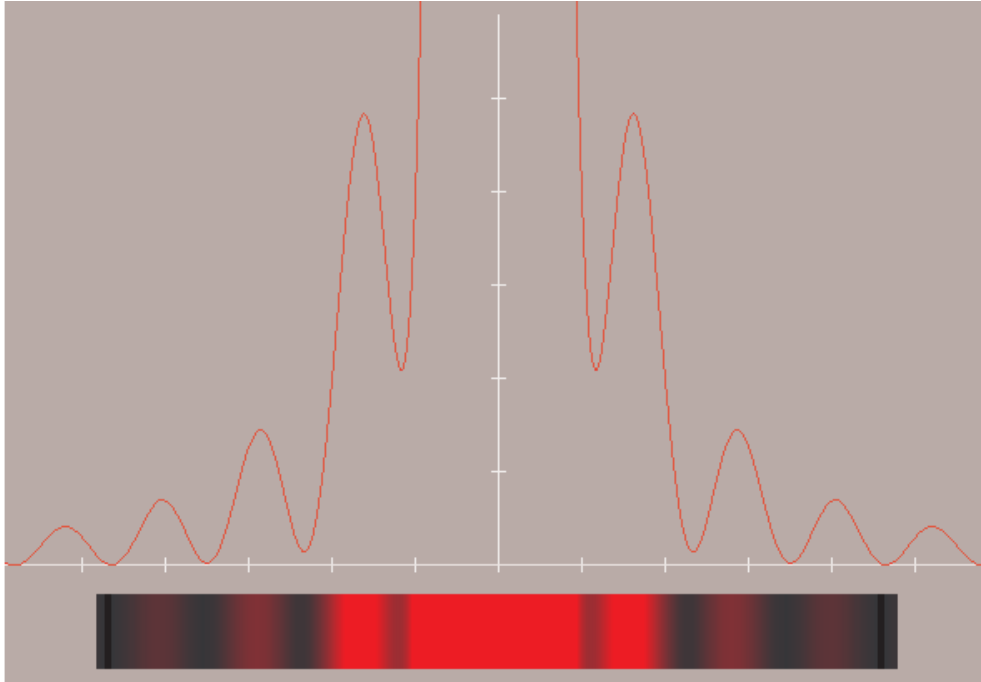


FIG. 7.6 – Pics d'intensité autres que le pic principal dans un motif de diffraction de Fresnel

7.3.1 Précision de positionnement par rapport à une ligne optique d'une quinzaine de kilomètres

Alors que nous avons indiqué ci-dessus quelles étaient les améliorations qui semblaient pouvoir être apportées au système SLAC, l'étude de l'impact de ces améliorations sur la précision d'alignement reste à mener.

Les dimensions et les exigences du CLIC sont telles qu'il est souhaitable de conduire cette étude en prenant en compte toutes les améliorations possibles. Il devra en résulter une estimation de la précision avec laquelle une lentille pourrait être positionnée par rapport à la ligne laser dans un système adapté à ce futur accélérateur.

7.3.2 Rattachement des éléments à aligner à la ligne optique

Si l'étude décrite ci-dessus montre que les lentilles peuvent être positionnées par rapport à la ligne laser avec une précision suffisante, il faudra alors réfléchir à la méthode de positionnement des éléments à aligner par rapport à cette référence.

Le CLIC nécessitant un système d'alignement actif (voir 2.2), un lien mécanique direct avec la ligne optique, comme au SLAC, est inconcevable. En effet, les lentilles ne peuvent pas toutes être rabattues en même temps et un positionnement en continu n'est donc pas possible. La solution qui nous semble la plus judicieuse pour la surveillance

des déplacements subis par les éléments est l'utilisation des écartomètres à fil, dans une configuration tout à fait analogue à celle présentée au chapitre 6.

La figure présentée en annexe 6 ressemble fort à celle de l'annexe 1. De nombreux éléments de ce possible réseau de métrologie sont identiques à ceux présentés au chapitre 6, et bénéficient donc déjà d'une étude avancée. L'effort le plus important, indépendamment de ceux consacrés au système laser, devrait à notre avis porter sur le système de liaison entre ligne optique et fils.

En effet, dans le réseau présenté en annexe 1, les fils étaient relativement facilement reliés aux lignes hydrostatiques puisque les écartomètres à fils étaient rendus solidaires des pots HLS par leur fixation sur le même support. Il faudrait trouver un procédé analogue permettant de connaître la position des fils par rapport à la ligne optique, avec bien sûr une précision adéquate. La difficulté supplémentaire par rapport aux HLS provient du fait que le faisceau laser et les lentilles sont logés dans un tube à vide qui demande une liaison mécanique additionnelle et induit donc également une perte de précision additionnelle.

Conclusion

Le CLIC est un projet très ambitieux au niveau de l’alignement comme nous avons pu le montrer au fil des chapitres de cette thèse. Le travail de doctorat que nous avons mené complète les travaux entrepris depuis dix ans déjà et visait à définir une proposition de système d’alignement la plus aboutie possible ainsi qu’à identifier clairement les questions auxquelles la poursuite de l’étude devra permettre de répondre.

Ce futur accélérateur partage avec les projets actuels d’accélérateurs linéaires des thèmes de recherche comme le choix de la configuration d’implantation ou encore le développement d’équipements que l’on qualifie encore de spéciaux. Il se démarque cependant à plusieurs niveaux :

- une précision d’alignement radial à atteindre très grande de $\pm 10\mu m$ sur 200m,
- sa longueur totale considérable de 35km,
- le fait que la position des éléments de l’accélérateur doit être surveillée et modifiable en continu, avec une précision micrométrique.

La réalisation et la mesure de déplacements micrométriques étaient des problématiques déjà bien maîtrisées au moment où notre recherche a débuté, grâce aux études préalables qui ont notamment permis de sélectionner les capteurs métrologiques qui allaient pouvoir être mis en oeuvre dans le système d’alignement.

La première démarche que nous avons effectuée a donc été de distinguer les caractéristiques des différentes références géométriques utilisées, dans le but d’identifier tous les éléments importants dans leur utilisation pour la matérialisation d’un alignement rectiligne de plusieurs kilomètres. Nous en avons tiré les éléments suivants :

- les fils sont utilisables pour des mesures horizontales mais nécessitent la connaissance de deux dénivelées le long du fil pour des mesures verticales exactes ;
- les lignes hydrostatiques fournissent une référence verticale de grande portée qui peut être utilisée pour mesurer des dénivelées entre éléments à aligner ainsi que le long des fils ;
- les lignes optiques ont l’avantage de pouvoir être considérées comme rectilignes à

condition de se propager dans un vide de qualité suffisante ;

Les fils tendus et les lignes hydrostatiques, auxquels se réfèrent les WPS et les HLS, ont une géométrie qui est sensible au champ de pesanteur. Le niveau de précision auquel il est prévu d'utiliser ces instruments étant supérieur à celui de la plupart des systèmes développés jusqu'ici, il était primordial d'utiliser un modèle du champ de pesanteur qui intègre deux phénomènes jusque là négligeables dans l'alignement des accélérateurs :

- déformations permanentes causées par la distribution des masses locales ;
- déformations variables causées par l'attraction luni-solaire.

Nos recherches ont montré que les effets de l'attraction luni-solaire devraient pouvoir être corrigés suffisamment bien pour ne pas poser de problèmes. Il s'avère par contre que des irrégularités locales des équipotentielles pourraient entraver l'utilisation efficace des inclinomètres et des niveaux hydrostatiques, et donc également celle des écartomètres à fil. Une réponse définitive à cette incertitude ne pourra être apportée que par des études plus poussées qui devront déterminer la meilleure précision avec laquelle il est possible de mesurer la géométrie d'une équipotentielle le long d'une ligne 35 km. Il s'agit d'un des principaux points à étudier pour la poursuite et la fin du développement du système d'alignement du CLIC.

Cette recherche avait également pour un de ses objectifs d'établir une proposition de configuration de ce système d'alignement. Nous avons donc préféré laisser ouverte la question concernant la géométrie du champ de pesanteur afin de pouvoir déterminer si les mesures que nous comptons mettre en oeuvre allaient pouvoir permettre d'aligner le CLIC selon ses spécifications. Nous avons donc procédé à la mise en équation des différents types d'observation du réseau et à l'élaboration des systèmes surdéterminés dont la résolution allait permettre de simuler le comportement du réseau conçu et de ses variantes.

Un logiciel de calcul et de simulation de réseaux de métrologie existait déjà au CERN, mais il ne permettait pas de traiter le type d'observations prévues pour notre projet. Ayant subi de nombreuses mises à jour, sa maintenance était devenue très délicate. Cette situation nous a conduit à consacrer un effort important au développement d'un nouvel outil qui devait nous permettre d'effectuer une estimation de la précision potentielle du système imaginé.

La grande souplesse de mise à jour recherchée nous a orienté vers les techniques de programmation orientées-objet, et vers le langage C++ en particulier. Un grand soin a été apporté à la conception du modèle-objet de ce logiciel, dans lequel nous avons tiré bénéfice des notions d'héritage et de polymorphisme, caractéristiques de ces techniques de développement. Ce modèle, bien que constitué de plus d'une centaine de classes, comprend

des groupes fonctionnels bien distincts ce qui le rend aisé à comprendre. Son enrichissement par diverses personnes au fil de la vie du logiciel s'en trouve ainsi facilité.

La phase de programmation nous a permis d'apprécier le confort apporté par l'aspect modulaire du modèle élaboré. Le logiciel conçu répond bien au critère de souplesse de mise à jour et s'avère bien adapté à l'environnement de recherche dans lequel il est utilisé.

Les simulations effectuées nous ont permis de définir une configuration optimale pour le réseau ainsi que d'estimer les précisions auxquelles les différentes mesures devront être effectuées :

- $\pm 5\mu m$ pour les mesures d'écart au fil en planimétrie, $\pm 8\mu m$ en altimétrie ;
- $\pm 7\mu m$ pour les mesures de dénivelées avec les niveaux hydrostatiques ;
- $\pm 2\mu m$ pour les mesures d'écarts par les RasNik.

Il est important de souligner que ces précisions, bien qu'elles soient souvent plus larges que les spécifications des capteurs, intègrent aussi des liaisons mécaniques et s'avèrent donc très contraignantes.

Même s'il n'est pas illusoire de penser qu'il puisse être possible de connaître la géométrie du champ de pesanteur avec la précision requise, ce travail se devait de comporter une réflexion sur une solution alternative à l'utilisation des niveaux hydrostatiques comme référence géométrique verticale primaire.

C'est l'ouverture que nous apportons avec des idées d'adaptation d'un système d'alignement déjà existant, basé sur l'utilisation d'un faisceau laser pour produire des images de diffraction dont l'analyse fournit des informations sur l'alignement des éléments de l'accélérateur.

Ce travail de doctorat nous a donc permis de dégager des orientations à privilégier dans la poursuite de l'étude du système d'alignement du CLIC. Trois axes de recherche se dégagent.

Le premier d'entre eux concerne la poursuite du développement du logiciel de simulation de réseaux métrologiques. Nous identifions deux améliorations qui devraient être apportées pour l'étude CLIC :

- la mise en oeuvre d'algorithmes matriciels spécifiques aux matrices à trous qui éliminera la surconsommation de mémoire et permettra de faire des simulations prenant en compte l'ensemble du réseau. Ainsi des jeux de positions vraisemblables des articulations de poutres tout au long du CLIC pourront être remis aux responsables de l'étude du faisceau de particules, ce qui conduira à un test de validation du critère de $\pm 10\mu m$ sur 200m énoncé ;
- compléter l'analyse actuelle des résultats des simulations par des critères de robustesse du réseau calculé, par le calcul de la plus petite faute décelable et par

un moyen de quantifier la contribution de chaque type d'observation à la solution finale.

Un autre axe de recherche concerne la définition géométrique du géoïde local du site d'implantation du CLIC. Les précisions visées pour cette définition de la géométrie des équipotentiels dans un repère cartésien sont de $\pm 1\mu\text{m}$ pour les déviations de la verticale et de quelques microns sur les dénivelées entre points distants d'une centaine de mètres. S'il s'avérait que de telles précisions ne pouvaient pas être atteintes, il est probable que l'usage des niveaux hydrostatiques devra être abandonné.

Cela nous conduit au troisième axe de recherche, qui consiste à approfondir les idées que nous avons présentées au dernier chapitre de cette thèse. En effet, les perspectives d'amélioration du système laser existant sont suffisamment prometteuses pour penser que ce système pourrait être adapté pour le CLIC. La poursuite de l'étude devra définir plus précisément les spécifications des différents éléments du système amélioré. L'un des points les plus importants sera la réflexion sur le dispositif de liaison géométrique entre le système laser, qui serait confiné dans une chambre à vide, et les autres éléments du réseau métrologique qui se trouveraient eux à l'extérieur de cette enceinte sous vide.

Bibliographie

- [1] B.A. Bell. *A simulation of gravity field around LEP*, 1985.
- [2] V.E. Bressler, R. Ruland, et D. Plouffe. Overview of the final focus test beam alignment system. Particle Accelerator Conference, 1993.
- [3] T. Budd. *Introduction à la programmation par objets*. Addison-Wesley, 1994.
- [4] W. Coosemans, I. Wilson, et P. Poirier. A micro-movement test facility for CERN linear collider studies. European Particle Accelerator Conference, 1990.
- [5] E.T. D'Amico et G. Guignard. *Multi-step lining-up correction of the CLIC trajectory*. CERN-PS/99-027, 1999.
- [6] J.P. Delahaye, I. Wilson, et al. *CLIC, a Multi-TeV e^\pm linear collider*. CERN-PS/99-062, 1999.
- [7] J. Ellis, E. Keil, et G. Rolandi. *Options for future colliders at CERN*. CERN-EP/98-03, 1998.
- [8] H. Favre. *Cours de mécanique, Tome I : statique*. Editions Leeman Zurich, 1953.
- [9] G.E. Fischer. Alignment and vibrations issues in tev collider design. International Workshop on Accelerator Alignment, 1989.
- [10] W. B. Herrmannsfeldt. Linac alignment techniques. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 12 : 9–18, 1965.
- [11] Silicon Graphics Incorporated. *Introduction to the Standard Template Library*, 2003. www.sgi.com/tech/stl/.
- [12] Wolfram Research Incorporated. *Eric Weisstein's world of Mathematics - Point-Line Distance 2D*, 2003. <http://mathworld.wolfram.com/Point-LineDistance2-Dimensional.html>.
- [13] G. Jobert et J. Coulomb. *Traité de géophysique interne, Tome I : sismologie et pesanteur*, chapter 18. Editions Masson, 1973.

- [14] The Numerical Algorithms Group Limited. *Numerical Libraries - C Library*, 2003. www.nag.co.uk/numeric/CL/CLdescription.asp.
- [15] H. Mainaud. *Une nouvelle approche métrologique : l'écartométrie biaxiale. Application à l'alignement des accélérateurs linéaires*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 1996.
- [16] M. Mayoud. Computing and analysis methods. CERN Accelerator School, Applied geodesy for particle accelerators, 1987.
- [17] M. Mayoud. Geodetic metrology of particle accelerators and physics equipment. International Workshop on Accelerator Alignment, 1989.
- [18] P. Melchior. *The Earth tides*. Pergamon Press, 1966.
- [19] P. Melchior. *The Tides of the Planet Earth*. Pergamon Press, 1973.
- [20] F. Merrit. *Standard handbook for civil engineers, 3rd edition*. McGraw-Hill, 1983.
- [21] P. Poirier. *L'alignement dynamique submicrométrique de cavités accélératrices*. Mémoire de soutenance du Diplôme de Recherches Spécialisées en Sciences, Strasbourg, 1991.
- [22] R. Resnick et D. Halliday. *Ondes, optique et physique moderne*. Editions du nouveau pédagogique, 1980.
- [23] R. Ruland. Some alignment considerations for the next linear collider. International Workshop on Accelerator Alignment, 1995.
- [24] W. Schnell. The study of a CERN linear collider, CLIC. Linear Accelerator Conference, 1988.
- [25] W. Schwarz. Concept for the alignment of the planned linear collider at desy. International Workshop on Accelerator Alignment, 1997.
- [26] H. van der Graaf, H. Groenstege, F. Linde, et P. Rewiersma. *RasNiK, an alignment system for the ATLAS MDT Barrel Muon Chambers*. www.nikhef.nl, 2000.
- [27] P. Vanicek et E. Krakiwsky. *Geodesy : the concepts*. North Holland Publ. Co., 1982.