



HAL
open science

Définition d'un processus de calcul appliqué sur le terrain pour l'alignement au niveau faisceau des équipements dans un accélérateur de particules

Léa Hadj Kaci

► **To cite this version:**

Léa Hadj Kaci. Définition d'un processus de calcul appliqué sur le terrain pour l'alignement au niveau faisceau des équipements dans un accélérateur de particules. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04757798

HAL Id: dumas-04757798

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04757798v1>

Submitted on 29 Oct 2024

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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Léa HADJ KACI

Définition d'un processus de calcul appliqué sur le terrain pour l'alignement
au niveau faisceau des équipements dans un accélérateur de particules

Soutenu le 05 septembre 2023

JURY

Monsieur Pierre KERVELLA	Président du jury
Monsieur Camille VENDEUVRE	Maître de stage
Monsieur Stéphane DURAND	Enseignant référent

Remerciements

Tout d'abord, je souhaiterais remercier les personnes ayant rendu possible et plaisant le déroulement de ce travail de fin d'études.

Je remercie donc Camille VENDEUVRE pour son encadrement, son accompagnement, ses conseils et le partage de ses connaissances pendant toute la durée du stage. Je remercie également les membres de la section Accelerator Survey and Geodesy du CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire), et plus particulièrement Pierre, Adolfo, Alban, Kacper et Ludovic, pour m'avoir permis de participer aux activités de terrain à leur côté et ainsi mieux saisir les enjeux de mon sujet de travail de fin d'études.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à tous les membres du groupe Métrologie Géodésique pour leur accueil chaleureux et le partage de leurs connaissances dans leur domaine respectif de compétences.

Je remercie également Stéphane DURAND, mon professeur référent, pour ses conseils et la relecture de ce mémoire.

Pour finir, j'adresse mes remerciements à ma famille et mes amis pour leur soutien.

Liste des abréviations

AD : Antiproton Decelerator – Décélérateur d’antiproton

APC : Acquisition Processing et data Control software – Logiciels de traitement des acquisitions et de contrôle des données

ASG : Accelerators Survey and Geodesy – Métrologie et alignement des accélérateurs

AT : Absolute Tracker

BE : BEam department – Département Faisceau

CCS : CERN Coordinate System – Système de coordonnées CERN

CERN : European Organization for Nuclear Research – Organisation Européenne pour la recherche nucléaire

CG : CERN Geoid – Géoïde du CERN

CLIC : Compact Linear Collider – Collisionneur linéaire compact

GM : Geodetic Metrology – Métrologie Géodésique

ISOLDE : Isotope Separator On Line Device – Séparateur d’isotopes

LEIR : Low Energy Ion Ring – Anneau Ion basse énergie

LEP : Large Electron Positron collider – Grand collisionneur d’électrons et positons

LGC : Logiciel Général de Compensation

LHC : Large Hadron Collider – Grand collisionneur de hadrons

SPS : Super Proton Synchrotron – Super Synchrotron à Protons

TSUNAMI : The Survey Unified Notebook for Alignment and Measurement Interventions – le carnet unifié des géomètres pour les interventions d’alignement et de mesures

PS : Proton Synchrotron – Synchrotron à protons

Glossaire

Alésage : point de référence d'un équipement qui peut être mesuré

Alignement : processus consistant à déplacer un équipement d'une position initiale à une position finale pré définie

CALA : point dont les coordonnées ne sont pas ajustées dans le calcul de compensation

Équipement : élément placé sur la trajectoire du faisceau

Faisceau : train de particules

Fiduciel : point de référence d'un équipement qui peut être mesuré (= alésage)

OBSXYZ : observation de point avec des précisions sur les coordonnées dans le calcul de compensation

POIN : point dont toutes les coordonnées sont ajustées dans le calcul de compensation

Verticale (locale) : direction du vecteur de pesanteur

\mathcal{R}_{nom} : désigne le repère de référence 'nom'

$X_{P|nom}$: désigne le vecteur \overrightarrow{OP} dans le repère de référence 'nom' d'origine O

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	4
Table des matières	5
Introduction	6
I CONTEXTUALISATION	8
I.1 LE CERN	8
I.2 LA SECTION ASG	9
I.3 LES DIFFERENTS REPERES DE REFERENCE.....	11
I.3.1 Le repère de référence CCS	11
I.3.2 Le repère de référence RST	12
I.3.3 Le repère de référence RST réel	14
II CALCUL DES ECARTS AU NIVEAU DES POINTS FAISCEAUX	15
II.1 SOLUTION DE CALCUL DES POINTS FAISCEAUX AVEC LES FRAME	15
II.1.1 Présentation du modèle FRAME	15
II.1.2 Les différentes mesures réalisées.....	17
II.1.2.1 Mesures polaires.....	17
II.1.2.2 Mesures de nivellement.....	17
II.1.2.3 Mesures d'écartométrie	18
II.2 UTILISATION DES SURFACES DE REFERENCE ALTIMETRIQUE	18
II.2.1 Présentation des trois surfaces de référence altimétriques	18
II.2.2 Impact du choix RS2K sur le calcul LGC2 pour la translation.....	19
II.3 IMPACT DE LA QUALITE DES PARAMETRES RST	21
II.3.1 Méthodes de détermination des paramètres RST	21
II.3.1.1 Fiducialisations.....	21
II.3.1.2 Paramètres mécaniques	22
II.3.2 Gestion des paramètres RST dans le calcul avec FRAME	23
II.3.2.1 Présentation de la stratégie adoptée.....	23
II.3.2.2 Méthode pour évaluer l'impact de la stratégie de calcul	25
II.3.2.3 Impact de la stratégie sur le calcul des points faisceaux.....	26
II.3.3 Comparaison avec la solution bureau existante	28
II.4 QUANTIFICATION DE L'AMELIORATION ATTENDUE SUR LES ALIGNEMENTS	31
III EXPLOITATION DU CALCUL DES POINTS FAISCEAUX POUR LE CALCUL D'UNE POSITION	
D'ALIGNEMENT	34
III.1 ENJEU DU CALAGE AVEC LES POINTS FAISCEAUX	34
III.2 CAS D'ÉTUDE AVEC DES ÉQUIPEMENTS EN RÉFÉRENCE	35
III.2.1 Présentation de l'opération servant de test.....	35
III.2.2 Processus de calcul mis en place.....	36
III.2.3 Limites et améliorations envisageables.....	39
Conclusion.....	40
Bibliographie	41
Table des annexes.....	42
Liste des figures et tableaux	55

Introduction

L'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (CERN) située à la frontière franco-suisse dispose d'un complexe d'accélérateurs de particules. Ces derniers sont utilisés pour mener diverses expériences afin d'étudier l'infiniment petit. Par le passé, ces accélérateurs ont conduit à des découvertes scientifiques d'envergure, comme le boson de Higgs [1] ayant valu un Prix Nobel de Physique à François Englert et Pierre Higgs en 2013.

Les accélérateurs sont constitués d'équipements qui agissent sur les particules de diverses façons. Ceux-ci, installés sur la trajectoire du faisceau de particules, sont régulièrement alignés par les géomètres du groupe BEam - Geodetic Metrology (BE-GM) dans le but de garantir un bon fonctionnement de ces complexes durant les périodes de circulation du faisceau permettant les expériences. Actuellement, l'alignement réalisé par la section Accelerators Survey and Geodesy (ASG) sur le terrain consiste à placer les fiduciels, points de référence de l'équipement qui sont mesurés, à une position définie. Cette position définie peut être soit la position théorique découlant de la trajectoire du faisceau fournie par les physiciens du CERN soit la position issue du calcul de la courbe lisse déterminée à partir des positions réelles d'un ensemble de fiduciels. Toutefois, pour les physiciens, le réel enjeu de l'alignement réalisé par les géomètres est le positionnement des points faisceaux à l'intérieur de l'équipement et non celui des fiduciels qui sont exploités pour les mesures. Néanmoins, ces points faisceaux sont inaccessibles sur le terrain une fois l'équipement installé dans la machine mais le raccord entre l'axe faisceau et les fiduciels est connu. Dans le but d'améliorer la qualité des alignements au niveau des points faisceaux pour mieux répondre aux demandes des physiciens et d'optimiser le temps de travail des équipes intervenant auprès des équipements pouvant être radioactifs, les géomètres ont aujourd'hui besoin de connaître la position des points faisceaux sur le terrain et non plus seulement lors du traitement au bureau. De plus, les physiciens attendent une précision sur les positions faisceaux calculées, qui ne peut être calculée aujourd'hui avec la méthode implémentée au bureau. La connaissance des positions faisceaux sur le terrain et leur calcul avec une précision est donc un premier besoin pour la section ASG.

Actuellement, certains équipements ne sont pas positionnés à leur position théorique. Cela amène des difficultés sur le calcul de mise en station et sur l'alignement qui est réalisé, notamment dans les cas de modification de la pente de la machine par rapport au théorique.

Une fois qu'il sera possible de déterminer les positions faisceaux sur le terrain, l'objectif est de proposer une solution aux mouvements des équipements par rapport à leur position théorique pour aligner les points faisceaux par rapport à des points faisceaux de référence.

L'objet du présent Travail de Fin d'Etudes (TFE) est le calcul de la position des points faisceaux directement sur le terrain supportant les diverses situations de mesures qui peuvent être rencontrées par les géomètres. Ce calcul des points faisceaux pourra ensuite permettre de réaliser sur le terrain un alignement des points faisceaux par rapport au faisceau et non plus des fiduciels par rapport aux fiduciels de référence. Dans un premier temps, le sujet sera placé dans son contexte avec une présentation du CERN, de certains termes de vocabulaire et des différents repères de référence. Ensuite, dans une seconde partie, la méthode de calcul des positions des points faisceaux utilisant des similitudes spatiales sera détaillée. Ses résultats seront comparés en fonction des observations et par rapport à la méthode déjà existante implémentée avec la base de données. Dans une troisième et dernière partie, la détermination des points faisceaux sera exploitée pour déterminer une position d'alignement pour les points faisceaux par rapport à des faisceaux de référence. Cette méthode devra permettre d'aligner les faisceaux entre eux et non plus les fiduciels.

I Contextualisation

Cette partie s’attache à présenter le contexte dans lequel s’inscrit le sujet, notamment en présentant le CERN et le rôle de la section ASG au sein du CERN. Le calcul de la position des points faisceaux reposant sur le passage entre deux repères de référence, une présentation de ceux-ci sera également faite.

I.1 Le CERN

Fondé en 1953, le CERN rassemble aujourd’hui 23 pays membres et 10 pays associés autour de la recherche nucléaire dans le cadre d’une collaboration internationale [2]. Il s’agit ainsi de l’un des plus importants laboratoires de recherche en physique fondamentale au monde. Le CERN localisé sur principalement deux sites, à Meyrin en Suisse et Prévessin en France, dispose d’un complexe de plusieurs accélérateurs de particules utilisés pour des expériences et dont certains sont souterrains. A l’exception du complexe CLIC dont la ligne CLEAR fonctionne de façon indépendante, tous les complexes sont liés entre eux, comme cela est visible sur la figure (Figure 1) rassemblant les lignes faisceaux des différents complexes.

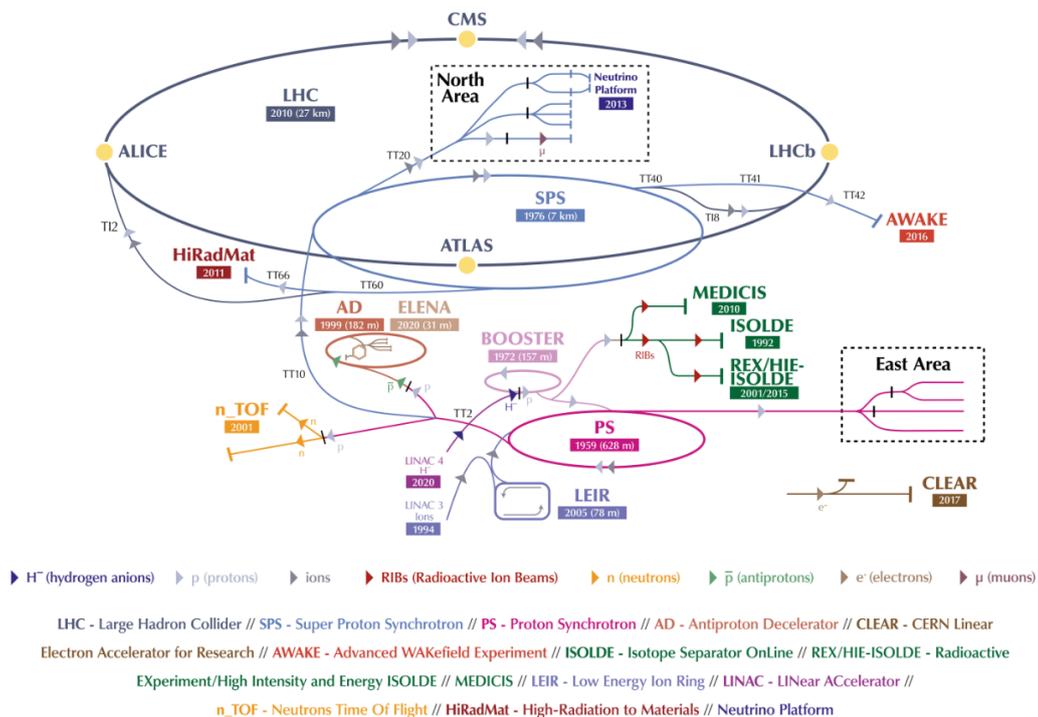


Figure 1 : Organisation des différentes lignes faisceaux du CERN

Source : cern.ch

L’ensemble des accélérateurs – sauf CLEAR – sont essentiellement alimentés depuis deux points de départ appartenant au complexe PS en fonction de la nature des particules constituant le faisceau initialement. Uniquement dans le cas d’un faisceau initial constitué

d'ions plomb, le faisceau passe dans le complexe LEIR avant de retourner dans les lignes faisceaux du complexe PS. Le complexe PS alimente ensuite trois autres complexes :

- Le complexe AD
- Le complexe ISOLDE
- Le complexe SPS qui va ensuite alimenter le complexe LHC

Le complexe LHC est actuellement le complexe disposant de l'accélérateur circulaire avec la plus grande circonférence du CERN et du monde atteignant les 27 km.

Toutes ces lignes faisceaux permettent d'accélérer et guider les particules en utilisant des aimants et autres équipements avant de les faire se collisionner dans les expériences dans le but de mieux comprendre ce qui constitue les particules de matière.

I.2 La section ASG

La section ASG est l'une des quatre sections du groupe BE-GM du CERN. Cette section, appuyée par du personnel contractant au moment des arrêts techniques, effectue les mesures et les alignements avant le retour du faisceau dans la machine. Comme cela a été défini dans son mandat, la section ASG est dédiée à « la mesure, l'alignement et le lissage des composants de l'accélérateur et des lignes de transfert associées pour la totalité du CERN¹ ». Cela représente environ 8 000 équipements alignés par cette section sur 60 km. Elle doit également procéder à des fiducialisations, processus que nous décrivons ultérieurement.

Dans le cadre des alignements des équipements de l'accélérateur, la section a des objectifs à atteindre vis-à-vis des positions théoriques des équipements définies par la trajectoire théorique du faisceau fournie par les physiciens du CERN. Pour les composantes radiales – direction normale au gisement du faisceau à l'entrée de l'équipement et dans le plan XY du repère de référence CCS qui sera défini dans la partie I.3.1 – et verticales – direction de la verticale locale – l'écart entre la position théorique et la position réelle doit être inférieur à 0,2 mm. Il s'agit d'une tolérance à 1 sigma. La tolérance longitudinale est de 0,5 mm. Ces valeurs peuvent varier dans certaines zones spécifiques ou pour certains équipements. Dans certains cas, comme cela sera expliqué dans la partie III.1, les valeurs de références ne sont pas les positions théoriques mais les positions dans la courbe lisse. En ce

¹ Mandat de la section : [3]

qui concerne le roulis de l'équipement – angle de la rotation de l'équipement autour de l'axe défini par le point faisceau entrée et le point faisceau sortie –, la mesure est réalisée avec un inclinomètre et la tolérance est de 0,1 mrad d'écart avec la valeur théorique, sauf dans les cas où il n'est pas possible d'effectuer une rotation de l'équipement à cause de la mise sous vide du tube dans lequel circule le faisceau. Dans cette situation, une rotation de l'équipement pour corriger le roulis pourrait endommager les soufflets au niveau des jonctions de tubes à vide entre les équipements et l'alignement est fait de sorte que seules les tolérances radiales et verticales peuvent être respectées.

Sur le terrain, les membres de la section ASG peuvent utiliser des alésages et des piliers en référence pour déterminer la position de l'équipement à aligner. Les points qualifiés de piliers, comme les nids et les potences, sont des points qui ne sont pas attachés à la machine. Les piliers ont des coordonnées réelles qui peuvent être mises à jour. Les alésages ont des coordonnées théoriques qui découlent de la trajectoire théorique du faisceau calculée par les physiciens du CERN. Ces coordonnées théoriques sont donc mises à jour uniquement dans le cas d'une modification de la trajectoire théorique du faisceau par les physiciens. Les coordonnées réelles des alésages et des points faisceaux sont calculées mais non exploitées sur le terrain.

Pour aligner les équipements des accélérateurs de particules, actuellement ce sont les alésages qui sont alignés, ce qui revient à supposer bonne la position des points faisceaux si celle des alésages l'est et que l'écart de roulis est dans la tolérance. A partir de la position initiale de l'équipement sur le terrain, les membres de la section utilisent les différents supports et systèmes de réglage des équipements pour effectuer d'abord la correction du roulis avec des déplacements verticaux, puis des déplacements verticaux pour régler le paramètre vertical et enfin des déplacements radiaux et longitudinaux.

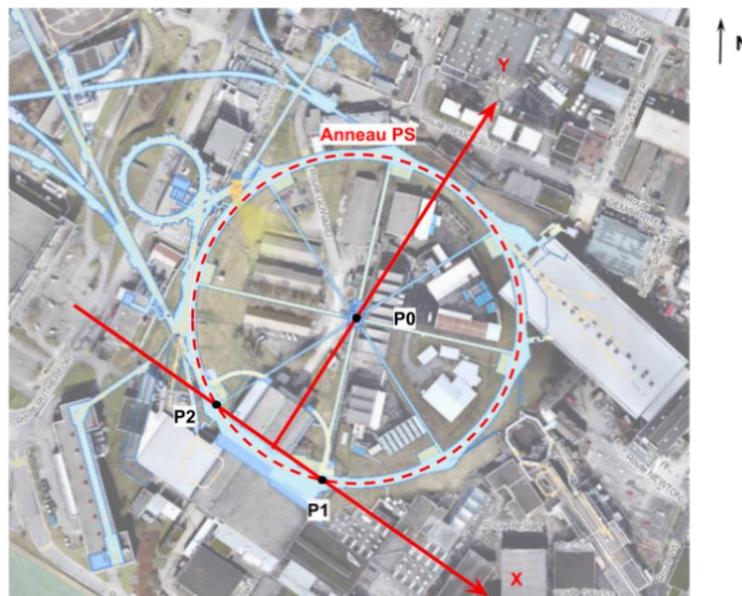
Pour procéder aux alignements des équipements, la section ASG dispose de plusieurs logiciels. En ce qui concerne la partie terrain, le logiciel TSUNAMI permet le pilotage des AT (Absolute Tracker) à distance et l'acquisition des mesures. L'interface permet d'avoir les informations sur les déplacements des équipements à effectuer. Ce logiciel de terrain fait appel à un deuxième logiciel pour les calculs de compensation : il s'agit de LGC2 qui utilise la méthode des moindres carrés pour effectuer la compensation des mesures. Les logiciels utilisés par les différentes sections du groupe BE-GM sont régulièrement mis à jour par la section APC.

I.3 Les différents repères de référence

Plusieurs repères de référence sont impliqués dans les alignements d'équipements. Nous allons voir la façon dont sont définis les repères de référence CCS et RST ainsi que la relation de passage entre eux. Nous verrons également le repère RST réel et sa relation avec le repère RST.

I.3.1 Le repère de référence CCS

Le principal repère de référence utilisé par les géomètres au CERN est un repère tridimensionnel direct : le repère de référence CCS (CERN Coordinate System) dont les caractéristiques sont présentées par Mark JONES [4]. Ce repère est défini à partir de trois points : P_0 au centre de l'anneau PS, P_1 et P_2 situés sur l'anneau PS comme indiqué sur le schéma ci-dessous (Figure 2). La direction et le sens de l'axe X du système de référence CCS sont donnés par le vecteur $\overrightarrow{P_2P_1}$. La direction de l'axe Y est donnée par un vecteur que l'on nommera \vec{y} et étant normal à $\overrightarrow{P_2P_1}$ tout en passant par P_0 . L'intersection de $\overrightarrow{P_2P_1}$ et de \vec{y} défini précédemment a pour coordonnées CCS $X = 2000$ m et $Y = 2000$ m. Pour le troisième axe, la direction de l'axe Z est donnée par la verticale au point P_0 . La coordonnée Z du point P_0 a été fixée à 2433,66 m.



Source photographie : GIS Portal - Machine (CERN)

Figure 2 : Définition du repère de référence CCS

Tous les points faisceaux, points alésages et points piliers, qu'ils soient théoriques ou réels, sont calculés dans le repère de référence CCS.

I.3.2 Le repère de référence RST

Le second repère de référence qui intervient dans l'alignement des équipements des différents accélérateurs est le repère RST. Il s'agit d'un repère tridimensionnel direct. Chaque équipement et assemblage d'éléments dispose de son repère de référence RST (Figure 3) qui est défini essentiellement à partir des points Entrée et Sortie du faisceau de particules.

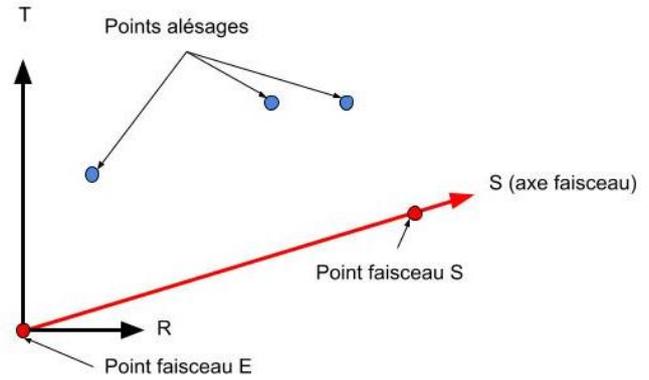


Figure 3 : Repère de référence RST d'un équipement

Les trois axes sont l'axe radial R, l'axe longitudinal S et l'axe vertical T, orthogonal aux deux premiers. Le repère a pour origine le point entrée E du faisceau et le point sortie S se trouve sur l'axe S du repère. L'axe R est orienté de sorte à être dans le plan défini par la trajectoire du faisceau dans l'équipement. Dans ce repère, sont connus en coordonnées les points faisceaux et les points alésages de l'équipement. Il est possible de passer du repère de référence CCS au repère de référence RST en utilisant différentes rotations et translations.

Nous allons à présent nous intéresser au passage de \mathcal{R}_{RST} à \mathcal{R}_{CCS} tel que Mark JONES l'a défini [5].

Le repère de référence RST ayant pour origine le point faisceau Entrée de l'équipement, la translation prend donc pour coordonnées celles du point Entrée dans le repère de référence CCS :

$$X_{P|CCS} = R_{RST}^{CCS} \cdot X_{P|RST} + X_{E|CCS}$$

Avec : $X_{P|CCS}$ les coordonnées d'un point P dans \mathcal{R}_{CCS}

$X_{E|CCS}$ les coordonnées du point faisceau Entrée E dans \mathcal{R}_{CCS}

$X_{P|RST}$ les coordonnées d'un point P dans le repère \mathcal{R}_{RST}

R_{RST}^{CCS} la matrice rotation qui permet de passer de \mathcal{R}_{RST} à \mathcal{R}_{CCS}

Il s'agit à présent de détailler la matrice R_{RST}^{CCS} avec les quatre angles intervenant dans le passage du repère RST au repère CCS. Les angles vont être définis dans l'ordre permettant de faire un passage du repère de référence CCS au repère de référence RST. Pour la suite,

on note \vec{t} le vecteur de la tangente à la trajectoire du faisceau au point faisceau Entrée de l'équipement.

Le premier angle est le gisement noté θ . Pour un équipement, cet angle est défini comme étant l'angle dans le sens indirect entre l'axe Y du repère de référence CCS et la projection de \vec{t} dans le plan XY du repère de référence CCS (Figure 4). Cet angle définit une rotation dans le sens autour de l'axe Z.

Le second angle à intervenir est la pente notée Φ . La pente est l'angle direct formé entre la projection de \vec{t} dans le plan XY du repère CCS et \vec{t} (Figure 4). Cet angle définit une rotation autour de l'axe X du repère ayant déjà subi la rotation du gisement.

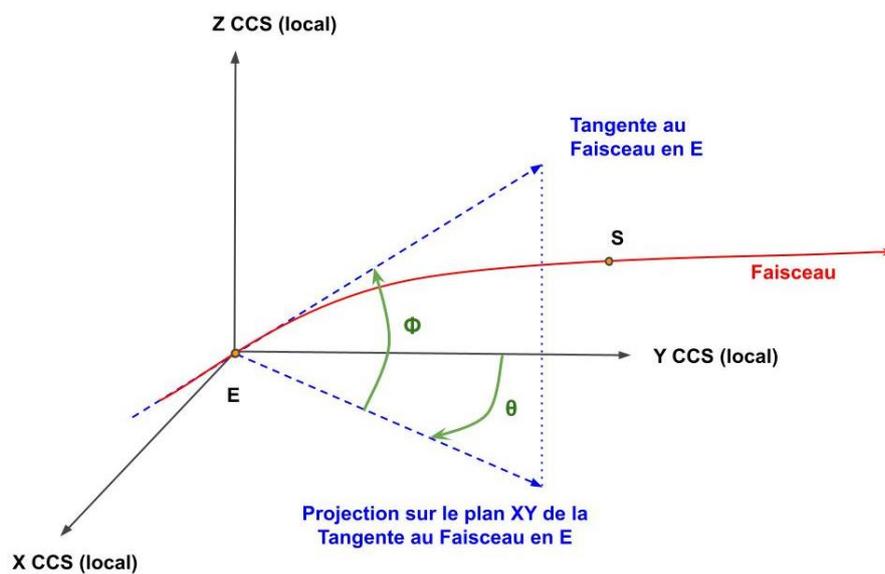


Figure 4 : Gisement θ et pente Φ au point faisceau Entrée E

Le troisième angle est le roulis du faisceau noté τ . Il s'agit de l'angle au point faisceau Entrée de l'équipement entre le plan XY du repère de référence CCS et le plan RS du repère de référence RST. Cet angle de sens indirect définit une rotation autour de l'axe Y du repère de référence CCS après application de la rotation du gisement et de la rotation de la pente.

Le quatrième et dernier angle est la déflection notée α . La déflection d'un équipement correspond à un angle de sens direct entre la tangente au faisceau au point faisceau Entrée de l'équipement et la tangente au point faisceau Sortie tel qu'illustré sur la figure ci-contre (Figure 5). La déflection est non nulle

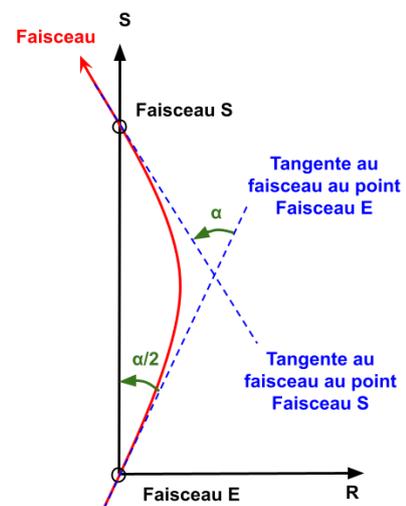


Figure 5 : déflection d'un équipement

uniquement pour les équipements qui dévient le faisceau tels que les dipôles. La moitié de cet angle définit une rotation autour de l'axe Z du repère de référence obtenu après les trois rotations précédentes.

Finalement, pour passer du repère de référence RST au repère de référence CCS, avec des matrices de rotation², nous avons l'enchaînement qui suit :

$$R_{RST}^{CCS} = R_Z(\theta) \cdot R_X(-\Phi) \cdot R_Y(\tau) \cdot R_Z(-\alpha/2) = R_Z(\theta) \cdot R_X^T(\Phi) \cdot R_Y(\tau) \cdot R_Z^T(\alpha/2)$$

Pour le passage d'un point P du repère de référence RST au repère de référence CCS, nous avons donc l'expression qui suit :

$$X_{P|CCS} = R_Z(\theta) \cdot R_X^T(\Phi) \cdot R_Y(\tau) \cdot R_Z^T(\alpha/2) \cdot X_{P|RST} + X_{E|CCS} \quad (1)$$

I.3.3 Le repère de référence RST réel

Lors de la mesure des points alésages sur le terrain, des coordonnées réelles sont obtenues pour ces points. Il est alors possible de calculer la position réelle du repère de référence RST de l'équipement, ce qui correspond au repère RST réel. Pour passer du repère de référence RST au repère de référence RST réel, il faut calculer des écarts angulaires entre le RST théorique et le RST réel pour la pente $d\Phi$, le gisement $d\theta$ et le roulis $d\tau$. Il faut également estimer la translation $T_{0|RST\text{ réel}}$ entre l'origine du repère de référence RST et l'origine du repère de référence RST réel, ce qui correspond aux écarts en R, S et T du point faisceau Entrée entre la position théorique et la position réelle. D'après Mark JONES [5], cela donne la relation de passage du repère de référence RST au repère référence RST réel qui suit :

$$X_{P|RST\text{ réel}} = R_Y^T(d\tau) \cdot R_X(d\Phi) \cdot R_Z^T(d\theta) \cdot X_{P|RST} + T_{0|RST\text{ réel}} \quad (2)$$

La méthode actuellement utilisée pour calculer les écarts angulaires est une estimation à partir des points alésages Entrée et Sortie, même si plus de deux alésages ont été mesurés. La translation, quant à elle, est estimée avec le point alésage Entrée. Cette méthode de calcul définie par Mark JONES [5] sera explicitée dans la partie II.2.3.

² Voir annexe 1 pour les matrices de rotation et la propriété de la transposée d'une matrice de rotation

II Calcul des écarts au niveau des points faisceaux

II.1 Solution de calcul des points faisceaux avec les FRAME

La détermination des écarts au niveau des points faisceaux va être réalisée en comparant les coordonnées calculées des points faisceaux et les coordonnées théoriques de ces mêmes points. L'écart d'altitude donnera l'écart vertical des points faisceaux et les écarts selon les directions X et Y dans \mathcal{R}_{CCS} donneront les écarts radiaux et longitudinaux en utilisant le gisement du faisceau. Pour cela, il est nécessaire d'estimer la position réelle des points faisceaux. La méthode choisie pour déterminer, par le calcul avec LGC2, les coordonnées des points faisceaux à partir des coordonnées des alésages mesurés est celle utilisant des similitudes spatiales avec la structure définie par Guillaume KAUTZMANN [6] qui va être présentée dans cette partie.

II.1.1 Présentation du modèle FRAME

Avant de commencer, il est à noter que le ROOT FRAME ne fait pas référence à un FRAME au sens de la similitude spatiale comme décrit dans la suite mais au repère de référence dans lequel tous les résultats de calculs sont fournis, c'est-à-dire \mathcal{R}_{CCS} .

Dans le logiciel LGC2, il est possible de définir une ligne *FRAME avec sept paramètres. Cela correspond à une similitude spatiale entre les points dans le FRAME et les points dans le ROOT FRAME. Un FRAME est donc déclaré avec 7 valeurs :

- tx, ty et tz désignent respectivement une translation en mètre dans la direction du premier axe, du second axe et du troisième axe.
- rx, ry et rz désignent respectivement un angle de rotation en grades autour du premier axe, du second axe et du troisième axe.
- λ désigne le facteur d'échelle.

A la suite de ces 7 paramètres, des mots clés permettent de définir les degrés de libertés pour le calcul de la similitude spatiale.

Considérons deux repères de référence \mathcal{R}_1 et \mathcal{R}_2 et un point A connu dans \mathcal{R}_1 dont les coordonnées sont $X_{A|R1}$. Pour calculer le point A dans \mathcal{R}_2 on peut le faire avec la formule suivante :

$$X_{A|R2} = \lambda \cdot R_X(rx) \cdot R_Y(ry) \cdot R_Z(rz) \cdot X_{A|R1} + T \quad \text{avec } T = \begin{pmatrix} tx \\ ty \\ tz \end{pmatrix}$$

Dans LGC2, cette relation se présente comme suit avec un FRAME :

*FRAME	tx	ty	tz	rx	ry	rz	λ
--------	----	----	----	----	----	----	-----------

Avec les FRAME, nous pouvons donc appliquer les différentes relations de passage permettant de passer du repère de référence RST réel au repère de référence CCS. Cela aboutit à l'enchaînement qui suit :

*FRAME 1	$X_E,$	$Y_E,$	$Z_E,$	0,	0,	$\theta,$	1
*FRAME 2	0,	0,	0,	$-\Phi,$	$\tau,$	$-\alpha/2,$	1
*FRAME 3	$T_{0X},$	$T_{0Y},$	$T_{0Z},$	$-d\Phi,$	0,	$d\theta,$	1
*FRAME 4	0,	0,	0,	0,	$d\tau,$	0,	1

Les FRAME 1 et 2 correspondent au passage du repère de référence RST au repère de référence CCS suivant l'équation (1). Les deux lignes sont nécessaires du fait de l'enchaînement des rotations défini par l'utilisation de FRAME. Enfin, les deux derniers FRAME définissent la relation de passage entre le repère de référence RST et le repère de référence RST réel. En-dessous de ces quatre lignes, il est possible de déclarer les points de l'équipement avec leurs coordonnées dans le repère de référence RST. En effet, la géométrie de l'équipement étant une constante dans le sens où tous les points de l'équipement se déplacent ensemble, les coordonnées dans le repère de référence RST réel sont identiques à celles du repère de référence RST. Tous les facteurs d'échelle sont de 1 et non ajustés.

La décomposition en FRAME successifs de la transformation entre $\mathcal{R}_{\text{RST réel}}$ et \mathcal{R}_{CCS} pourrait être résumée à une seule similitude spatiale mais, dans ce cas, il n'est plus possible d'avoir l'écart en roulis qui est défini entre $\mathcal{R}_{\text{RST réel}}$ et \mathcal{R}_{RST} .

Dans le calcul de compensation de LGC2³, sur les deux dernières lignes les paramètres non nuls sont ajustés lors de la compensation à l'exclusion du facteur d'échelle tandis que tous les autres paramètres sont fixés, ce qui fait six degrés de liberté pour le calcul. Dans les FRAME, les coordonnées RST des alésages sont considérées comme des observations (statut OBSXYZ), ce qui permet d'y associer une précision (par défaut 0,1 mm). Les alésages sont déterminés dans \mathcal{R}_{CCS} avec les mesures réalisées pour l'alignement. Etant connus dans les deux repères de référence, ils servent ainsi à estimer les paramètres de la similitude spatiale entre \mathcal{R}_{CCS} et $\mathcal{R}_{\text{RST réel}}$. Dans les FRAME, les points faisceaux sont déclarés fixes (statut CALA) avec leurs coordonnées RST et sont calculés

³ Voir annexe 2 pour la structure d'un fichier en entrée de LGC2 pour le calcul avec les FRAME

dans le repère de référence CCS : dans ce cas, la similitude spatiale définie par l'enchaînement de FRAME leur est appliquée. Il est ainsi possible de calculer les positions réelles des points faisceaux en utilisant les mesures sur les alésages et la géométrie qui lie alésages et faisceaux.

Bien que le calcul des FRAME présente six degrés de liberté, pour que le calcul aboutisse, il faut avoir deux points mesurés et une mesure de roulis ou plus de deux alésages mesurés. En effet, la mesure de roulis de l'élément est nécessaire lorsque deux alésages sont mesurés car les alésages Entrée et Sortie ont dans la majorité des cas des coordonnées R et T proches ce qui ne permet pas d'estimer de façon fiable la rotation autour de l'axe Y du FRAME 4 ou même ne permet pas au calcul de converger.

II.1.2 Les différentes mesures réalisées

Plusieurs types d'observations peuvent être réalisées et en fonction de celles-ci, j'ai identifié certaines modifications ou des ajouts à réaliser pour obtenir la position des points faisceaux en fonctions des alésages. Dans tous les cas, il faudra prendre en compte les coordonnées des alésages dans \mathcal{R}_{RST} , ce qui sera détaillé dans la partie II.3.

II.1.2.1 Mesures polaires

Le cas de mesures polaires – distance, angle horizontal et angle zénithal – réalisées par un AT ou une station totale est certainement le cas le plus simple. Le calcul des points faisceaux avec les FRAME nécessite seulement l'ajout de la mesure de roulis de l'équipement au fichier entrée de LGC2. Cette mesure, réalisée ponctuellement avec un inclinomètre portatif, doit être indiquée dans le repère de référence de l'équipement. Dans ce cas, à l'issue des calculs, nous disposons des écarts radiaux, longitudinaux et verticaux des points faisceaux et de l'écart de roulis de l'équipement.

II.1.2.2 Mesures de nivellement

Pour les mesures de nivellement, la prise en compte de la mesure de roulis de l'élément implique d'avoir un modèle de surface de référence altimétrique pour le calcul pour avoir une verticale locale servant de référence pour la mesure d'inclinaison. Actuellement, ce n'est pas le cas puisque le modèle de calcul ne le nécessite pas. En effet, nous utilisons seulement l'altitude H des points alésages et les dénivelées entre les points mesurés lors du nivellement. Afin d'estimer la position réelle de l'équipement ($\mathcal{R}_{RST \text{ réel}}$) il faut disposer des coordonnées complètes des points et non pas seulement d'une altitude H.

Avec les positions des points faisceaux obtenues, seul l'écart vertical a un sens étant donné que les seules observations dont nous disposons sont des dénivelées. Il est également possible de conserver l'écart de roulis.

II.1.2.3 Mesures d'écartométrie

La mesure d'écartométrie est une mesure de distance horizontale entre un point alésage et un fil de référence tendu le long de plusieurs équipements. Dans ce cas, on peut avoir les écarts entre la position théorique et la position réelle des alésages et des faisceaux dans la direction normale à un plan défini par deux vecteurs : le vecteur directeur du fil et le vecteur de la verticale du modèle de surface de référence altimétrique calculée pour le barycentre des points de référence⁴. Avec des mesures d'écartométrie, il est possible de calculer des écarts qu'en planimétrie.

II.2 Utilisation des surfaces de référence altimétrique

Actuellement, le logiciel de terrain TSUNAMI génère les fichiers d'entrée du calcul LGC2 avec la surface de référence altimétrique RS2K par défaut pour les mesures polaires et d'écartométrie et OLOC pour les mesures de nivellement. OLOC consiste à considérer que le plan XY du repère de référence CCS constitue une surface équipotentielle du champ de pesanteur. Dans cette partie, une présentation des surfaces de référence altimétrique sphère, CG1985 et RS2K est faite. Puis, l'impact de l'utilisation de RS2K par défaut sur le calcul de la translation est examiné.

II.2.1 Présentation des trois surfaces de référence altimétriques

Trois surfaces de référence altimétrique sont utilisées sur l'ensemble du site du CERN pour définir les altitudes H des points faisceaux et alésages (Figure 6).

La plus ancienne est la sphère, mise en place pour la création du SPS. Comme son nom l'indique, on considère que la surface équipotentielle du champ de pesanteur est sphérique. Cette sphère a un rayon de 6 371 km et le point P_0 , introduit dans la partie I.3.1, a une altitude de 433.65921 m par rapport à cette surface. Elle s'applique aux points du complexe AD et à une majeure partie des complexes PS et SPS, en rouge sur la Figure 6.

⁴ Voir l'annexe 3 pour les détails sur les mesures d'écartométrie

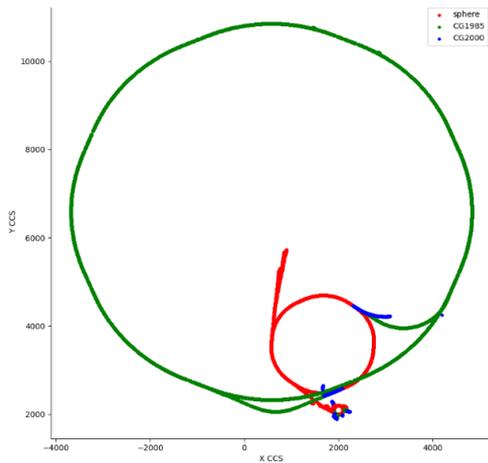


Figure 6 : Champ d'application des différents géoïdes pour la détermination des altitudes

Ensuite, la surface de référence altimétrique CG1985 a été mise en place. La surface équipotentielle de pesanteur est décrite par un paraboloid hyperbolique qui est tangent à l'ellipsoïde de référence GRS80 au point P_0 . Cette surface de référence altimétrique s'applique essentiellement pour les points du LHC et des lignes de transfert vers le LHC, en vert sur la figure.

La dernière surface de référence altimétrique mise en œuvre est la RS2K, aussi nommée CG2000. Elle se présente sous la forme d'une grille de résolution 1 km où la déviation de la verticale locale et l'ondulation sont connues en chaque nœud. Elle est appliquée seulement à certaines lignes de transfert récentes, en bleu sur la figure, mais est utilisée par défaut pour les conversions dans les calculs entre les données XYH et XYZ.

II.2.2 Impact du choix RS2K sur le calcul LGC2 pour la translation

Comme cela a été mentionné dans l'introduction de cette partie, le calcul de compensation LGC2 fait par TSUNAMI utilise par défaut la surface de référence altimétrique RS2K. Etant donné qu'il ne s'agit pas toujours de la surface de référence associée aux points, il faut contrôler l'impact sur les résultats par rapport au calcul avec la surface de référence associée à l'équipement.

RS2K est utilisé pour déterminer une coordonnée Z pour le calcul LGC2 à partir des coordonnées XY du repère de référence CCS et de l'altitude H des points. Dans le cas où la surface de référence altimétrique qui s'applique à la machine à laquelle appartient le point est bien RS2K, la coordonnée Z calculée est la coordonnée Z du repère de référence CCS. Mais pour la grande majorité des points, ce n'est pas le cas car une autre surface de référence altimétrique doit être utilisée. Cette conversion avec RS2K a un impact sur l'estimation des paramètres de la translation de l'avant dernier FRAME. Pour rappel, cela doit correspondre à l'écart entre la position théorique et la position réelle dans \mathcal{R}_{RST} . Toutefois, les FRAME sont paramétrés de sorte que la translation dans le premier FRAME correspond aux coordonnées CCS du point faisceau Entrée. Or, dans le calcul, une coordonnée Z calculée en utilisant RS2K est affectée aux points. Cela induit lors de l'ajustement du FRAME un rattrapage de cet écart entre le Z de \mathcal{R}_{CCS} et le Z issu de la conversion avec RS2K.

Il est possible d'évaluer l'impact sur la translation calculée à partir de l'écart en Z pour l'ensemble des points faisceaux en utilisant les coordonnées XYH puis en les convertissant soit selon RS2K en XYZ soit selon le modèle de surface de référence associé au point. J'ai obtenu les écarts présentés sur la Figure 7. En bleu, il s'agit des points avec un écart négatif entre le Z RS2K et le Z CCS. Tendrant vers le rouge sombre, ce sont les écarts qui sont positifs. En blanc, on retrouve les points avec un écart nul, ce qui correspond aux points qui ont pour surface de référence altimétrique RS2K. On remarque qu'au maximum, il y a un écart de -30 mm du côté négatif et $+12$ mm du côté positif. L'impact de RS2K est donc significatif pour la translation.

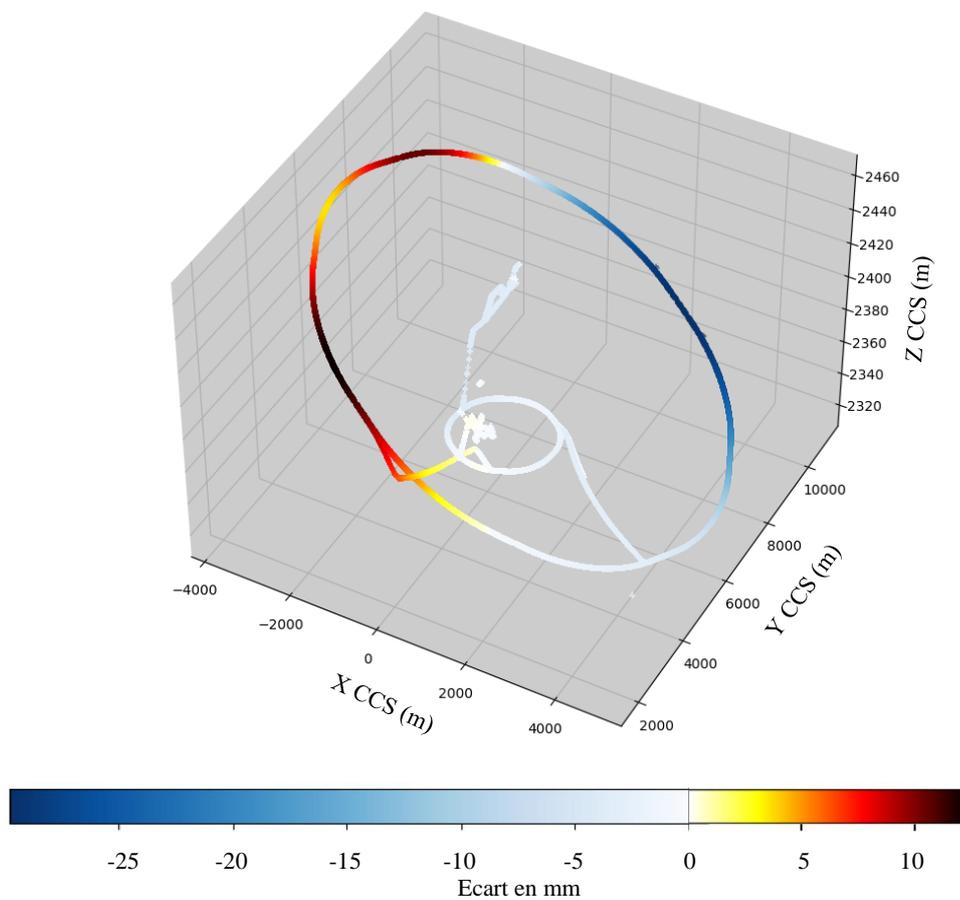


Figure 7 : Ecart en Z pour les points faisceaux du CERN

Ainsi, les valeurs de la translation calculée pour l'avant dernier FRAME ne sont pas lisibles directement comme des écarts RST pour le point faisceau Entrée. De ce fait, le calcul des écarts au niveau des points faisceaux ne peut se faire en exploitant les paramètres de passage de \mathcal{R}_{RST} à $\mathcal{R}_{RST \text{ réel}}$ et il faut donc partir des positions des points faisceaux calculées pour déterminer ces écarts. Pour corriger ce défaut sur l'estimation de la translation, il

faudrait disposer des coordonnées théoriques calculées avec une seule surface de référence altimétrique qui serait utilisée ensuite dans le calcul terrain.

L'utilisation de RS2K par défaut au lieu de la surface de référence altimétrique associée à l'équipement à aligner a également un impact sur la détermination du roulis. Cet impact reste acceptable pour les calculs.⁵

II.3 Impact de la qualité des paramètres RST

II.3.1 Méthodes de détermination des paramètres RST

Deux méthodes de détermination des paramètres RST sont appliquées. La première est la fiducialisation et la seconde vient des paramètres mécaniques.

II.3.1.1 Fiducialisations

La fiducialisation est une opération qui consiste à mesurer les points alésages et les points où doivent passer le faisceau avant l'installation de l'équipement dans la machine. Cela permet de connaître la position relative de ces points et de définir le repère de référence associé à l'équipement. Pour une fiducialisation, les mesures sont effectuées avec un Laser Absolute Tracker AT960 ou AT930. Pour la fiducialisation des dipôles du LHC, la procédure impose d'avoir une précision d'au moins 0,03 mm pour les points alésages par station de mesure [7]. L'ajustement avec toutes les stations ayant servi à mesurer les fiduciels doit conduire à une précision de 0,08 mm maximum. En plus de la mesure des fiduciels, lorsque la mesure de roulis est prévue avec une surface de référence elle est palpée afin de déterminer les paramètres du plan. Avec ce plan, on peut calculer un angle roll de référence qui doit être soustrait à la mesure de roulis pour obtenir le roulis de l'élément et pouvoir le comparer avec la valeur théorique. Les longueurs des équipements peuvent être mécaniques ou magnétiques. La longueur mécanique correspond à la longueur de l'équipement et la longueur magnétique correspond au trajet sous influence de l'équipement le long de la trajectoire du faisceau.

Bien que les paramètres RST puissent être déterminés de manière précise dans le cas des fiducialisations, les conditions dans lesquelles se déroulent les mesures pour

⁵ Voir annexe 4 pour l'évaluation de cet impact

l'alignement et les conditions de fiducialisation sont différentes. Notamment, la température peut être différente et cela entraîne une dilatation de l'équipement. Pour illustrer ce phénomène, nous allons considérer le cas d'un aimant constitué d'acier, dont le coefficient de dilatation est de 11,7 ppm/K [8]. Pour un seul degré d'écart entre la fiducialisation et l'alignement d'un aimant de 10 m entre alésages, nous avons déjà une variation de longueur de 0,117 mm ce qui est supérieur à la précision a priori des paramètres RST.

II.3.1.2 Paramètres mécaniques

La seconde méthode est celle des paramètres mécaniques. Dans ce cas, on considère que l'équipement a été fabriqué conformément au design et les coordonnées des points alésages et des points faisceaux sont issues des plans de l'équipement. On ne réalise pas de fiducialisation pour contrôler l'usinage et déterminer des paramètres par la mesure. La précision des paramètres RST dans cette situation est très variable d'un élément à l'autre puisqu'elle dépend directement de la qualité d'usinage et d'assemblage de l'équipement. Ainsi il est possible de trouver des équipements qui, une fois mesurés, présentent moins de 0,05 mm d'écart avec le dessin tout comme il est possible de trouver des équipements avec un écart de plus d'un centimètre. Il est donc difficile de quantifier la précision des paramètres RST des équipements avec cette méthode de détermination des paramètres.

Nom du complexe	SPS	LEIR	AD	PS	LHC	CLIC	ISOLDE
Equipements ayant que des paramètres RST mécaniques (%)	94.57	68.25	67.10	56.05	14.96	0	0

Tableau 1 : Estimation de la part d'équipements non fiducialisés par complexe du CERN

Ce tableau rassemble une estimation que j'ai réalisée de la part d'équipements par complexe qui ont seulement des paramètres mécaniques et n'ont pas été fiducialisés. Etant donné qu'il n'existe pas de champ sur la provenance des coordonnées RST dans la base de données, cette estimation est basée sur le nombre de chiffres significatifs des coordonnées RST. Les complexes avec la part la plus importante d'équipements non fiducialisés, à gauche dans le tableau, sont les complexes les plus anciens du CERN. De fait, les équipements installés sont également anciens et peuvent avoir été mis en service à une époque où les fiducialisations n'étaient pas encore réalisées. Toutefois, même pour les complexes plus récents, tous les équipements n'ont pas été fiducialisés, comme pour le LHC où c'est le cas de 14,96 % environ. Les attentes des physiciens en termes de précision sur l'alignement sont

moins exigeantes pour certaines catégories d'équipements ce qui permet de tolérer un potentiel défaut de fabrication et de se passer de fiducialisation.

II.3.2 Gestion des paramètres RST dans le calcul avec FRAME

Comme cela a déjà été mentionné, par défaut, la précision a priori des coordonnées dans \mathcal{R}_{RST} pour les calculs est de 0,1 mm. Elle est cohérente avec les résultats qu'on attend après une fiducialisation. Toutefois, elle peut être inadaptée quand le phénomène de dilatation s'applique à des aimants mesurant plus de 10 m et fiducialisés à des températures variant de celle de l'alignement. Mais cette précision peut surtout être inadaptée si l'usinage des équipements varie du résultat escompté par les dessins, ce qui est fréquent pour le paramètre S qui, historiquement, a été négligé pour l'installation des alésages.

II.3.2.1 Présentation de la stratégie adoptée

Ainsi, comme cela vient d'être évoqué, la qualité des paramètres RST peut varier d'un équipement à un autre. Pour les mesures réalisées avec un AT, cela vient impacter la valeur du facteur unitaire de variance à l'issue de la compensation avec les FRAME dans un grand nombre de cas. Le facteur unitaire de variance, calculé à partir du vecteur des résidus sur les observations et de la matrice de poids, permet d'avoir une idée de la qualité de l'ajustement qui est réalisé avec la méthode des moindres carrés.

Afin de comprendre ce qui peut influencer le calcul d'ajustement effectué pour le calcul des points faisceaux, il est d'abord nécessaire de préciser dans quelle condition il est réalisé. Sur le terrain, le calcul de compensation permettant de déterminer la position de la station et son orientation est effectué avant de procéder à l'alignement. Lorsque l'on procède au calcul des points faisceaux, les inconnues qui entrent en jeu sont alors uniquement liées à l'équipement aligné :

- Coordonnées dans \mathcal{R}_{CCS} des points alésages et faisceaux
- Rotations et translations permettant le passage entre \mathcal{R}_{RST} et $\mathcal{R}_{RST \text{ réel}}$

Les mesures des points alésages déterminent la position relative de ces points. Mais la géométrie interne est également renseignée avec les observations des points dans \mathcal{R}_{RST} indiquées avec une précision de 0,1 mm. Dans le cas où cette précision est trop optimiste par rapport à la réalité – dilatation importante par rapport la fiducialisation ou paramètres mécaniques différents du résultat de fabrication – l'estimateur du facteur unitaire de variance se dégrade du fait du choix de la précision a priori. Et dans ce cas-là, la position des points alésages est contrainte par à la fois les observations de l'AT et les observations de

coordonnées RST. Cela affecte également les valeurs de la similitude spatiale et donc la position des points faisceaux qui en découle. Pour illustrer ce qu'il se produit dans le calcul, nous allons utiliser des mesures effectuées sur un équipement nommé P42.XTCX.X0430631. En effectuant le calcul avec la précision sur les observations des coordonnées RST à 0,1 mm, le facteur unitaire de variance de l'ajustement par méthode des moindres carrés est d'environ 50.

Ayant connaissance de l'historique des coordonnées RST – notamment l'absence de fiducialisation avec un paramètre S négligé lors de la fabrication par rapport à R et T – il est donc souhaitable dans le calcul que la position des points alésages ne soit pas contrainte par le paramètre S mais uniquement par les observations de l'AT. La première solution serait de dépendérer l'observation S mais cela dégrade la précision des points faisceaux obtenus et peut conduire à un retournement du repère RST lors de l'ajustement. La seconde solution est d'obtenir une précision sur le paramètre S cohérente avec la fabrication de l'équipement qui est mesuré en se basant sur la longueur entre les alésages observée par l'AT qu'on considère bien plus fiable que les cotes de plan. Afin de pouvoir estimer la variation en longueur de l'équipement entre la géométrie mesurée et la géométrie issue des paramètres RST, l'observation des alésages dans \mathcal{R}_{RST} selon l'axe S est dépendérée en mettant une précision de 10 mm. La dégradation de la qualité porte uniquement sur le paramètre S car dans le cas d'un alignement avec l'utilisation de seulement deux alésages, il est impossible de détecter un potentiel défaut dans plusieurs directions. Du fait de la stratégie de positionnement des alésages sur les équipements [9] avec des coordonnées R et T choisies identiques pour les points alésages Entrée et Sortie, le défaut de géométrie pouvant être mis en évidence sur le terrain peut être principalement imputé au paramètre S. A l'issue du calcul avec l'observation selon l'axe S dépendérée, nous obtenons des écarts selon l'axe S dans le repère $\mathcal{R}_{RST\text{ réel}}$ des points alésages de l'équipement. Afin d'effectuer un calcul avec une précision le long de l'axe S cohérente avec la situation et ne contraignant pas trop le calcul, il faut déterminer une nouvelle précision en se basant sur la dispersion constatée de la coordonnée S. Le calcul se fait de la façon suivante pour un équipement, en se basant sur l'estimation de la variance d'une variable aléatoire pour un échantillon [10] :

$$\sigma_{S_new} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ecart_s_i - \overline{ecart_s})^2}{n - 1}}$$

Avec : n : le nombre de points mesurés

$ecart_s_i$: l'écart selon l'axe S entre la position issue des paramètres RST et

la position issue de mesures d'un alésage i .

$\overline{ecart_s}$: la moyenne des $ecart_{s_i}$ pour l'équipement, valant 0 avec l'ajustement réalisé par LGC2

Dans le cas de l'aimant servant d'exemple et présentant un défaut de longueur de 14,76 mm, nous avons $\sigma_{S_{new}} = 10,44$ mm. Un deuxième calcul de compensation est ensuite effectué en utilisant cette nouvelle précision calculée. Le facteur unitaire de variance vaut alors environ 0,99 ce qui reflète un choix de précision plus adapté à la situation.

Le calcul de compensation avec une précision adaptée permet d'avoir un indicateur sur la qualité de l'ajustement qui est effectué pour les paramètres de la similitude spatiale et n'étant pas entaché par soit la mauvaise qualité des paramètres RST soit la dilatation de l'équipement au moment de l'alignement.

II.3.2.2 Méthode pour évaluer l'impact de la stratégie de calcul

Pour évaluer l'impact de la stratégie de calcul pour les paramètres RST sur l'ajustement des points faisceaux, cette stratégie a été appliquée à 375 stations. Ces stations ont mesuré des équipements répartis dans l'ensemble des accélérateurs du CERN. Pour chaque station, nous disposons d'un fichier d'entrée pour LGC2 généré par la base de données, sous forme de texte, contenant les informations relatives aux mesures, aux frames, aux coordonnées dans \mathcal{R}_{CCS} et \mathcal{R}_{RST} .

Pour reproduire la situation de calcul du terrain, la première étape consiste à générer un fichier pour la mise en station à partir des fichiers initiaux. Il ne faut pas prendre en compte dans ces fichiers les informations concernant les points liés à des équipements qui sont à aligner. Les informations sur les FRAME sont également ignorées. Une fois ce fichier pour la mise en station traité par LGC2, nous obtenons un fichier résultat sous format json.

Les informations de la mise en station (coordonnées ajustées XYZ, gisement) sont récupérées pour les prochains fichiers de calcul. Comme LGC2 prend en entrée du calcul des coordonnées XYH, les coordonnées XYZ sont transformées avec le modèle RS2K pour avoir un format compatible pour le calcul.

Ensuite on réalise un premier calcul des points faisceaux qui servira de témoin. Ce calcul utilise les données de la mise en station et les FRAME avec les précisions des paramètres RST toutes à 0,1 mm.

Un deuxième calcul est réalisé avec l'application de la stratégie d'ajustement des paramètres RST. Pour évaluer l'écart entre les coordonnées théoriques et la géométrie mesurée, la précision du paramètre S est d'abord fixée à 10 mm. A l'issue de l'ajustement de LGC2, on obtient un écart entre la position théorique et la position ajustée des points alésages selon l'axe S. Avec cet écart, on calcule σ_{S_new} pour l'affecter au paramètre S des points alésages. On effectue un second calcul avec la précision calculée et on obtient un fichier résultat.

Il est à présent possible de comparer les résultats entre les calculs témoin et avec σ_{S_new} pour évaluer l'impact de la stratégie de calcul sur le calcul des points faisceaux.

II.3.2.3 Impact de la stratégie sur le calcul des points faisceaux

Comme expliqué précédemment, les deux méthodes de calcul, celle avec la précision de 0,1 mm et celle avec la précision adaptée recalculée, ont été appliquées aux mesures de 375 stations afin de comparer les résultats. La valeur du facteur unitaire de variance dans les deux cas pour chaque station est affichée dans la figure qui suit (Figure 8).

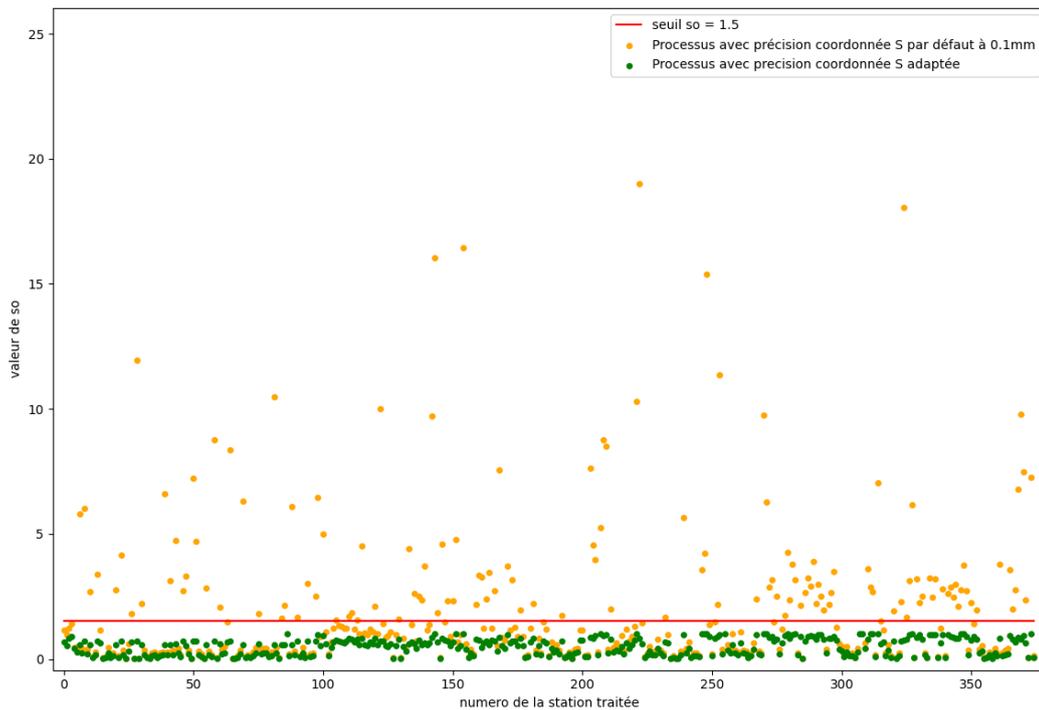


Figure 8 : Evolution du facteur unitaire de variance (so) selon la méthode de gestion des paramètres RST (échelle de so logarithmique)

Sur la figure, nous pouvons constater deux groupes de résultats pour le processus de calcul avec une précision recalculée représentés en vert. Il y a les facteurs unitaires de variance qui tendent vers 1 et ceux qui tendent vers 0. En effet, le cas où les paramètres RST

théoriques sont de bonne qualité correspond à une situation où les résidus sont nuls. De ce fait, le facteur unitaire de variance tend vers 0. Dans le cas où les paramètres RST ne sont pas d'une assez bonne qualité pour le calcul et que l'on recalcule une précision pour le paramètre S, cette précision est calculée en fonction des résidus sur l'observation S (correspondant à *ecart_s*) ce qui, de fait, rapproche la valeur du facteur unitaire de variance de 1. Sur le terrain, le seuil de 1,5 pour le calcul des points faisceaux permet d'alerter l'utilisateur que l'ajustement réalisé peut présenter un problème n'étant plus lié aux paramètres RST dans la direction de l'axe S, comme les fautes lors de mesures, ou un problème lié aux paramètres RST mais dans les autres directions dans le cas d'équipements avec plus de deux fiduciels mesurés.

Pour toutes les stations, on peut évaluer l'écart de longueur observé entre la longueur théorique de l'équipement entre les alésages Entrée et Sortie et la longueur mesurée :

$$ecart\ longueur = longueur_{théorique} - longueur_{réelle}$$

Nombre de stations traitées		375
Valeur moyenne du facteur unitaire de variance	Sans adaptation de la précision du paramètre S	4,199
	Avec adaptation de la précision du paramètre S	0,489
Ajustements dépassant le seuil de 1.5 (%)	Sans adaptation de la précision du paramètre S	38
	Avec adaptation de la précision du paramètre S	0
Ecart moyen de longueur observé (mm)		0,33
± l'écart-type (mm)		± 3,55

Tableau 2 : Comparaison des résultats entre avant et après l'adaptation de la précision

De ce bilan (Tableau 2), nous pouvons déjà constater qu'environ 38% des calculs des points faisceaux avec les précisions standards de 0,1 mm ne passeraient pas le seuil du facteur unitaire de variance de 1,5 ce qui est également visible sur la Figure 8 avec la dispersion des points en orange. Cela signifie que pour tous ces calculs, il faudrait faire des modifications sur les paramètres du calcul d'ajustement, telles que la précision des observations de l'AT ou des paramètres RST. Cela demande du temps sur le terrain et des connaissances sur la méthode des moindres carrés et l'obtention des paramètres RST. De ce fait, la gestion des paramètres RST avec la détermination d'une nouvelle précision permet

de faire une première correction du calcul de compensation que l'on sait nécessaire dans un grand nombre de cas.

Toutefois, il faut noter que ce choix de modification de la précision uniquement du paramètre S peut présenter un risque dans certaines situations spécifiques. Quand les alésages mesurés ont les mêmes coordonnées R et T, il semble logique de faire porter le défaut observé uniquement sur le paramètre S, surtout sachant qu'il s'agit du paramètre négligé lors de la construction des équipements. Mais lorsque nous ne sommes plus dans cette situation, un potentiel défaut portant sur le paramètre R ou T va être affecté au paramètre S ce qui entraîne un léger basculement du repère RST autour de l'axe défini par les deux fiduciels. De ce constat, il découle deux réflexions. La première est de favoriser les mesures sur des alésages ayant les mêmes coordonnées R et T ou bien d'avoir un maximum d'alésages pour avoir une meilleure appréciation des défauts selon R et selon T. La seconde réflexion est qu'il faut laisser la possibilité à l'utilisateur pour pouvoir reprendre les calculs en modifiant les précisions des paramètres R et T.

Il faut également noter que le défaut de longueur d'un équipement n'est détectable que dans le cas de mesure polaire. Cela signifie qu'il peut être corrigé dans le calcul uniquement dans cette situation et donc il y a des disparités dans les résultats des positions calculées entre le cas de mesures polaires et le cas de mesures de nivellement et d'écartométrie⁶. Sans correction des coordonnées RST dans la base de données, ces disparités sur le terrain entre polaire et nivellement/écartométrie subsisteront.

II.3.3 Comparaison avec la solution bureau existante

La méthode de calcul des écarts des points faisceaux actuellement utilisée au bureau a été définie par Mark JONES [5]. Cette méthode consiste à calculer, dans un premier temps, les coordonnées dans \mathcal{R}_{RST} des points mesurés sur le terrain et connus en coordonnées CCS. Seuls deux points sont utilisés, par défaut il s'agit des alésages Entrée et Sortie :

$$X_{P_{reel}|RST} = R \cdot (X_{P|CCS} - X_{E\ beam|CCS}) = \begin{pmatrix} r_P^R \\ s_P^R \\ t_P^R \end{pmatrix}$$

⁶ L'annexe 3 sur l'écartométrie détaille également l'écart sur les résultats dans le cas d'un défaut de longueur entre les alésages.

Les coordonnées théoriques d'un point P dans \mathcal{R}_{RST} sont connues : $\begin{pmatrix} r_P^T \\ s_P^T \\ t_P^T \end{pmatrix}$

Une fois les points mesurés dans \mathcal{R}_{CCS} connus dans \mathcal{R}_{RST} , leurs coordonnées RST sont utilisées afin d'estimer les valeurs de $d\Phi$ et $d\theta$ entre \mathcal{R}_{RST} et $\mathcal{R}_{RST\text{ réel}}$:

$$d\theta = \tan^{-1} \left(\frac{r_S^R - r_E^R}{s_S^R - s_E^R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{r_S^T - r_E^T}{s_S^T - s_E^T} \right)$$

$$d\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{t_S^R - t_E^R}{s_S^R - s_E^R} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{t_S^T - t_E^T}{s_S^T - s_E^T} \right)$$

Quant à l'angle $d\tau$, il est estimé avec la mesure de roulis et la verticale locale du point de mesure.

Connaissant ces éléments, la translation entre \mathcal{R}_{RST} et $\mathcal{R}_{RST\text{ réel}}$ est estimée en exploitant les coordonnées du point alésage Entrée :

$$T_R = X_{E_theorique|RST} - R_Y^T(d\tau).R_X(d\Phi).R_Z^T(d\theta).X_{E_reel|RST}$$

Nous avons maintenant en notre possession les informations nécessaires pour calculer l'écart entre les positions réelles et théoriques des points faisceaux dans \mathcal{R}_{RST} :

$$\Delta R = X_{P|RST\text{ réel}} - X_{P|RST}$$

$$\text{Avec } X_{P|RST\text{ réel}} = R_Z(d\theta).R_X^T(d\Phi).R_Y(d\tau).(X_{P|RST} - T_R)$$

Afin d'obtenir les écarts radiaux DR et longitudinaux DL , il faut projeter les écarts précédents dans le plan XY du repère de référence CCS. Cela correspond à appliquer les rotations de passage de \mathcal{R}_{RST} à \mathcal{R}_{CCS} à l'exception de celle du gisement puisque nous souhaitons avoir les écarts dans les directions normales et colinéaires à ce gisement :

$$\begin{pmatrix} DR \\ DL \\ DZ \end{pmatrix} = R_X^T(\Phi).R_Y(\tau).R_Z^T\left(\frac{\alpha}{2}\right).\Delta R$$

A partir des écarts dans \mathcal{R}_{CCS} des points faisceaux, il est possible de calculer leur position réelle en utilisant les coordonnées théoriques.

Il faut noter que cette méthode de calcul des écarts présente plusieurs inconvénients. Le premier est la prise en compte de seulement deux points de l'équipement pour calculer les écarts même dans le cas où bien plus de fiduciels ont été mesurés sur le terrain. Le second, c'est l'estimation de la translation T_R avec seulement le point fiduciel Entrée. Outre le fait

que la translation n'est pas estimée avec toutes les informations à disposition, la gestion des équipements ayant des défauts de paramètres RST, notamment le long de l'axe S, n'est pas forcément adaptée à ce qu'on pourrait attendre dans un tel cas.

La figure qui suit (Figure 9) explique la façon dont les points faisceaux sont calculés avec la méthode bureau (interface GEODE) qui vient d'être présentée et avec le calcul des points faisceaux avec les FRAME dans le cas d'un équipement présentant un défaut de longueur entre les alésages mesurés.

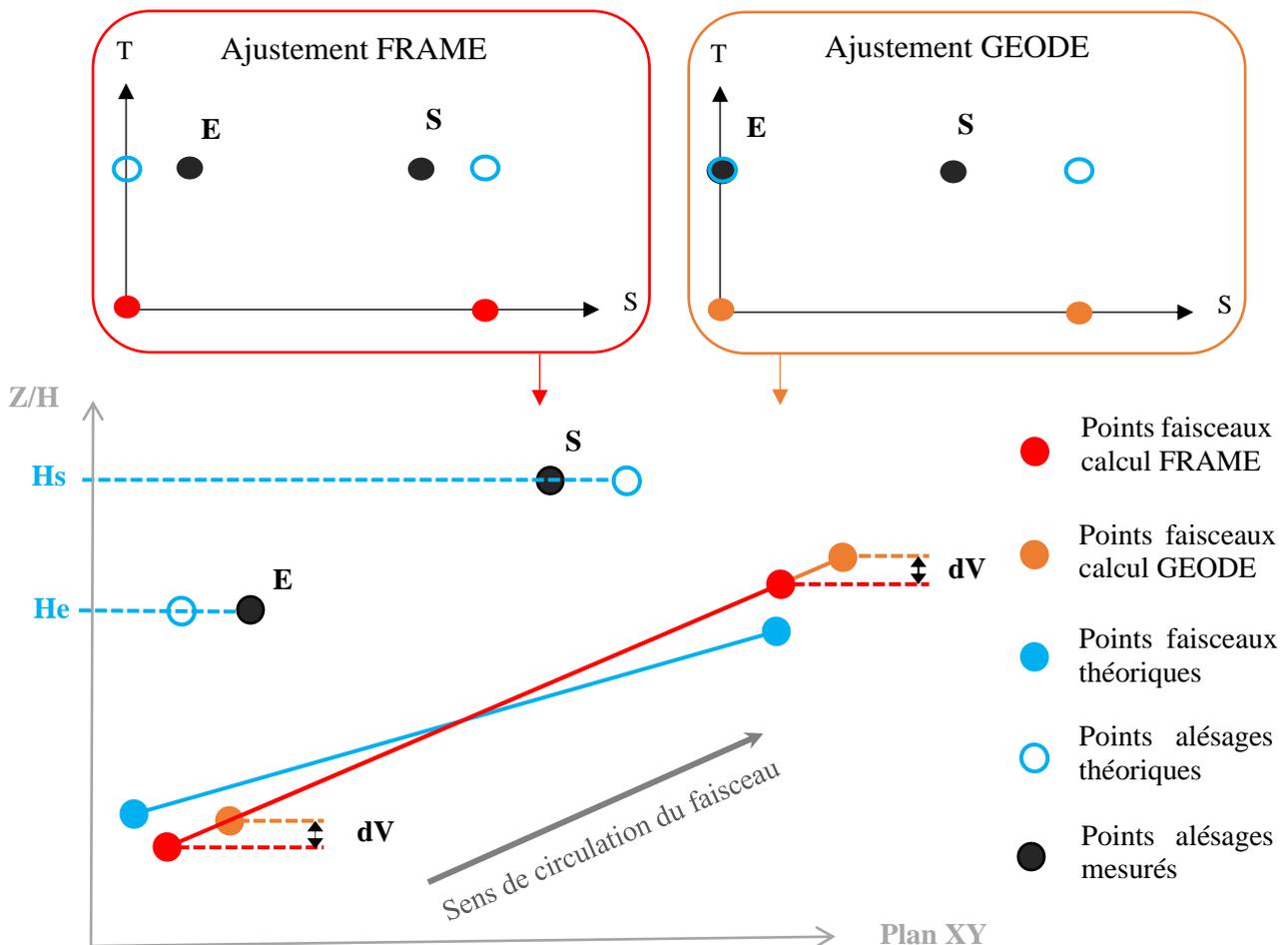


Figure 9 : Comparaison de la méthode de calcul des écarts des points faisceaux

Les alésages entrée E et sortie S sont respectivement alignés aux altitudes des points théoriques entrée H_e et sortie H_s sur la figure. Dans le cas d'un défaut en longueur de l'équipement, la méthode bureau de calcul des écarts des points faisceaux actuelle transmet le défaut aux points faisceaux réels. En effet, en estimant la translation avec seulement le point alésage Entrée, il est considéré que la géométrie entre les points faisceaux et le point alésage Entrée est complètement rigide (ajustement GEODE de la Figure 9). La méthode de calcul avec les FRAME se basant sur des observations pour les coordonnées des alésages permet de répartir l'erreur de longueur sur les alésages lors de l'ajustement (ajustement

FRAME de la Figure 9). Dans ce cas, la géométrie des points faisceaux et alésages n'est pas totalement rigide, les points alésages peuvent changer de position dans \mathcal{R}_{RST} le long de l'axe S pour prendre en compte le défaut. De ce fait, il existe un écart vertical dV entre les écarts verticaux qui vont être calculés avec GEODE et avec les FRAME dans le cas des équipements ayant de la pente comme sur la Figure 9.

Finalement, il s'agit de deux façons d'effectuer le calcul des écarts des points faisceaux dans le cas des défauts de longueur des équipements mais ne connaissant pas l'emplacement réel des points faisceaux au moment de l'alignement, il n'est pas possible de savoir quelle méthode est la plus proche de la réalité sans réaliser une fiducialisation des équipements non fiducialisés. La méthode avec les FRAME présente l'avantage de conserver le barycentre des points de l'équipement dans \mathcal{R}_{RST} dans le cas où la géométrie mesurée est incohérente avec la géométrie fixée par les paramètres RST. Dans le cas du P42.XTCX.X0430631 qui a présenté lors de sa mesure sur le terrain un défaut de longueur de 14,30 mm, la différence entre les écarts verticaux calculés avec les deux méthodes est tout de même de 0,07 mm ce qui correspond au tiers de la tolérance d'alignement. Cela n'est pas négligeable surtout dans le cas où peu de marge de manœuvre a été laissée par rapport à la tolérance lors de l'alignement.

Pour l'instant, il est difficile de se rendre compte d'un léger défaut de longueur sur le terrain. Les défauts les plus importants peuvent être visibles avec les déplacements longitudinaux qui sont incohérents entre eux lorsque les alésages sont bien alignés en vertical et en radial. La méthode avec les FRAME permettra d'avoir sur le terrain une information sur la qualité des paramètres RST avec le calcul de $\sigma_{S_{new}}$ et d'adapter au besoin la stratégie d'alignement pour, par exemple, éviter de trop modifier la pente de l'équipement sans en avoir conscience comme sur la Figure 9.

Le calcul basé sur les FRAME utilise la méthode des moindres carrés ce qui permet d'obtenir une précision sur la position calculée pour les points faisceaux. Ce n'est pas le cas de la méthode de calcul utilisée au bureau.

II.4 Quantification de l'amélioration attendue sur les alignements

Actuellement, sur le terrain, les utilisateurs du logiciel de terrain TSUNAMI ont des indications sur les déplacements des alésages à effectuer pour l'alignement mais ne prenant en compte que les informations provenant des mesures de nivellement, d'écartométrie ou polaires. Le roulis n'est pas pris en compte puisqu'il intervient seulement pour le passage

des points alésages aux points faisceaux et c'est donc la principale amélioration pour l'alignement des équipements avec le calcul des points faisceaux. Il faut aujourd'hui faire des calculs supplémentaires approximatifs sur le terrain lorsque le roulis est contraint à plus de 0,1 mrad d'écart de la valeur théorique afin d'éviter une situation hors tolérance au niveau des points faisceaux. L'information sur les écarts des points faisceaux issus du calcul FRAME prendra automatiquement en compte cette donnée angulaire.

Pour un point dans le repère de référence RST, l'écart de roll induit un écart selon les axes R et T. Si nous considérons un point alésage P de coordonnées R, S et T dans \mathcal{R}_{RST} appartenant à un équipement présentant un écart de roll de $d\tau$ alors nous avons les écarts qui suivent au niveau de l'axe faisceau :

$$\text{Ecart selon l'axe T : } e_T = R \cdot \sin(d\tau) + T \cdot (\cos(d\tau) - 1)$$

$$\text{Ecart selon l'axe R : } e_R = R \cdot (\cos(d\tau) - 1) - T \cdot \sin(d\tau)$$

Considérant l'ensemble des alésages appartenant à des accélérateurs actifs, leurs coordonnées dans \mathcal{R}_{RST} et l'écart de roll renseigné dans la base de données, j'ai calculé e_T et e_R pour avoir un aperçu de l'impact de l'écart de roulis $d\tau$ au niveau de l'axe faisceau (Figure 10) et qui sera désormais toujours pris en compte sur le terrain avec le calcul FRAME des points faisceaux. En bleu clair est tracé l'écart moyen selon l'axe R e_R pour un complexe d'accélérateur, indiqué en abscisse. L'écart moyen selon l'axe T e_T est tracé en bleu foncé.

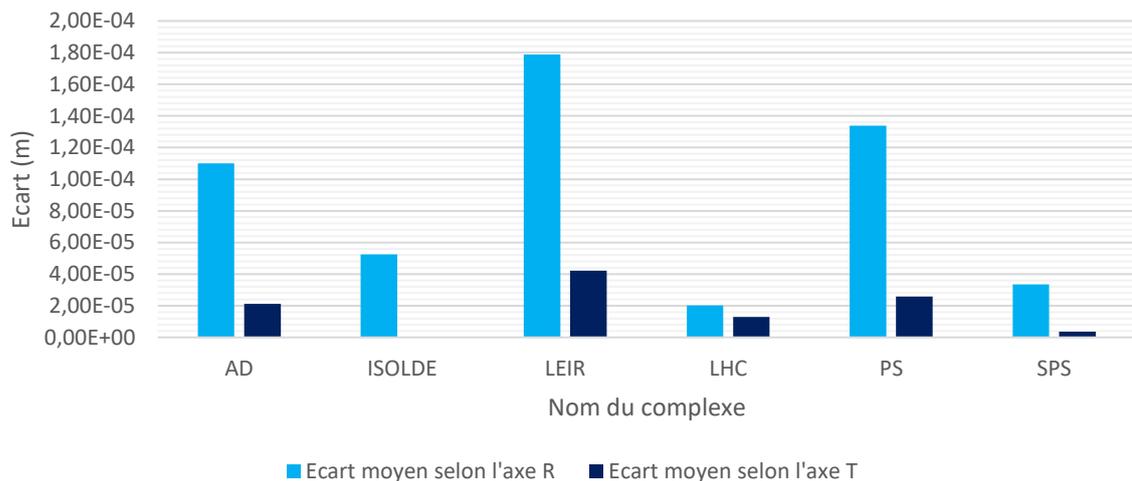


Figure 10 : Ecart moyen par complexe selon les axes R et T induit par l'écart de roll $d\tau$

La disparité des résultats entre les complexes, notamment entre e_R et e_T d'un même complexe, met en avant le choix de différentes stratégies pour le positionnement des alésages des équipements par rapport à l'axe faisceau. Ainsi, pour le complexe ISOLDE, les alésages

sont positionnés avec des coordonnées R presque nulles et l'écart de roll entraîne une valeur de e_R bien plus importante que e_T . Les complexes SPS et LHC sont ceux présentant le plus de souplesse pour le réglage du roulis, ce qui rend l'impact moindre sur les points faisceaux.

De ces écarts e_R et e_T dans \mathfrak{R}_{RST} découlent des écarts radiaux et verticaux dans \mathfrak{R}_{CCS} .

En plus de prendre en compte l'écart de roll, le calcul des points faisceaux permet de contrôler que le positionnement des points faisceaux de l'équipement n'est pas hors tolérance dans le cas d'une extrapolation importante entre les points alésages et les points faisceaux. Cela pourra éviter dans certains cas de retourner sur le terrain pour faire un déplacement supplémentaire de l'équipement.

Outre l'amélioration attendue sur les alignements, on peut également pointer le fait que le calcul des points faisceaux en utilisant les FRAME permettra d'avoir une meilleure lisibilité des écarts au niveau des points faisceaux pour tous les paramètres (radiaux, longitudinaux et verticaux). Nous avons déjà évoqué la modification entraînée par l'utilisation de la méthode FRAME sur les écarts verticaux mais ce ne sera pas le seul aspect impacté. En effet, le risque d'avoir des défauts de longueur des équipements étant connu, il a été décidé lors du processus de calcul des écarts de GEODE de faire la moyenne des écarts longitudinaux DL des alésages pour avoir l'écart longitudinal des points faisceaux. Dans certains cas de figures spécifiques (pente et gisement réels de l'élément identiques aux théoriques), cela correspond à la situation des points faisceaux. Toutefois, dans de nombreux autres cas cela amène un écart DL des points faisceaux incohérent avec la situation. Pour reprendre le cas de la Figure 9, les points alésages ont été positionnés de sorte à avoir un DL moyen nul. Toutefois, en considérant la situation avec des écarts radiaux nuls – ce qui ramène la situation en 2D – il est bien visible qu'en affectant un DL nul aux points faisceaux (seul H varie par rapport au point théorique) nous obtenons une géométrie RST différente de la théorique. Et, dans les cas les plus extrêmes, cela modifie la distance entre les points faisceaux Entrée et Sortie alors que ce sont des points qui ne peuvent pas être mesurés et qu'il n'est donc pas souhaitable d'apporter une quelconque modification à la géométrie liant ces points.

III Exploitation du calcul des points faisceaux pour le calcul d'une position d'alignement

III.1 Enjeu du calage avec les points faisceaux

Actuellement, les équipements des équipements ne sont pas tous alignés à moins de 0,2 mm en radial et en vertical de leur position théorique comme cela est visible sur l'illustration qui suit (Figure 11) pour les écarts verticaux d'une portion du LHC. On constate que les points le long de l'axe faisceau (distance cumulée en abscisse) suivent une tendance pour les écarts verticaux (axe des ordonnées).

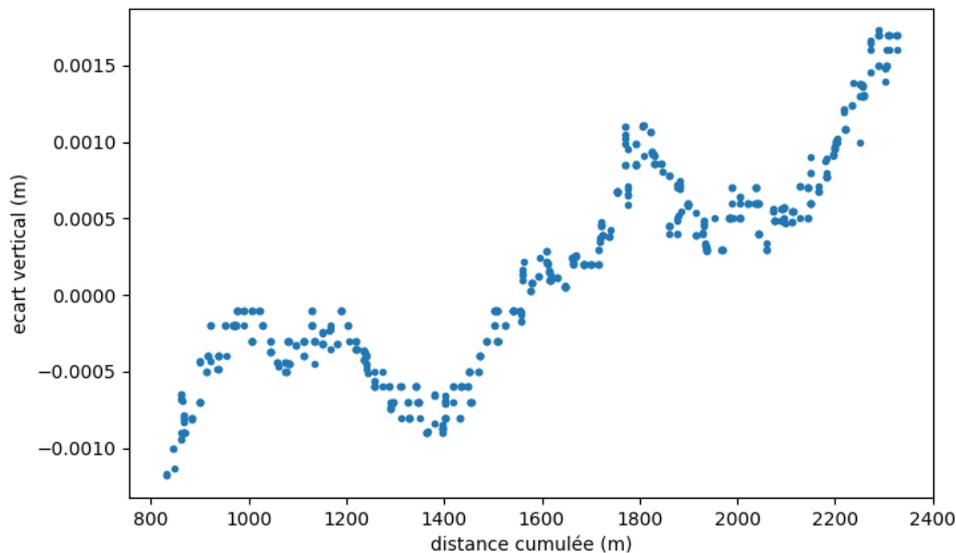


Figure 11 : Ecart vertical pour les points faisceaux d'une portion du LHC

Cela n'impacte pas la circulation du faisceau tant que les équipements sont alignés entre eux, par exemple pour le LHC avec moins de 0,15 mm d'écart dans une fenêtre glissante de 110 m [11]. Mais, sur le terrain pour les alignements, ce sont les coordonnées théoriques qui sont utilisées pour les points alésages qui servent de référence. Cela amène plusieurs difficultés lors de la mise en station.

Tout d'abord, le changement de géométrie entre celle théorique des équipements et celle réelle peut dégrader le calcul d'ajustement pour déterminer la position et l'orientation de la station. Notamment, une modification de la pente le long du faisceau fait entrer en conflit les observations d'angles zénithaux et de gravité et les contraintes sur les coordonnées des points. Un positionnement différent le long du faisceau – équipement placé plus en amont ou plus en aval – fait entrer en conflit les observations d'angles horizontaux et les contraintes sur les coordonnées.

Ensuite, dans un cas où les alésages seraient toujours alignés à leur position théorique – écart vertical et radial inférieur à 0,2 mm – le roulis de l'équipement n'est pas pris en compte et les points faisceaux peuvent se retrouver alignés à une position compromettant la circulation du faisceau comme illustré ci-dessous dans le cas 1 pour l'équipement aligné (Figure 12). L'idéal serait de positionner les points faisceaux dans le cas 2 entre les points faisceaux des éléments 1 et 2 servant de référence pour l'alignement.

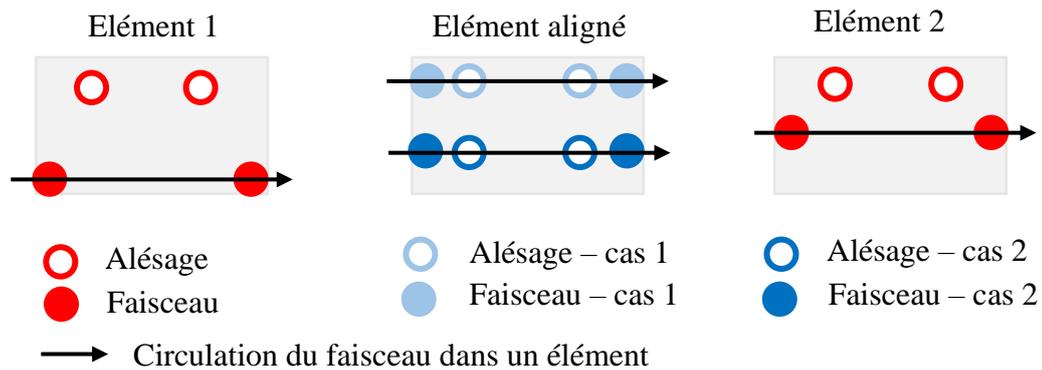


Figure 12 : Vue de dessus des alésages et points faisceaux en tenant compte du roulis selon la situation

Compte tenu de ces éléments et du fait qu'il est possible de déterminer les positions des points faisceaux sur le terrain en utilisant les FRAME, il serait avantageux de pouvoir prendre en compte ces positions pour obtenir une position des points faisceaux à aligner.

III.2 Cas d'étude avec des équipements en référence

III.2.1 Présentation de l'opération servant de test

L'opération servant de test est la 17558. Deux équipements mesurés servent de référence pour en aligner sept autres comme sur la Figure 13. Il s'agit d'une opération de lissage de la ligne TT10. Cela consiste à aligner des équipements intermédiaires entre deux quadripôles principaux. Le roulis des équipements servant de référence, en jaune, a été mesuré. Pour ces équipements, deux points alésages, en noir, ont été mesurés avec un AT. On cherche à aligner les équipements en bleu par rapport aux autres qui ont pu être mesurés. Cette opération présente l'avantage d'illustrer des difficultés rencontrées aujourd'hui sur le terrain et auxquelles il faudrait remédier avec l'alignement au niveau faisceau. En effet, la pente entre les deux références n'est plus celle théorique. De plus, le roulis des équipements de référence est variable : roulis positif et négatif. Il y a également une trajectoire du faisceau qui n'est pas rectiligne.

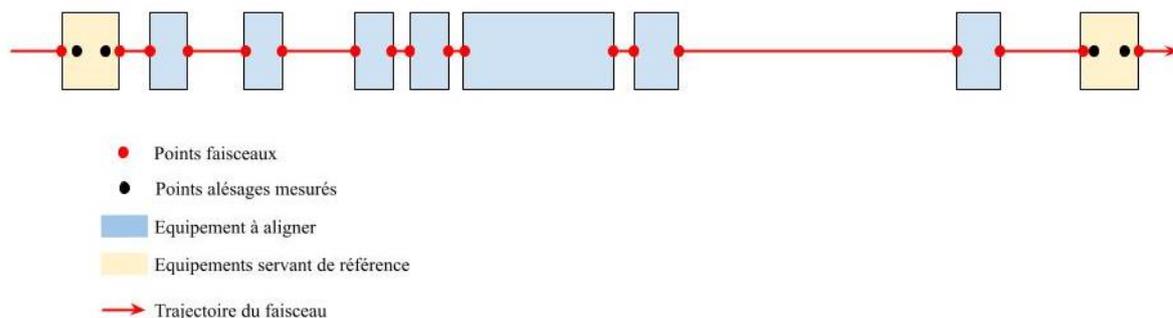


Figure 13 : Schéma de situation pour l'alignement de l'opération 17558

III.2.2 Processus de calcul mis en place

J'ai défini un processus permettant de calculer une position pour les points faisceaux à aligner. Après une estimation des σ_{S_new} pour les équipements servant de référence, ce processus se découpe en deux étapes qui vont être détaillées.

Pour conserver la géométrie des alésages mesurée par l'AT, tous les points alésages mesurés sont déclarés complètement libres (statut POIN). Pour chaque équipement, les FRAME permettent de calculer la position des points faisceaux par rapport aux points alésages mesurés avec les coordonnées RST et les mesures de roulis. Nous conservons la stratégie de modification de la précision du paramètre S pour s'adapter à la réalité du terrain. Mais dans ce cas-là, tout est libre dans le calcul et avec les FRAME il n'y a pas de convergence possible vers une solution pour LGC2. Afin d'ajouter des contraintes, les coordonnées théoriques des points faisceaux des équipements de référence sont également déclarés en observations (statut OBSXYZ) avec une précision de 15 mm pour laisser suffisamment de liberté selon la variation entre la géométrie réelle et la géométrie théorique. Pour ces points faisceaux, les coordonnées qui sont déclarées sont dans le repère de référence théorique d'un des équipements alignés. Cela permet d'avoir la précision selon X qui correspond à la composante radiale au faisceau, la précision selon Y qui correspond à la composante longitudinale et la précision selon Z qui correspond à la composante verticale.

Tous ces éléments permettent de prendre en compte le changement de géométrie entre celle théorique et celle qui peut être mesurée. A l'issue de ce calcul paramétré comme expliqué précédemment et résumé dans le Tableau 3, nous obtenons des coordonnées pour les points faisceaux qui sont déterminées à partir des observations des alésages et des mesures de roulis.

FRAME	Global	Équipements de référence
-------	--------	--------------------------

Degrés de liberté	Aucun	Trois translations + trois rotations
Type de coordonnées	RST dans le repère de référence d'un des équipements à aligner	RST dans le repère de référence de l'équipement de référence
Points de statut OBSXYZ	Points faisceaux servant de référence Précision = 15 mm	Points alésages Précision S = précision adaptée au défaut de longueur
Points de statut CALA	Aucun	Points faisceaux

Tableau 3 : Bilan des paramètres de calcul pour la mise en station

Disposant des positions calculées des points faisceaux servant de référence et des positions théoriques des points faisceaux à la fois des équipements servant de référence et à aligner, il est possible de déterminer une position pour les équipements à aligner. Pour cela, les points faisceaux de référence calculés à l'étape précédente sont déclarés fixes (statut CALA) dans \mathcal{R}_{CCS} . Leurs coordonnées théoriques, toujours dans le repère de référence de l'équipement à aligner, sont déclarées dans un FRAME avec cinq paramètres libres (les trois translations et deux rotations pour prendre en compte une modification de pente et de gisement) et comme une observation avec une précision. Pour mon test, j'ai choisi 1 mm mais il est possible de choisir la précision souhaitée. Le facteur unitaire de variance de ce calcul donnera une indication sur le réalisme du critère choisi par rapport à la géométrie observée. Le calcul d'ajustement permet d'obtenir les paramètres de la similitude spatiale entre la géométrie théorique et celle observée. Ces paramètres sont appliqués aux points faisceaux à aligner pour calculer leur position d'alignement en fonction de la géométrie observée pour les points faisceaux de référence.

Afin de pouvoir examiner l'ajustement qui a été fait de la position des points faisceaux à aligner et valider les paramètres de calcul, nous pouvons calculer les écarts verticaux et radiaux des points faisceaux ayant servi de référence et des points faisceaux de l'équipement à aligner. Pour les points faisceaux des équipements à aligner, en bleu sur la Figure 14 et la Figure 15, nous attendons comme résultat d'avoir des écarts verticaux et radiaux qui suivent la tendance donnée par les points faisceaux de référence, en orange sur les figures. Etant donné que les équipements sont répartis sur une courte distance, cette tendance peut être obtenue avec une régression linéaire des écarts des points de référence. Sur les deux figures qui suivent, nous pouvons constater que les points faisceaux théoriques de l'équipement à aligner ont bien été ajustés selon la tendance des références. En vertical, ils ont été positionnés sur la droite de régression linéaire des écarts verticaux des points servant de référence. Pour le radial, ils ont été positionnés parallèlement à la droite de

régression linéaire à 0,01 mm. C'est conforme à ce que nous attendions et cette méthode de calcul permet d'aligner les équipements en tenant compte de la pente réelle entre les équipements de référence.

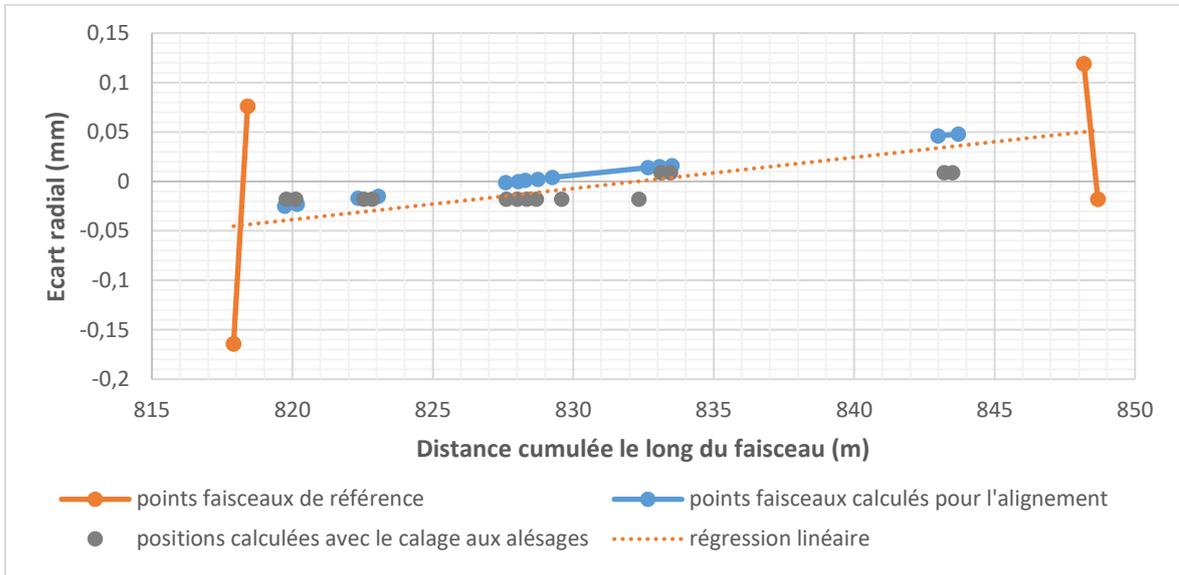


Figure 14 : Ecarts radiaux des points faisceaux de référence et à aligner

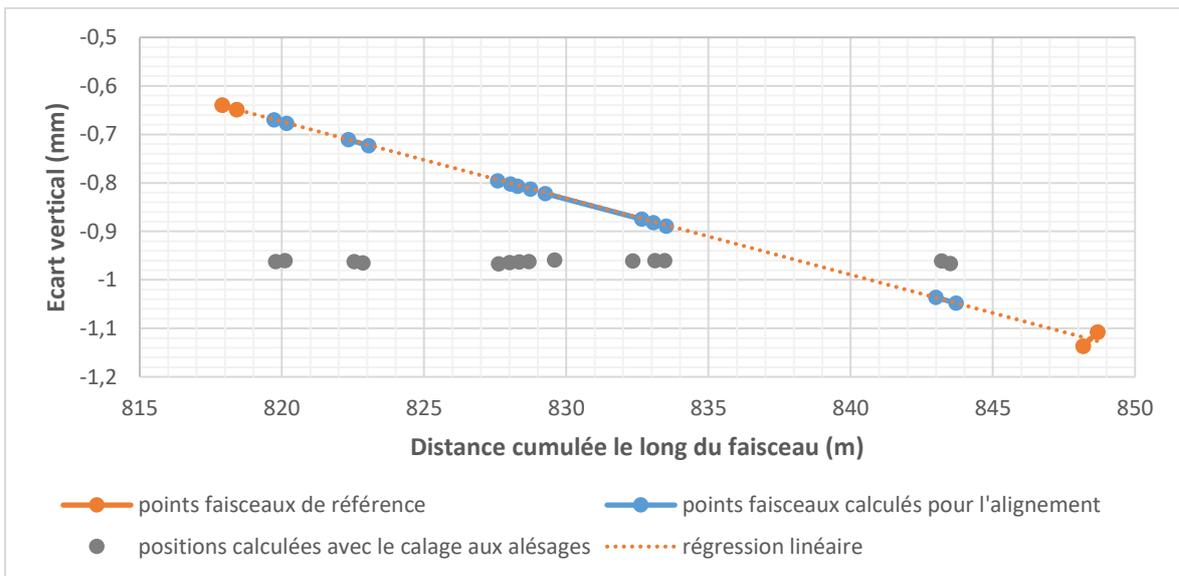


Figure 15 : Ecarts verticaux des points faisceaux de référence et à aligner

Actuellement, le calcul est réalisé de sorte que les points gris représentent les positions d'alignement. On peut constater, pour les écarts verticaux, que cela implique de ne pas prendre en compte la pente entre les équipements servant de référence. Pour les équipements proches des références, cela implique des écarts significatifs par rapport à celles-ci : ici, il y a 0,3 mm pour le premier équipement en amont et 0,2 mm pour le premier équipement en aval du faisceau. De plus, un potentiel écart en longitudinal (dans la direction du faisceau) sur les références impacte l'alignement au niveau radial dans le cas d'une

modification de la trajectoire du faisceau. Ainsi, dans l'alignement servant d'exemple, le cinquième équipement aligné (distance cumulée à 829 m pour le point entrée et 832,5 m pour le point sortie) modifie la trajectoire du faisceau. Les références ont des écarts longitudinaux : - 0,9 mm pour la référence amont et + 0.9 mm pour la référence aval. Dans le calcul actuellement réalisé sur le terrain, un des points alésages sert de référence (statut CALA) et les autres alésages de référence sont contraints radialement au faisceau mais pas longitudinalement. Les positions pour l'alignement sont donc déterminées sans intégrer l'écart longitudinal des références et cela impacte l'alignement au niveau radial après la modification de trajectoire : on a un écart radial de - 0,02 mm pour tous les équipements avant le changement de trajectoire puis de 0,01 mm après le changement de trajectoire.

III.2.3 Limites et améliorations envisageables

Le calcul d'une position d'alignement pour les points faisceaux tel qu'il est fait avec le processus précédemment décrit prend en compte tous les points faisceaux de référence. Dans certains cas, pour l'alignement, il serait préférable de ne pas prendre en compte la position de certains équipements utilisés en référence⁷. Pour cela, plusieurs pistes sont possibles. Tout d'abord, en changeant le statut des points faisceaux en VZ (variable en Z) ils ne sont plus pris en compte pour le calcul des faisceaux à aligner pour la position verticale. Une seconde piste est l'exploitation des résidus sur les observations OBSXYZ dans la seconde étape de calcul. Ces résidus peuvent permettre de détecter les points faisceaux les plus éloignés de la tendance. S'ils sont trop éloignés selon un seuil à définir, leur poids dans le calcul pourrait être modifié par processus itératif pour réduire leur impact sur la position d'alignement calculée.

Concernant la dernière étape du calcul, comme cela a été mentionné, les coordonnées utilisées sont les coordonnées CCS. Il pourrait être envisagé d'utiliser des coordonnées dans le repère de référence d'un des équipements à aligner pour décorréler dans le calcul la composante radiale de la composante longitudinale par rapport au faisceau. Mais dans le cas d'un équipement déviant les particules dans ceux à aligner, se posera la question de la portion à choisir pour définir le gisement du faisceau, et donc les directions radiale et longitudinale.

⁷ Annexe 5 : application à une autre opération

Conclusion

L'objectif de ce TFE était de mettre en place un processus de calcul des points faisceaux sur le terrain pour permettre d'améliorer la qualité des alignements au niveau faisceau et de gagner du temps. La qualité des coordonnées des alésages dans le repère de référence de l'équipement a demandé une adaptation du calcul.

Pour une majorité des équipements, ces coordonnées non déterminées par la mesure sont inexactes. Si cela peut être pris en compte dans le calcul avec les FRAME pour les mesures polaires réalisées avec un AT avec une modification de la précision de la coordonnée longitudinale, ce n'est pas le cas pour les mesures de nivellement et d'écartométrie. En effet, ces deux catégories de mesures n'offrent pas d'informations suffisantes pour détecter un écart entre les coordonnées théoriques et la réalité terrain. Pour un même équipement, cela va entraîner des écarts entre les positions des points faisceaux calculées en nivellement ou écartométrie et en polaire. Sachant qu'il existe déjà des écarts entre la méthode bureau et la méthode terrain dans cette situation, il apparaît nécessaire d'envisager la modification des coordonnées S dans le repère de référence de l'équipement pour homogénéiser à la fois les résultats terrain et bureau et les résultats terrain entre différentes catégories de mesures. Toutefois, certaines lacunes de la méthode implémentée au bureau – réduction du calcul à seulement deux alésages, absence de précision sur les résultats obtenus – conduisent à s'interroger sur sa pérennité maintenant que les positions faisceaux peuvent être déterminées avec les FRAME.

Concernant les résultats obtenus pour la similitude spatiale, la valeur de la translation doit être ignorée pour tout traitement du fait de l'utilisation d'une surface de référence altimétrique par défaut. Une solution pour remédier à cela serait d'avoir toutes les données théoriques calculées avec une seule surface de référence pour tout le CERN.

Sachant qu'il est désormais possible de calculer la position des points faisceaux sur le terrain avec les observations sur les alésages, l'exploitation de ce calcul peut être envisagée pour aligner les points faisceaux entre eux et non les alésages. Un premier processus permet d'aboutir à une position de points faisceaux pour l'alignement prenant en compte tous les points de référence et leurs éventuels écarts radiaux, longitudinaux et verticaux. Il peut encore être perfectionné. Tout d'abord, utiliser un autre type de coordonnées permettrait de décorrélérer le radial et le longitudinal. Ensuite, il reste à optimiser le calcul dans le cas de références de mauvaise qualité.

Bibliographie

- [1] How did we discover the Higgs boson ? In : CERN, [en ligne]. Disponible sur : [How did we discover the Higgs boson? | CERN \(home.cern\)](#). (Consulté le 10/06/2023)
- [2] Our member States. In : CERN, [en ligne]. Disponible sur : [Member States | CERN \(home.cern\)](#). (Consulté le : 10/06/2023)
- [3] Mandat of ASG section ‘Métrologie et Alignement des Accélérateurs – Géodésie’ In : CERN SU [en ligne]. Disponible sur : [Home - AC: Accelerator & Computing \(cern.ch\)](#). (Consulté le : 15/06/2023)
- [4] JONES M., 2000, Geodetic definition (datum parameters) of the CERN coordinate system, CERN, note interne EDMS 107981 (version 1)
- [5] JONES M., 2014, Beamline element definitions with conventions and derivations, CERN, note interne EDMS 1476360 (version 1)
- [6] KAUTZMANN G., 2018, Beamline Elements Definitions, CERN, note interne EDMS 2900421
- [7] BESTMANN P., MISSIAEN D., 2017, Fiducialisation of LHC dipoles using a laser tracker, CERN, note interne EDMS 2353253
- [8] LOURS Philippe, 2014, Propriétés liées à la structure, Ecole des Mines d’Albi Carmaux [en ligne], Disponible sur : [Propriétés liées à la structure \[Au cœur des matériaux cristallins\] \(mines-albi.fr\)](#) (Consulté le : 16/06/2023)
- [9] FUCHS J-F., BESTMANN P., VALENTIN P., VENDEUVRE C., 2023, Survey Guidelines and Requirements For the Alignment of a New Accelerator Equipment on Beam Line at CERN, CERN, note interne EDMS 2708664, page 36
- [10] ROBERTS J, *Accurate Computation of Variance*, The College Mathematics Journal, 1985, Vol. 16, No. 2, pp. 149-150
- [11] FUCHS J-F, 2016, The smoothing of the LHC cryo-magnets, CERN, note interne EDMS 311768, page 4
- [12] 2003, Clino2000 User Guide, WYLER

Table des annexes

Annexe 1 Définitions et conventions mathématiques	43
Annexe 2 Structure du fichier en entrée de LGC2 avec les FRAME.....	44
Annexe 3 Mesures d'écartométrie.....	47
Annexe 4 Evaluation de l'impact de la surface de référence altimétrique pour le calcul sur les paramètres de roulis.....	50
Annexe 5 Deuxième étude de cas pour l'alignement des faisceaux par rapport aux points faisceaux	53

Annexe 1

Définitions et conventions mathématiques

Cette annexe rappelle certaines définitions mathématiques concernant les formules utilisées dans le mémoire.

Propriétés fonctions trigonométriques :

Soit $\gamma \in [-\pi ; \pi]$:

$$\cos(-\gamma) = \cos(\gamma)$$

$$\sin(-\gamma) = -\sin(\gamma)$$

Matrices de rotations 3 dimensions :

Soit $\gamma \in [-\pi ; \pi]$ l'angle en radian de la rotation :

$$\text{Autour du premier axe : } R_X(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

$$\text{Autour du second axe : } R_Y(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

$$\text{Autour du troisième axe : } R_Z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Propriété de la transposée d'une matrice de rotation :

$$R_X^T(\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-\gamma) & \sin(-\gamma) \\ 0 & -\sin(-\gamma) & \cos(-\gamma) \end{pmatrix} = R_X(-\gamma)$$

Annexe 2

Structure du fichier en entrée de LGC2 avec les FRAME

Cette annexe présente la structure du fichier en entrée du logiciel de compensation LGC2. Cette structure se découpe en plusieurs grandes parties :

- les paramètres généraux avec géoïde, critère de convergence, seuils statistiques
- les instruments avec un nom et leurs précisions
- les déclarations de points avec des coordonnées et des informations sur les coordonnées à ajuster en fonction du statut du point
- les mesures réalisées
- les éventuels FRAME

Certaines règles sur les données d'entrée limitent les possibilités pour le calcul des points faisceaux. Ainsi, les points ne peuvent pas être déclarés deux fois (par exemple dans le ROOT FRAME et dans un FRAME) avec des coordonnées. Cela impose le statut d'observations pour les coordonnées dans \mathcal{R}_{RST} des alésages qui sont mesurés sur le terrain et qui sont indiquées dans les FRAME. D'autre part, les types de points dans les FRAME sont limités : seuls les types CALA (toutes les coordonnées fixes) et POIN (toutes les coordonnées à ajuster) sont possibles. Il n'est donc pas possible d'ajuster seulement une composante (R, S ou T) ou deux.

Type	Descriptif	Autorisé dans FRAME
CALA	Point fixe dans le calcul	OUI
OBSXYZ	Observation sur les coordonnées	OUI
POIN	Point dont toutes les coordonnées sont ajustées	OUI
VXY	Points dont les coordonnées X et Y sont ajustées	NON
VZ	Point dont l'altitude est ajustée	NON

***TITR**

Fichier d'input créé le 21-MAR-2023

Opération n 28159, 3D

***RS2K** : Indication de la surface altimétrique de référence utilisée pour le calcul

***PUNC OUT1** : Format des données en sortie

***FAUT .01 .10** : Valeur de alpha et beta pour le niveau de confiance et le risque de deuxième espèce

***PREC 6** : Critère de convergence, ici 1^e-6 m

***INSTR** : Déclaration des instruments et des précisions

***POLAR AT403.395161 RRR1.5.1 0 0 0 0**

RRR1.5.1 3 3 .02 6 0 0 0 0 0

***INCL W1015 30 0 0 0 0**

***CALA** : Déclaration des coordonnées des points de type CALA

LHC.NID.6L5-02. -1236.035780 10387.263670 421.714840 : XYH

LHC.NID.6L5-01. -1232.143620 10386.806220 422.282030

LHC.NID.5L5-05. -1228.076280 10388.522930 423.143080

LHC.NID.5L5-03. -1219.457340 10395.059090 422.911140

LHC.NID.5L5-02. -1211.533740 10397.629260 421.385950

LHC.NID.5L5-01. -1209.602220 10396.516630 423.395550

***POIN** : Déclaration des coordonnées approchées des points de type POIN

LHC.STL.20230213BDKW01. -1220.196700 10392.463530 422.945020

LHC.MQML.5L5.E -1230.463560 10389.646990 422.994024

LHC.MQML.5L5.S -1227.047300 10391.080730 422.947241

***TSTN LHC.STL.20230213BDKW01. AT403.395161 IHFIX IH 0.000000** : Déclaration de la station avec nom, instrument et hauteur instrument (IH) qui est fixe (IHFIX)

***V0**

***ANGL** : Déclaration des mesures de lectures horizontales (m)

LHC.NID.6L5-02. 76.094579

LHC.NID.6L5-01. 68.132229

LHC.NID.5L5-05. 66.758588

LHC.NID.5L5-03. 213.948228

LHC.NID.5L5-02. 262.038593

LHC.NID.5L5-01. 273.024865

LHC.MQML.5L5.S 83.602564

LHC.MQML.5L5.E 79.236822

***ZEND** : Déclaration des mesures d'angles zénithaux (gon)

LHC.NID.6L5-02. 104.689045 TH 0.000000 : TH valeur de rallonge (m)

LHC.NID.6L5-01. 103.190317 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-05. 98.568672 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-03. 100.799551 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-02. 109.762797 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-01. 97.472580 TH 0.000000

LHC.MQML.5L5.S 99.342179 TH 0.070000

LHC.MQML.5L5.E 99.288499 TH 0.070000

***DIST** : Déclaration des mesures de distances (gon)

LHC.NID.6L5-02. 16.716185 TH 0.000000

LHC.NID.6L5-01. 13.235201 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-05. 8.812266 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-03. 2.699071 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-02. 10.206392 TH 0.000000

LHC.NID.5L5-01. 11.352288 TH 0.000000

LHC.MQML.5L5.S 6.989141 TH 0.070000

LHC.MQML.5L5.E 10.646851 TH 0.070000

```

Déclaration des FRAME avec un nom + 7 paramètres + degrés de liberté :
*FRAME RSTI_103035    -1231.090090  10389.569100  2416.394520  0 0  74.733794  1
*FRAME RST_103035    0 0 0 .7911910531  -.41577637333  0 1
*FRAME RSTRI_103035  -0.001198      0.001174      -0.000592  .00074272462  0 -
.00045093994  1 TX TY TZ  RX RZ  :3 translations + 2 rotations ajustées dans le calcul
*FRAME RSTR_103035    0      0      0      0      0.001336902      0 1 RY
*CALA      : Points subissant la transformation définie par les FRAME au-dessus
BEAM_LHC.MQML.5L5.S  -0.00000      4.80000      0.00000      Coordonnées RST
BEAM_LHC.MQML.5L5.E  0.00000      0.00000      0.00000      Coordonnées RST
*INCLY W1015 : Annonce une mesure de roulis avec l'instrument
BEAM_LHC.MQML.5L5.E  -0.533487 RF -0.030169 : Mesure de roulis + angle de référence
*OBSXYZ : Points servant à estimer la similitude spatiale
LHC.MQML.5L5.E  0.16880  0.60158  0.42163      0.1 0.1 0.1  Coord. RST + précision
LHC.MQML.5L5.S  0.16707  4.30681  0.42070      0.1 0.1 0.1  Coord. RST + précision
*ENDFRAME      : Sortie du dernier FRAME à avoir été ouvert
*ENDFRAME
*ENDFRAME
*ENDFRAME
*END          : Fin du fichier

```

Annexe 3

Mesures d'écartométrie

Dans un premier temps, le principe des mesures d'écartométrie va être détaillé puis l'impact d'un défaut de longueur entre les alésages sur les mesures va être brièvement étudié.

1. Principe des mesures d'écartométrie

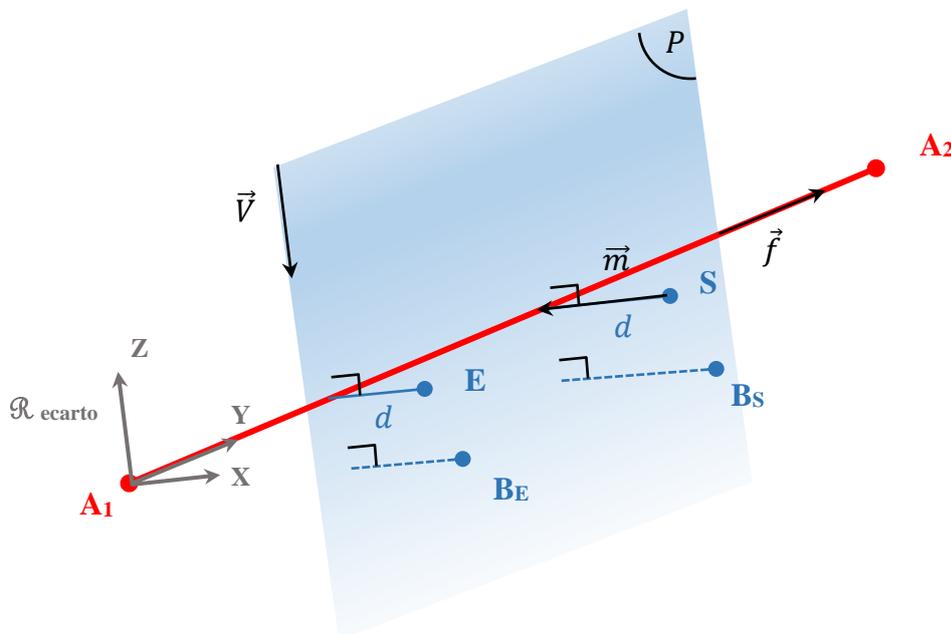
Soit f un fil défini par deux points d'ancrage, A_1 et A_2 connus dans le repère de référence CCS, et un vecteur directeur \vec{f} .

Soit E et S les alésages Entrée et Sortie de l'élément et B_E et B_S les points faisceaux Entrée et Sortie de ce même élément.

Soit \vec{V} le vecteur de la verticale locale.

Nous avons P le plan défini tel que $\vec{V} \in P$ et $\vec{f} \in P$

Les mesures réalisées d sont des mesures de distances selon \vec{m} . Le vecteur \vec{m} est normal à P entre le fil et le point. De ce fait, la mesure est également normale à \vec{V} .



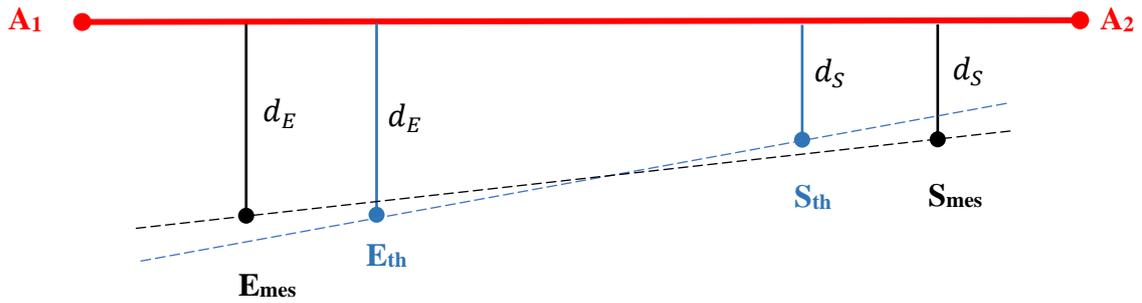
Connaissant l'inclinaison de l'élément par rapport à \vec{V} , il est possible d'avoir la distance à P pour les points faisceaux. Connaissant la position des ancrages dans \mathcal{R}_{CCS} et les positions théoriques de E, S, B_E et B_S , il est alors possible de déterminer l'écart entre la

position réelle et la position théorique de ces points dans la direction de \vec{m} . Cela correspond à un écart selon l'axe X de $\mathcal{R}_{\text{ecarto}}$. $\mathcal{R}_{\text{ecarto}}$ est orienté selon le gisement du fil, sa pente et la verticale locale.

2. Impact du défaut de longueur entre les alésages sur le calcul de l'écart du point faisceau

2.a. Ecart radial en écartométrie

Les mesures d'écartométrie ne permettent pas de détecter un défaut de longueur entre les alésages. De ce fait, pour le calcul, quand il y a un défaut tout se déroule comme s'il n'existait pas. Sur la figure suivante, en bleu est représentée la situation avec les longueurs théoriques. En noir, on retrouve la situation avec le défaut de longueur entre les alésages, réparti sur le point entrée E et sortie S. On appellera L_{th} la longueur théorique entre les alésages et L_{mes} la longueur qui serait mesurée.



Entre le cas avec la longueur théorique entre les alésages (en bleu sur la figure) et la longueur réelle (en noir), l'angle entre le fil et l'axe alésage (ligne en pointillé) n'est pas le même :

$$\sin \theta_{th} = \frac{d_S - d_E}{L_{th}} \quad (1)$$

$$\sin \theta_{mes} = \frac{d_S - d_E}{L_{mes}} \quad (2)$$

Il est possible de calculer l'écart au fil pour les points faisceaux avec le bras de levier. On note b la distance le long de l'axe S entre le point faisceau entrée et le point alésage entrée dans la situation théorique. Dans ce cas, on obtient la distance au fil suivante pour le point faisceau entrée :

$$dR_{th} = d_E - b \sin \theta_{th}$$

Soit $L_{th} - L_{mes}$ le défaut de longueur entre les alésages. Dans le cas d'un défaut de longueur réparti sur les points entrée et sortie, on obtient la distance au fil qui suit :

$$dR_{mes} = d_E - \left(b + \frac{L_{th} - L_{mes}}{2}\right) \sin \theta_{mes}$$

On peut à présent déterminer l'écart entre les distances au fil calculées au point faisceau entrée dans les deux situations :

$$dR_{th} - dR_{mes} = -b \sin \theta_{th} + \left(b + \frac{L_{th} - L_{mes}}{2}\right) \sin \theta_{mes}$$

D'après (1) et (2), on a $\sin \theta_{mes} = \frac{L_{th}}{L_{mes}} \sin \theta_{th}$ et on obtient donc le résultat suivant :

$$dR_{th} - dR_{mes} = \left(\left(b + \frac{L_{th} - L_{mes}}{2} \right) \frac{L_{th}}{L_{mes}} - b \right) \sin \theta_{th}$$

Qui peut être simplifié en :

$$dR_{th} - dR_{mes} = \left(\frac{L_{th}}{L_{mes}} - 1 \right) \left(b + \frac{L_{th}}{2} \right) \sin \theta_{th}$$

2.b. Transposition pour l'écart vertical en nivellement

La situation peut être représentée de la même façon que pour l'écartométrie mais au lieu de θ_{th} , on a φ_{th} la pente dans la situation théorique et $\sin \theta_{th} = \frac{H_S - H_E}{L_{th}}$ avec H_S et H_E respectivement les altitudes des points sortie S et entrée E.

Dans une situation où les points faisceaux et les points alésages appartiennent à la même droite, la différence sur le calcul de l'écart vertical vaut alors :

$$dV_{th} - dV_{mes} = \left(\frac{L_{th}}{L_{mes}} - 1 \right) \left(b + \frac{L_{th}}{2} \right) \sin \varphi_{th}$$

Annexe 4

Evaluation de l'impact de la surface de référence altimétrique pour le calcul sur les paramètres de roulis

Actuellement, le logiciel de terrain TSUNAMI génère les fichiers d'entrée du calcul LGC2 avec le géoïde RS2K par défaut pour les mesures polaires et d'écartométrie. Du fait de l'utilisation de ce géoïde et non celui associé aux points, il existe des écarts dans les résultats de traitement entre ce qu'on obtient avec RS2K et ce qu'on aurait obtenu avec le géoïde associé au point. Cette annexe détaille l'impact sur le roulis et la pente.

1. Impact sur le roulis

Le roulis d'un équipement, aussi appelé roll, est mesuré avec un inclinomètre posé sur une surface de référence, avec du matériel pouvant varier selon les équipements. A cette surface de mesure est associé un angle roll de référence. Cet angle roll de référence, correspondant à un écart entre le plan RS de l'équipement et le plan de la surface de mesure, est déterminé avec les mêmes méthodes que celles utilisées pour la détermination paramètres RST : fiducialisation ou plan d'interface.

Dans le calcul de compensation, avec la mesure de l'inclinomètre et l'information d'angle roll de référence il est possible de calculer le roulis de l'élément. Mais la mesure est faite selon la verticale locale et l'ajustement de l'écart de roulis est ainsi lié au modèle de surface de référence altimétrique utilisé dans le calcul. Le choix par défaut de RS2K a été fait car il s'agit du modèle le plus récent et permettant la transformation la plus précise entre les jeux de coordonnées XYH et XYZ. Jusqu'à présent, la seule utilisation de RS2K sur le terrain est la conversion XYH vers XYZ pour avoir des coordonnées cartésiennes pour les calculs puis une conversion XYZ vers XYH à l'issue des calculs. De ce fait, l'emploi de RS2K est sans influence sur les résultats du calcul. Toutefois l'intégration de la mesure de roulis au processus de calcul pour déterminer les points faisceaux implique RS2K pour une autre utilisation qui pourrait avoir un impact sur les résultats obtenus.

Pour s'assurer que l'utilisation par défaut de RS2K pour les calculs n'amène pas un écart trop grand sur le paramètre $d\tau$ du dernier FRAME par rapport à ce qui serait calculé avec le modèle associé au point, j'ai donc évalué l'impact du modèle de surface de référence altimétrique sur la détermination de la verticale. Pour ce faire, pour chaque point faisceau

des lignes d'accélérateurs actives du CERN, deux verticales sont nécessaires : la verticale issue du modèle RS2K utilisé par défaut par TSUNAMI et la verticale issue du modèle de surface de référence altimétrique associé au point faisceau. Disposant de ces deux vecteurs dans \mathcal{R}_{CCS} , il est alors possible de calculer l'angle entre leurs projections dans un plan normal au faisceau – correspondant au plan dans lequel s'effectue la mesure de roulis. L'écart angulaire entre ces deux vecteurs est calculé de la façon suivante :

$$\partial v = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{v}_2 \cdot \vec{v}_1}{\|\vec{v}_2\| \cdot \|\vec{v}_1\|}\right)$$

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure 4-1 . Pour chaque point faisceau du CERN localisé sur la figure dans le repère de référence CCS, on retrouve l'angle en absolu entre la verticale RS2K et la verticale du modèle de surface de référence altimétrique dans un plan normal au gisement du faisceau.

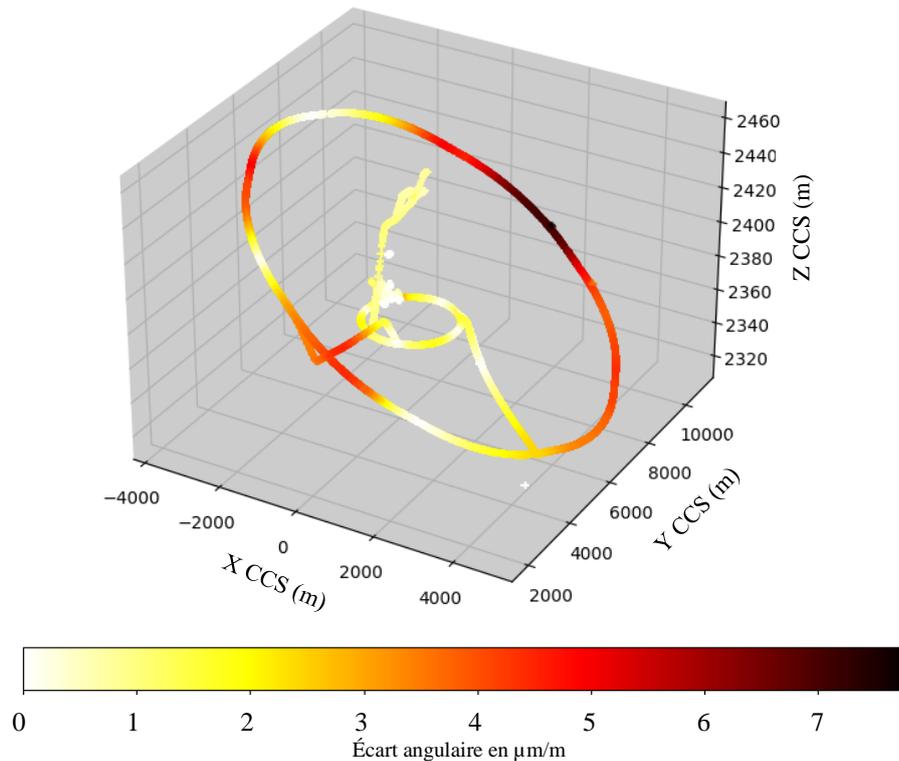


Figure 4-1 : Valeur de l'écart angulaire en valeur absolue entre les deux verticales dans le plan normal au gisement du faisceau

Plus l'écart angulaire est grand entre les deux vecteurs, plus la couleur du point tend vers le rouge foncé. Si l'écart est nul, comme dans le cas où la surface de référence altimétrique associée au point est RS2K, le point est blanc. L'écart maximal constaté sur l'ensemble des points faisceaux des différents complexes du CERN est d'environ 7,7 $\mu\text{m}/\text{m}$ et pour des points du LHC. Considérant la précision des inclinomètres utilisés pour faire les mesures de roulis (c'est-à-dire 20 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour un WYLER Clino2000 [12]) et les différents

accessoires pouvant être utilisés en plus de simplement l'inclinomètre et qui peuvent dégrader cette précision, cet écart dû à l'utilisation de RS2K par défaut apparaît acceptable. De ce fait, il est possible de continuer à utiliser le géoïde RS2K par défaut pour les calculs sur le terrain avec TSUNAMI. Toutefois, il serait préférable de disposer de toutes les données théoriques avec une seule surface de référence altimétrique, RS2K paraissant la plus appropriée du fait de son calcul avec les données les plus récentes.

2. Impact sur la pente

Comme cela vient d'être évoqué, l'utilisation de RS2K comme modèle de surface de référence altimétrique a un impact sur la détermination du roulis. Même s'il a été conclu que l'écart dans la direction normale au gisement du faisceau entre les deux vecteurs est acceptable pour les calculs, il est intéressant de pousser l'analyse plus loin. L'écart entre les deux verticales peut aussi être étudié pour la pente donc dans la direction du gisement du faisceau (Figure 4-2). Plus l'écart angulaire est grand entre les deux vecteurs, plus la couleur du point tend vers le rouge foncé. Si l'écart est nul, le point est blanc. L'écart maximal est de $12 \mu\text{m/m}$ pour des points du LHC, ce qui est toujours acceptable.

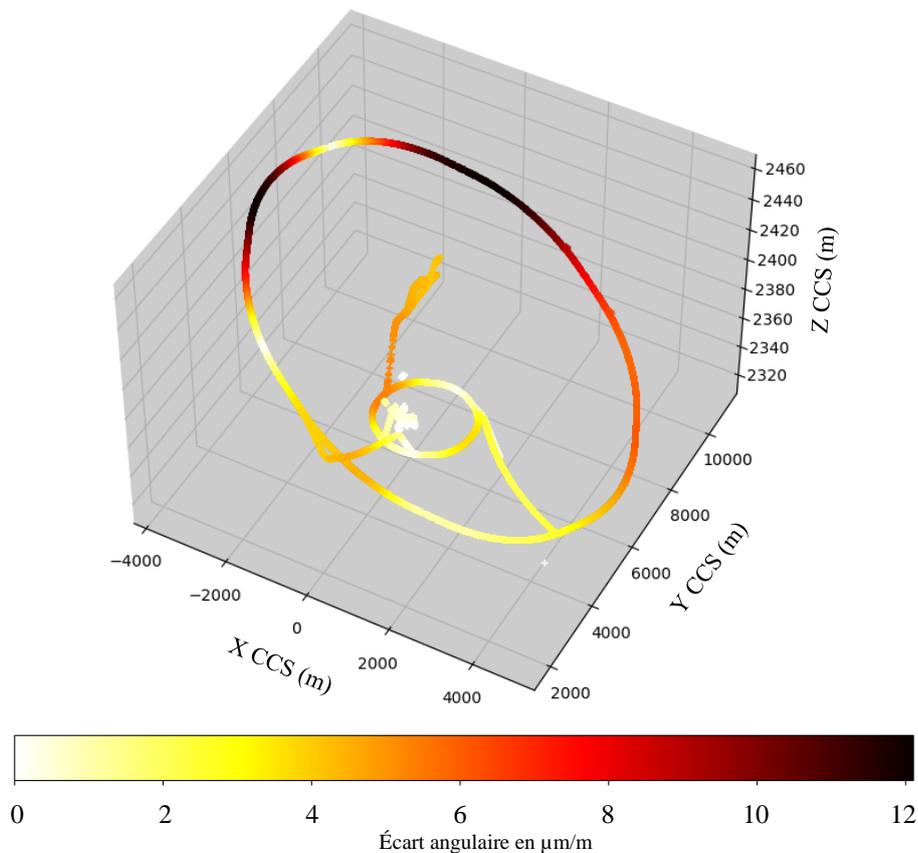


Figure 4-2 : Ecart angulaire entre les deux verticales pour les points faisceaux du CERN dans la direction du gisement du faisceau

Annexe 5

Deuxième étude de cas pour l'alignement des faisceaux par rapport aux points faisceaux

L'opération servant de test est la 28991. Quatre équipements mesurés servent de référence pour en aligner un cinquième comme présenté sur la Figure 5-1 . Le roulis des quatre équipements servant de référence, en jaune, ont été mesurés. Pour ces équipements, deux points alésages, en noir, ont été mesurés avec un AT. On cherche à aligner l'équipement bleu par rapport aux autres qui ont pu être mesurés. Cette opération présente l'avantage de regrouper plusieurs particularités qui ne doivent pas mettre en échec le calcul. Tout d'abord, deux des équipements (DR.QDC.53 et DR.QFC.54) présentent un écart de longueur entre les alésages nécessitant une modification de la précision du paramètre S pour les OBSXYZ dans \mathcal{R}_{RST} . Ensuite, le roulis des équipements est variable : roulis positif et négatif. Il y a également une trajectoire du faisceau qui n'est pas rectiligne.

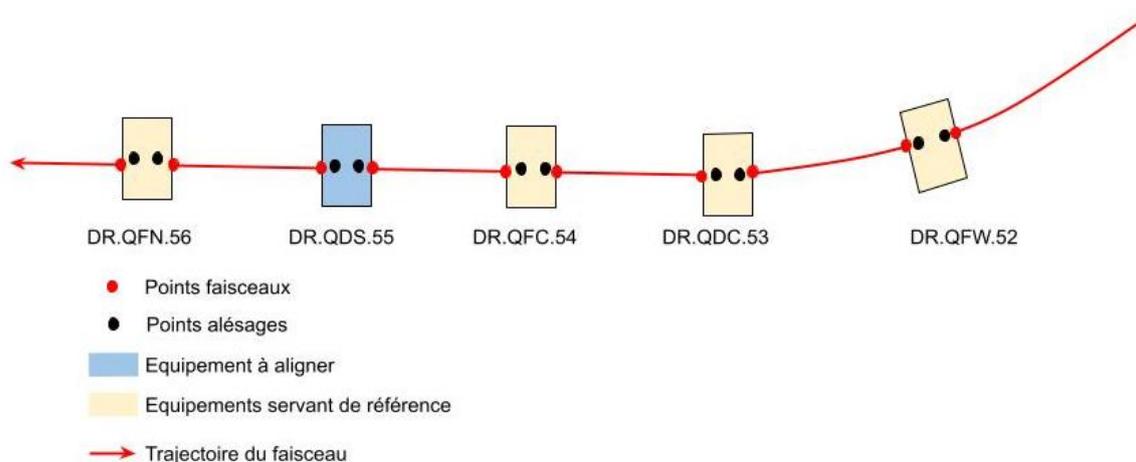


Figure 5-1 : Schéma de situation pour l'alignement de l'opération 28991

Le processus de calcul testé est le même que celui présenté dans la partie III.2.2.

Afin de pouvoir examiner l'ajustement qui a été fait de la position des points faisceaux à aligner et valider les paramètres de calcul, nous pouvons calculer les écarts verticaux et radiaux des points faisceaux ayant servi de référence et des points faisceaux de l'équipement à aligner. Pour les points faisceaux de l'équipement à aligner, en orange sur la Figure 5-2 et Figure 5-3, nous attendons comme résultat d'avoir des écarts verticaux et radiaux qui suivent la tendance donnée par les points faisceaux de référence, en bleu sur les figures. Etant donné que les équipements sont répartis sur une courte distance, cette tendance

peut être obtenue avec une régression linéaire des écarts des points de référence. Sur les deux figures qui suivent, nous pouvons constater que les points faisceaux théoriques de l'équipement à aligner ont bien été ajustés selon la tendance des références : ils ont été positionnés sur la droite de régression linéaire des écarts radiaux et verticaux des points servant de référence. Cela est conforme à ce que nous attendions de ce calcul.

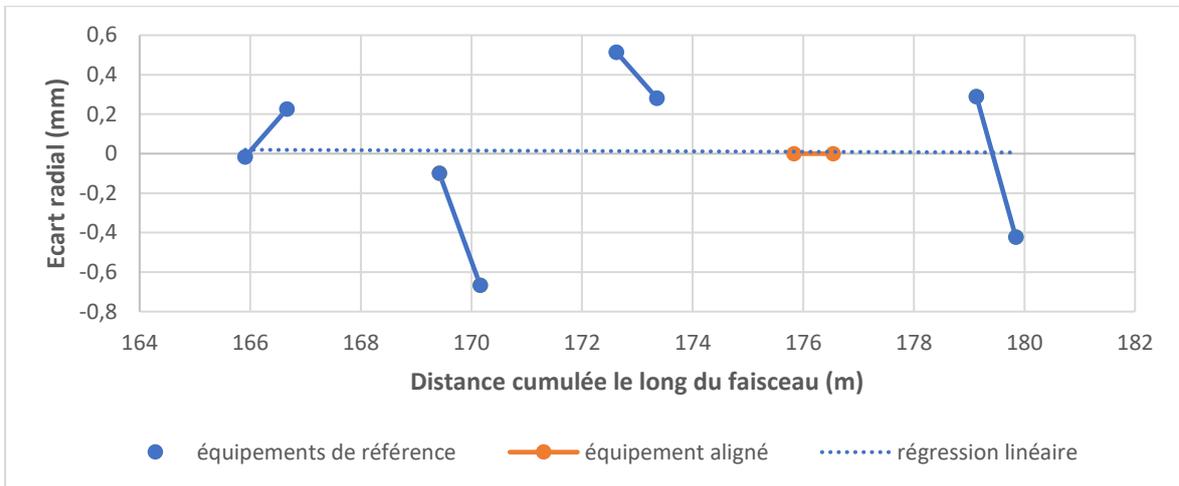


Figure 5-2 : Ecarts radiaux des points faisceaux de référence et à aligner

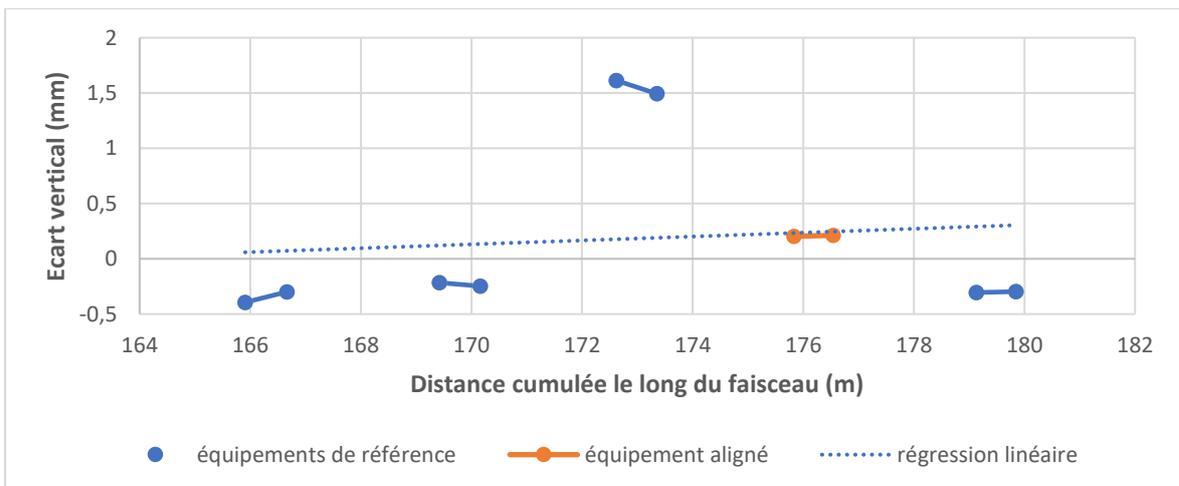


Figure 5-3 : Ecarts verticaux des points faisceaux de référence et à aligner

Dans cette situation, on peut s'interroger sur le calcul réalisé pour la position verticale. En effet, tous les points de référence sont pris en compte de la même façon dans le calcul. Or, le troisième équipement a une position verticale significativement éloignée de sa position théorique : 1,5 mm. Il pourrait donc être judicieux de ne pas le prendre en compte dans le calcul ou de le prendre moins en compte que les autres références. Un statut VZ (variable en Z) permet de l'exclure pour le calcul de la position verticale mais d'autres pistes peuvent être explorées pour automatiser une repondération des références de mauvaise qualité.

Liste des figures et tableaux

Figures :

Figure 1 : Organisation des différentes lignes faisceaux du CERN	8
Figure 2 : Définition du repère de référence CCS.....	11
Figure 3 : Repère de référence RST d'un équipement.....	12
Figure 4 : Gisement θ et pente Φ au point faisceau Entrée E	13
Figure 5 : déflection d'un équipement.....	13
Figure 6 : Champ d'application des différents géoïdes pour la détermination des altitudes	19
Figure 7 : Ecart en Z pour les points faisceaux du CERN.....	20
Figure 8 : Evolution du facteur unitaire de variance (so) selon la méthode de gestion des paramètres RST (échelle de so logarithmique).....	26
Figure 9 : Comparaison de la méthode de calcul des écarts des points faisceaux.....	30
Figure 10 : Ecart moyen par complexe selon les axes R et T induit par l'écart de roll $d\tau$	32
Figure 11 : Ecart vertical pour les points faisceaux d'une portion du LHC.....	34
Figure 12 : Vue de dessus des alésages et points faisceaux en tenant compte du roulis selon la situation	35
Figure 13 : Schéma de situation pour l'alignement de l'opération 17558.....	36
Figure 14 : Ecart radiaux des points faisceaux de référence et à aligner.....	38
Figure 15 : Ecart vertical des points faisceaux de référence et à aligner.....	38
Figure 4-1 : Valeur de l'écart angulaire en valeur absolue entre les deux verticales locales dans le plan normal au gisement du faisceau.....	51
Figure 4-2 : Ecart angulaire entre les deux verticales locales pour les points faisceaux du CERN	52
Figure 5-1 : Schéma de situation pour l'alignement de l'opération 28991	53
Figure 5-2 : Ecart radiaux des points faisceaux de référence et à aligner	54
Figure 5-3 : Ecart vertical des points faisceaux de référence et à aligner.....	54

Tableaux :

Tableau 1 : Estimation de la part d'équipements non fiduciaux par complexe du CERN.....	22
Tableau 2 : Comparaison des résultats entre avant et après l'adaptation de la précision	27
Tableau 3 : Bilan des paramètres de calcul pour la mise en station	37

Définition d'un processus de calcul appliqué sur le terrain pour l'alignement au niveau faisceau des équipements d'un accélérateur de particules.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2023

RESUME

La section ASG du CERN est responsable de l'alignement d'environ 8000 composants d'accélérateur. Actuellement, ces alignements se font uniquement avec les fiduciels, qui sont des points de référence externes sur les composants. Pour mieux répondre aux demandes des physiciens, les géomètres ont besoin de connaître la position des points faisceaux sur le terrain.

Ce mémoire propose une solution de calcul des points faisceaux prenant en compte la qualité de données à disposition. Une comparaison est faite avec la méthode de calcul en post-traitement. Ce calcul est ensuite exploité pour envisager l'alignement des faisceaux entre eux et non plus des fiduciels entre eux, ce qui permettrait d'améliorer la qualité d'alignement.

Mots clés : CERN, alignement, similitude spatiale.

SUMMARY

ASG section is responsible for the alignment of around 8000 accelerator components. Currently, alignments are done with only fiducials which are extern reference points on component. In order to improve results of alignment according to physicist expectations, surveyors need to know the beam position on field.

This report gives an overview of a beam position computation according to data quality. This computation is compared with the post procession method. Then, this computation is used to align beam points with reference beam points instead of fiducials. This enables to improve alignment quality.

Key words : CERN, alignment, helmert transformation.