



HAL
open science

Automatisation du processus de calcul des calibrations des capteurs FSI (Frequency Scanning Interferometry)

Vincent Gerligand

► **To cite this version:**

Vincent Gerligand. Automatisation du processus de calcul des calibrations des capteurs FSI (Frequency Scanning Interferometry). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04785394

HAL Id: dumas-04785394

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04785394v1>

Submitted on 15 Nov 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 D'INGENIEURS GEOMETRES ET TOPOGRAPHES

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Vincent GERLIGAND

Automatisation du processus de calcul des calibrations des capteurs FSI
(Frequency Scanning Interferometry)

Soutenu le 4 septembre 2024

JURY

Monsieur Pierre KERVELLA	Président du jury
Monsieur Vivien RUDE	Maître de stage
Madame Julia CALMELS	Maître de stage
Monsieur Stéphane DURAND	Enseignant référent

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier toutes les personnes ayant contribué à la bonne réalisation de ce Travail de Fin d'Études.

Ensuite, je remercie mes maîtres de stage, Julia CALMELS et Vivien RUDE, pour leur temps, leur savoir et leur expérience. Leur accompagnement et leur implication m'ont permis d'aboutir à ce mémoire.

Par ailleurs, je tiens à remercier Stéphane DURAND, mon professeur référent, pour son implication dans ce TFE ainsi que pour ses explications et clarifications mathématiques.

Je remercie également Léonard WATRELOT pour son aide et ses conseils, que ce soit dans le domaine de la topométrie ou sur la technologie FSI.

Je tiens ensuite à remercier Mateusz SOSIN pour sa disponibilité et pour son expertise sur la technologie FSI.

Je souhaite également remercier Michel NOIR et Okan DAG pour les réalisations mécaniques qu'ils ont produit dans le but de perfectionner le banc de calibration.

Ensuite, je remercie Jurgen GUTEKUNST pour son expertise mathématiques qui ont pu éclairer certaines problématiques de ce TFE.

Enfin, j'adresse un grand merci à ma famille et à Louise BOCHEREAU pour leur soutien durant toute cette période de TFE et pour leur relecture.

Liste des abréviations

AD	Antiproton Decelerator
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
ATLAS	A Toroidal LHC Apparatus
CCT	Calibration, Checking and Testing
CERN	Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
CMM	Coordinate Measuring Machine
CMS	Compact Muon Solenoid
FCC	Future Circular Collider
FRAS	Full Remote Alignment System
FFT	Fast Fourier Transform
FSI	Frequency Scanning Interferometry
HiLumi	High Luminosity
HL-LHC	High Luminosity Large Hadron Collider
HLS	Hydrostatic Levelling Sensor
HPA	High Precision Alignment Technology
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider beauty
LINAC	Linear Accelerator
LS3	Long Shutdown 3
MT-FSI	Multi Target Frequency Scanning Interferometry
PS	Proton Synchrotron
SPS	Super Proton Synchrotron
TFE	Travail de Fin d'Études
WPS	Wire Positioning System

Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations	3
Table des matières	4
Introduction	5
I Le projet High Luminosity Large Hadron Collider.....	7
I.1 CONTEXTE ET MISE EN ŒUVRE DU PROJET	7
I.1.1 LE LARGE HADRON COLLIDER	7
I.1.2 MISE EN ŒUVRE DU PROJET ET MODIFICATIONS DU LARGE HADRON COLLIDER.....	8
I.2 ALIGNEMENT DES COMPOSANTS ET FULL REMOTE ALIGNMENT SYSTEM.....	8
I.2.1 SURVEILLANCE INTERNE DES COMPOSANTS	9
I.2.2 LE RESEAU DE CAPTEURS	10
I.3 CALIBRATION DES CAPTEURS	11
II Le banc de calibration.....	12
II.1 PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT	12
II.1.1 LA TECHNOLOGIE FREQUENCY SCANNING INTERFEROMETRY ET SYSTÈME D'ACQUISITION.....	12
II.1.2 CONCEPT DU BANC.....	14
II.2 LIMITES INITIALES DU BANC	16
II.2.1 LES DOUBLES PICS.....	16
II.2.2 LA RECONNAISSANCE DES DISTANCES	17
II.2.3 AUTRES INCONVENIENTS NOTABLES.....	18
III Amélioration et automatisation du banc	19
III.1 AMELIORATION DE LA PRECISION DE CALIBRATION.....	19
III.1.1 DENSIFICATION DU RESEAU DE DISTANCES.....	19
III.1.2 PERFECTIONNEMENT DES PICS DE MESURE	22
III.2 OPTIMISATION DU TEMPS DE CALIBRATION.....	23
III.2.1 AUTOMATISATION DE LA DETECTION DES MESURES.....	23
III.2.2 LA RECONNAISSANCE AUTOMATIQUE DES DISTANCES	25
III.2.2.1 REDUCTION EN PROBLEME D'AFFECTATION ET ALGORITHME HONGROIS.....	26
III.2.2.2 LA CONVERGENCE VERS UNE SOLUTION OPTIMALE.....	27
III.3 LES LIMITES ACTUELLES DU BANC.....	29
IV Evaluation du processus de calibration automatique	33
IV.1 VALIDATION DU PROCESSUS.....	33
IV.1.1 REPETABILITE DU PROCESSUS	33
IV.1.2 COMPARAISON AVEC UNE CALIBRATION EN CMM	34
IV.2 AMELIORATIONS FUTURES ET PISTES A EXPLORER.....	37
Conclusion.....	38
Bibliographie.....	39

Introduction

Depuis 70 ans, le CERN est un acteur majeur de la recherche en physique des particules. Situé à la frontière franco-suisse, il comprend deux sites abritant de nombreuses installations et laboratoires dédiés à l'étude du monde subatomique. Parmi celles-ci, on compte une dizaine d'accélérateurs (et décélérateurs) à particules, tels que le LINAC, le SPS et l'AD, chacun alimentant une ou plusieurs expériences.

Le Large Hadron Collider (LHC), d'une longueur d'environ 27 km, constitue actuellement le plus grand accélérateur du complexe et accueille les 4 plus grandes expériences du CERN : ATLAS, CMS, ALICE et LHCb. Le LHC a été mis en fonction en 2008 dans l'objectif d'observer le boson de Higgs et ainsi de confirmer le modèle théorique de la physique contemporaine (SCHOPPER, 2020). Cette découverte a été rendue possible grâce aux détecteurs ATLAS (ATLAS Collaboration, 2012) et CMS (CMS Collaboration, 2012).

Pour aller plus loin dans la recherche en physique fondamentale et mettre en évidence les plus petits composants de notre monde, l'une des perspectives actuelles du CERN est l'augmentation du nombre de collisions particulières. C'est dans ce cadre que le projet High Luminosity LHC a été mis en place. Cependant, pour atteindre ce but, une tolérance d'alignement du faisceau de particules plus stricte est envisagée. De nouveaux aimants au champ magnétique plus puissant devront être installés et alignés avec une précision de l'ordre de quelques centaines de micromètres et être constamment contrôlés, malgré des conditions difficiles.

En effet, une fois les composants installés et en fonctionnement, le tunnel est soumis à une dose importante de radiation. De plus, certains composants sont enfermés dans des enceintes à vide pour être maintenus à température cryogénique et en condition d'ultravide. Ils ne sont donc pas accessibles depuis l'extérieur. Pour remédier à toutes ces contraintes, un réseau de capteurs a été pensé. Celui-ci est actuellement composé de divers capteurs conçus pour acquérir de multiples données (angles d'inclinaison, hauteurs, etc.) et assurer la surveillance interne et externe des composants. À ces capteurs, seront ajoutés des capteurs basés sur la technologie FSI (Frequency Scanning Interferometry) qui permettront notamment de contrôler la position des composants inaccessibles à distance. Ce dispositif, est complété par des supports motorisés qui servent à rétablir l'alignement si nécessaire, pour former le Full Remote Alignment System (FRAS).

Le projet HL-LHC prévoit environ 1150 capteurs (HERTY et al, 2022), dont plus de 600 qui utiliseront la technologie interférométrique. Tous ces capteurs devront être calibrés avant leur installation dans le tunnel, et, au vu de leur nombre, l'automatisation des calibrations est cruciale. Le début de l'installation du projet est prévu pour 2026 pour un lancement du premier faisceau de particules en 2028. Un banc d'autocalibration FSI a donc été fabriqué, dans le cadre du Travail de Fin d'Études (TFE) de CALMELS (2023), pour accroître la vitesse de calibration des capteurs FSI et ainsi respecter les délais. Celui-ci a le potentiel d'apporter un gain de temps considérable et un moindre coût par rapport aux autres méthodes utilisées jusqu'alors (CMM, Laser Tracker). Néanmoins, le processus de calibration nécessite d'être automatisé afin de rendre le banc viable.

Nous pouvons alors nous demander comment automatiser le banc d'autocalibration FSI actuel pour réduire le temps de calibration tout en étant précis, fiable et adaptable aux différents types de capteurs et d'objets à calibrer.

J'ai eu l'occasion de travailler sur cette problématique au sein de la section HPA (High Precision Alignment Technology) et d'utiliser les outils développés dans cette section dans le but de mettre en place un processus de calibration automatisé et viable.

Ce mémoire vise à mettre en évidence les différentes contraintes du banc actuel ainsi que les solutions qui ont été envisagées pour permettre l'automatisation du banc. Dans une première partie, nous présenterons le fonctionnement du LHC et nous détaillerons le projet HL-LHC afin de dresser le contexte d'utilisation et de calibration des capteurs du FRAS. Dans une seconde partie, nous étudierons le banc de calibration actuel, le concept selon lequel il a été fabriqué ainsi que ses limites. Nous détaillerons, dans une troisième partie, le processus d'automatisation du banc, les aspects qui ont été optimisés et les méthodes utilisées pour y parvenir. Enfin, dans une dernière partie, nous évaluerons la validité du banc et nous discuterons des pistes à explorer pour ses améliorations futures.

I Le projet High Luminosity Large Hadron Collider

I.1 Contexte et mise en œuvre du projet

Comme évoqué dans l'introduction, le projet HL-LHC (ou HiLumi) a pour objectif d'accroître la luminosité du LHC, c'est-à-dire d'augmenter le nombre de collisions. On parle ici de multiplier par 5 le rendement de la machine pour atteindre une production d'environ 15 millions de bosons de Higgs par an (CERN, 2024). Ces améliorations visent à optimiser le potentiel de découverte dans le domaine de la physique expérimentale du LHC.

I.1.1 Le Large Hadron Collider

Ce projet s'articule donc autour du LHC, situé dans un tunnel de 27 kilomètres de circonférence à 100 mètres de profondeur. Ce tunnel comporte 8 points d'accès dont 4 permettent l'accès aux grandes expériences du LHC.

À l'intérieur de l'accélérateur, les particules circulent à 99.99 % de la vitesse de la lumière (LOPES et al, 2022) atteignant une énergie de quelques téraélectronvolts (TeV). Pour parvenir à cela, des protons sont injectés dans un accélérateur linéaire. Depuis 2020, c'est le LINAC4 qui joue ce rôle. Le faisceau de particules est ensuite envoyé dans un autre accélérateur appelé Booster qui le transmet à son tour au PS, un second injecteur du LHC (cf. figure 1). Le faisceau est finalement convoyé jusqu'au SPS qui constitue le dernier maillon de la chaîne d'injecteurs menant au LHC.

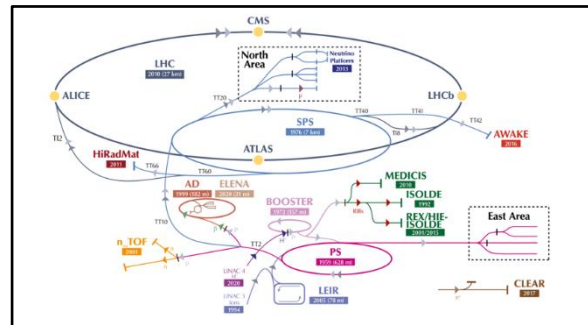


Figure 1 : Schéma du complexe d'accélérateurs du CERN (source : cern.ch)

Ces différents accélérateurs sont majoritairement composés de deux types de composants : les dipôles et les quadripôles qui sont équipés respectivement de 2 et 4 aimants. Les dipôles ont pour fonction d'orienter le faisceau dans les sections courbes tandis que les quadripôles servent à le focaliser dans les lignes droites. Par ailleurs, pour garantir le bon fonctionnement de l'accélérateur,

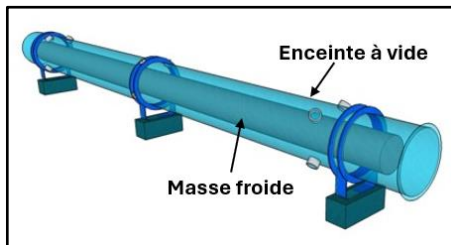


Figure 2 : Schéma 3D d'un dipôle

notamment, en activant les propriétés supraconductrices des particules, les composants sont soumis à certaines conditions. Par exemple, pour les quadripôles, la température doit être proche de 2 kelvins et la pression doit être de l'ordre de 10^{-13} atmosphères standard (LOPES et al, 2022), correspondant à l'ultravide. Pour réaliser cela, les quadripôles et les dipôles se

décomposent en deux morceaux : une enceinte à vide et une masse froide enfermée dedans (cf. figure 2).

L’alignement précis de ces composants est nécessaire pour le bon fonctionnement du LHC. Jusqu’à présent, seul l’alignement des enceintes à vide sur les 40 mètres avant chaque expérience, composé du triplet de quadripôles dits « low beta » (cf. figure 3), impliquait un suivi en temps réel.

I.1.2 Mise en œuvre du projet et modifications du Large Hadron Collider

Le projet HL-LHC s’appuie sur plusieurs innovations technologiques à apporter au LHC (CERN, 2024). De nouvelles galeries souterraines seront creusées près d’ATLAS et de CMS pour accueillir les équipements cryogéniques et électriques nécessaires au projet. De nouveaux collimateurs à cristaux seront installés pour nettoyer le faisceau. Enfin, la chaîne de composants de part et d’autre des expériences ATLAS et CMS sera complètement remplacée et de nouveaux composants, appelés cavités-crabe, seront ajoutés pour incliner le faisceau avant les collisions et ainsi optimiser leur nombre.

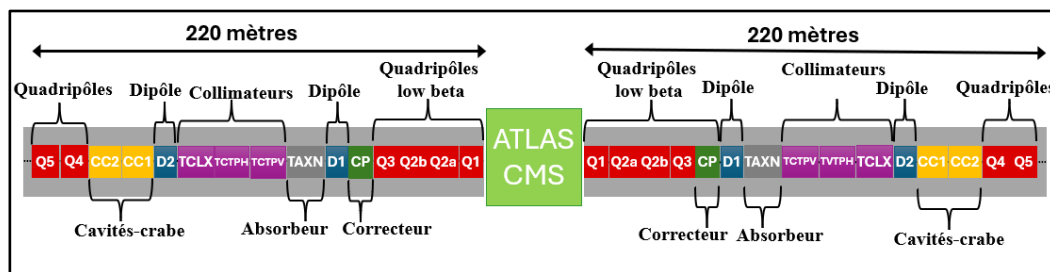


Figure 3 : Schéma de la chaîne de composants remplacée pour le projet HiLumi

La chaîne à modifier commence au quadripôle Q1 (côté expérience) et va jusqu’au quadripôle Q5 (cf. figure 3), sur une distance de 220 mètres. L’alignement devra garantir une précision transversale de 150 μm sur les 440 mètres entre les quadripôles Q5 de chaque côté (RUDE et al, 2022). Toutes ces modifications sont programmées durant le LS3 (Long Shutdown 3) qui commencera en 2026 et se terminera en 2029.

I.2 Alignement des composants et Full Remote Alignment System

Pour le LHC, la précision transversale attendue pour l’alignement des composants alentours aux expériences était sensiblement proche de l’objectif visé pour HL-LHC, soit approximativement 200 μm d’après MAINAUD DURAND (2006). Néanmoins, cette précision ne concernait que le triplet de quadripôles low-beta d’une quarantaine de mètres de chaque côté de l’expérience. Le défi de HiLumi est non seulement d’atteindre 150 μm , mais cette fois sur 440 mètres. De plus, l’accélérateur sera moins accessible en raison de l’augmentation du débit de dose radioactive. La solution envisagée passe par le Full Remote

Alignment System (FRAS) qui permet la surveillance interne et externe à distance de la position des composants, pour éventuellement les réaligner à l'aide de supports motorisés.

I.2.1 Surveillance interne des composants

L'une des pistes explorées par RUDE (2018) est la surveillance interne des quadripôles et des cavités-crabe. Des capteurs utilisant la technologie FSI (Frequency Scanning Interferometry) ont été développés et mis en place sur les enceintes à vide des composants, et des réflecteurs ont été installés sur les composants internes.

Ces têtes FSI mesurent alors une distance absolue entre l'extrémité de leur fêrulle et un réflecteur (cf. figure 4) et permettent de connaître la position des masses froides, normalement inaccessibles, mais aussi de mesurer d'éventuelles déformations de celles-ci. Le suivi en temps réel de l'évolution des positions des masses froides, sous hautes radiations et basses températures, est désormais possible grâce à ces capteurs.

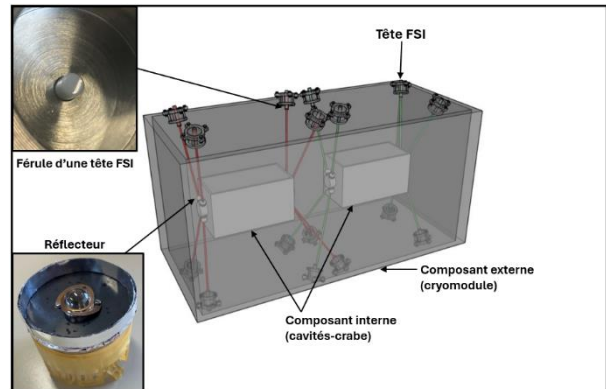


Figure 4 : Schéma de cavités-crabe équipées de capteurs FSI pour la surveillance interne

La configuration retenue pour la mesure des masses froides des quadripôles est de 12 capteurs FSI répartis en 3 groupes de 4 capteurs à chaque extrémité et au centre (cf. figure 5). En revanche, pour les cavités-crabe on retrouve 8 capteurs par cavité comme représentés en figure 4. Ces capteurs vont donc permettre de contrôler la position et l'alignement des masses froides et des cavités-crabe avec une précision micrométrique.

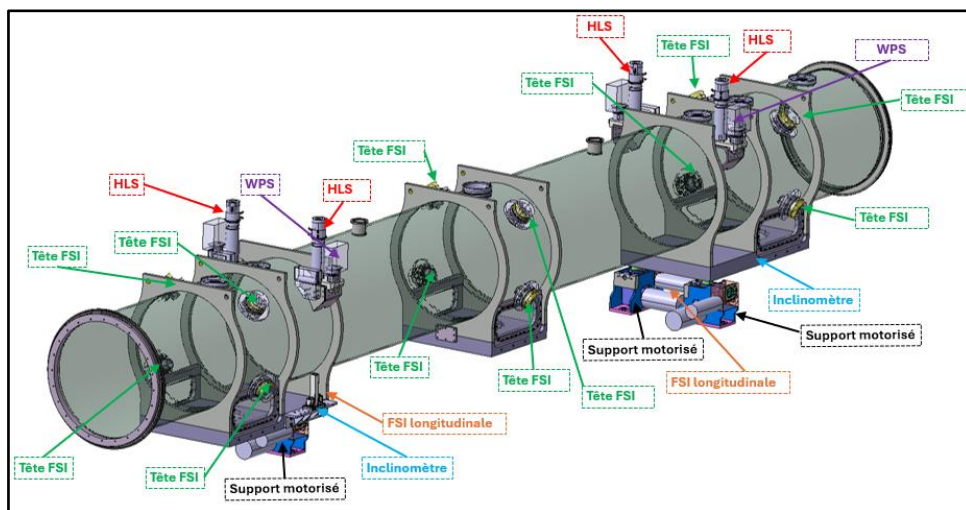


Figure 5 : Schéma d'un quadripôle low beta équipé du FRAS

Il existe également de nombreux autres capteurs qui contribuent à former le FRAS, garantissant le bon alignement des composants autour des expériences.

I.2.2 Le réseau de capteurs

En plus des têtes FSI utilisées pour la surveillance interne des quadripôles low beta et des cavités-crabe, il existe tout un réseau de capteurs participant au FRAS. Neuf systèmes de capteurs différents ont été développés au CERN et jouent chacun un rôle particulier dans la surveillance à distance de l'accélérateur.

Parmi eux, des capteurs HLS, connectés les uns aux autres par un réseau d'eau, vont permettre de mesurer les différences d'altitudes entre chacun via le niveau d'eau. Ils interviennent donc dans le contrôle vertical des composants. Le FRAS est aussi doté de capteurs WPS. Ces capteurs sont basés sur la technologie capacitive et permettent, à l'aide de fil, de mesurer des déplacements horizontaux ainsi que des dénivelées. Des inclinomètres ainsi que d'autres types de système sont également équipés aux composants (cf. figure 5). Tout ce système accorde la possibilité d'estimer le plus précisément possible les translations et les rotations que peuvent subir les composants entre Q1 et Q5. Enfin, des supports motorisés vont corriger les déviations jusqu'à plus ou moins 2.5 millimètres (BIEDRAWA, 2022) et ainsi entrer dans la tolérance d'alignement voulue.

Nom du capteur	Nombre total pour le HL-LHC	Précision de calibration attendue pour HL-LHC
WPS	264	5 μm
HLS	136	5 μm
Inclinomètres	76	15 μrad
Tête FSI longitudinale	72	10 μm
Tête FSI surveillance interne	320	10 μm

Tableau 1 : Capteurs du FRAS et leur précision (1σ) de calibration attendue pour HiLumi

Pour assurer le bon fonctionnement du FRAS, la position de tous les capteurs doit être connue dans des précisions qui ont évolué depuis RUDE (2022) en raison d'objectifs viable en simulation, mais pas atteignable dans la réalité. Les précisions de calibration attendues pour HiLumi sont renseignées dans le tableau 1, de même que le nombre de capteurs prévus. Les capteurs dont le fonctionnement est basé sur la technologie optique sont nouveaux (FSI, HLS, et certains inclinomètres). Auparavant, pour le LHC, seule la technologie capacitive était utilisée.

Avant leur utilisation, tous ces types de capteurs doivent être testés et validés. Les radiations et les champs magnétiques présents dans le tunnel peuvent influencer sur leur fonctionnement et leur précision (HERTY, 2009). Une fois le prototype validé, les capteurs sont calibrés avant d'être installés, de sorte à pouvoir facilement rattacher leur mesure au système de coordonnées utilisé dans le tunnel.

I.3 Calibration des capteurs

Les capteurs FSI pour les mesures longitudinales et ceux pour la surveillance interne, ainsi que les capteurs HLS, sont constitués de points de référence, appelés fiducielles, mesurables dans le tunnel par laser tracker. Cependant, le point depuis lequel les mesures de ces capteurs sont prises est l'extrémité de leur fêrulle. La calibration de ces capteurs passe donc par le calcul de la position de la fêrulle d'un capteur par rapport à la position de ces points de référence.

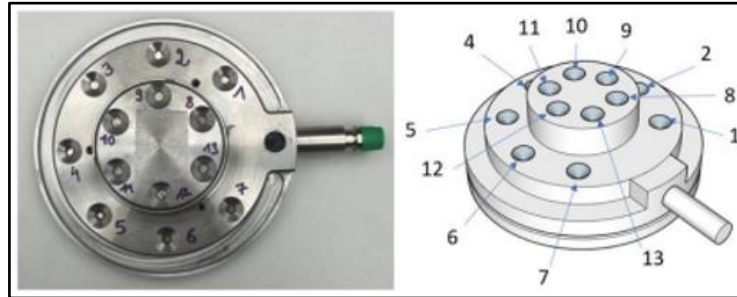


Figure 6 : Photo et schéma d'une tête FSI interne et de ces fiducielles

La précision des calibrations présentée dans le tableau 1 est valable pour chaque axe. Par exemple, les 10 μm requis pour les capteurs FSI internes sont à atteindre sur les coordonnées X, Y et Z (cf. tableau 2). Cela vaut pour 13 points des têtes FSI internes (cf. figure 6) mais aussi pour l'axe Z de la fêrulle. Cet objectif a été fixé à la suite de simulations faites sur l'ensemble du FRAS et à la précision maximale pouvant être atteinte en mesurant les fiducielles au laser tracker. En revanche, pour les coordonnées X et Y de la fêrulle, une imprécision impacte peu la distance mesurée car celle-ci suit quasiment l'axe Z. On considèrera donc l'objectif de précision à 30 μm pour ces coordonnées car ce sont les précisions atteintes en simulation.

	Précision en X	Précision en Y	Précision en Z
Fêrulle	~30 μm	~30 μm	10 μm
Fiducielles	10 μm	10 μm	10 μm

Tableau 2 : Objectif de précision (1σ) de calibration attendue pour les FSI internes pour HiLumi (CALMELS, 2023)

En plus de devoir être précises, les calibrations se doivent d'être rapides en raison du nombre important de capteurs à calibrer. Plusieurs méthodes ont été comparées dans CALMELS (2023) : calibrer au laser tracker nécessite plusieurs heures par tête, le bras Romer n'atteint pas la précision escomptée et la Coordinate Measuring Machine (CMM) est trop coûteuse. Un banc de calibration a donc été conçu pour calibrer les têtes FSI rapidement et précisément.

II Le banc de calibration

Un banc de calibration a été développé, en 2023, afin de calibrer les capteurs FSI internes. Dans cette partie, nous rappellerons les principes du banc ainsi que ses limites.

II.1 Principe et fonctionnement

Tout d'abord, nous allons étudier brièvement le fonctionnement de la technologie FSI sur laquelle le banc est basé, puis, dans un second temps, nous nous intéresserons au processus actuel de calibration du banc.

II.1.1 La technologie Frequency Scanning Interferometry et système d'acquisition

La technologie FSI est une méthode de mesure interférométrique utilisée au CERN pour effectuer des mesures en conditions difficiles (hautes radiations, fort champs magnétiques, températures cryogéniques et ultravide). On parle également de Multi Target FSI (MT-FSI) car il est possible de mesurer plusieurs cibles avec la même fibre optique.

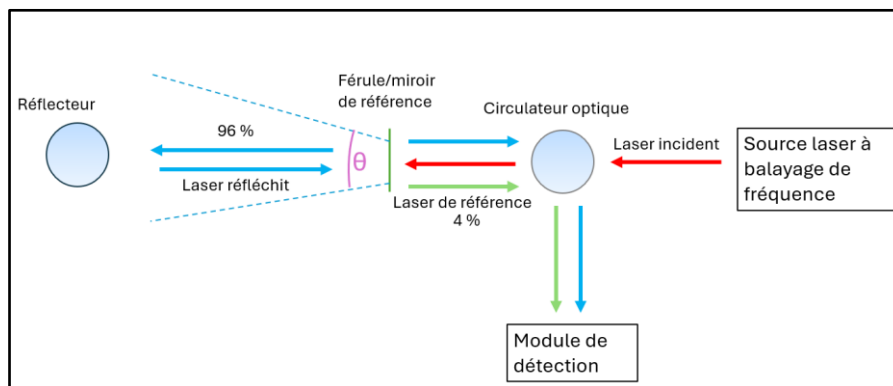


Figure 7 : Schéma de principe du fonctionnement d'un interféromètre FSI (SOSIN, 2019)

Son principe est similaire à l'interféromètre de Michelson, mais la fréquence du laser n'est pas constante : la source laser effectue un balayage de fréquence. Un laser est donc émis, puis, après être passé par un circulateur optique, il atteint la férule de la fibre optique. La majorité de la lumière (rayon en bleu de la figure 7) est ensuite émise par une férule (embout ou connecteur de fibre optique) selon un cône d'ouverture θ , tandis que 4 % de celle-ci sera réfléchi et atteindra un détecteur (rayon vert de la figure 7) pour servir de référence. Si le rayon émis rencontre une surface réfléchissante, il sera réfléchi, retournera à la férule, puis au module de détection.

Un signal d'interférence peut alors être construit mathématiquement (équation 1) à partir du rayon réfléchi et du rayon de référence. A est l'amplitude du signal, τ est le délai entre le signal de référence et le signal réfléchi, α est la vitesse de balayage de fréquence du laser et f_0 est la fréquence optique initiale du laser.

$$I(t, \tau) = A \cos[2\pi(\alpha\tau t + f_0\tau)] \quad (1)$$

Il est alors possible de calculer la distance D entre l'extrémité de la fêrle et le réflecteur (équation 2) en comptant le nombre de cycles N issu du signal d'interférence, à condition de connaître précisément la variation de fréquence du laser pendant le balayage $\Delta\nu$. L'indice de réfraction du milieu n et la célérité de la lumière dans le vide c sont aussi nécessaires pour le calcul.

$$D = c \frac{N}{2\Delta\nu n} \quad (2)$$

Une solution courante est d'ajouter un interféromètre de référence qui utilise la même source laser sur une distance connue afin d'estimer la valeur de $\Delta\nu$. Cependant, la vitesse de balayage de fréquence n'étant pas constante, une cellule de gaz est alors ajoutée au système pour étalonner $\alpha = \frac{d\nu}{dt}$. Enfin, dans le but de mesurer plusieurs cibles dans le cône d'une même fêrle, on applique une transformée de Fourier rapide (FFT) au signal issu du module de détection. Les distances entre la fêrle et chaque réflecteur pourront être identifiées par des pics présents dans le signal transformé. Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter SOSIN (2019).

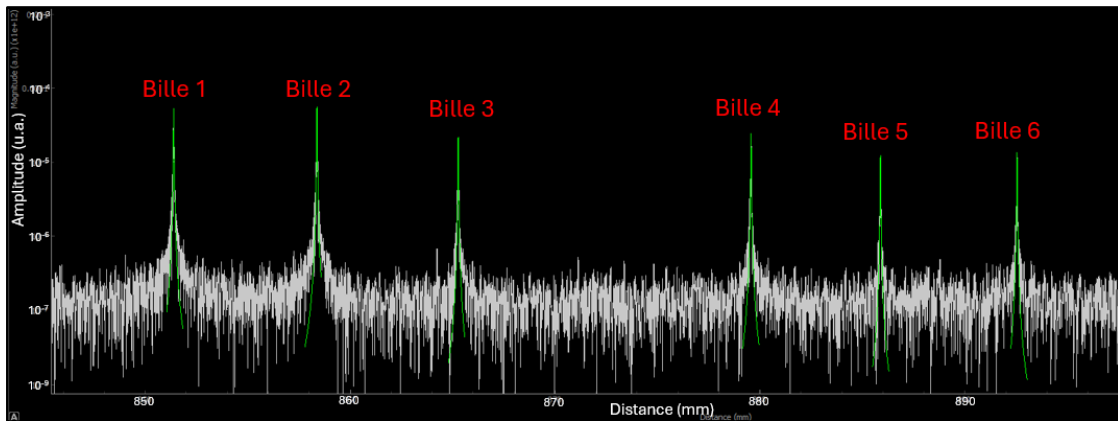


Figure 8 : Signal issu de la mesure de 6 billes réfléchissantes avec une même fibre

Le logiciel développé au CERN pour effectuer des mesures FSI utilise ensuite un ajustement avec une fonction lorentzienne afin d'interpoler l'abscisse d'un pic, correspondant à la distance mesurée. La figure 8 montre 6 pics correspondant aux mesures de 6 billes réfléchissantes en verre depuis une fibre optique. Le recouvrement vert est l'ajustement par fonction lorentzienne d'un pic.

D'autre part, le système FSI dont se sert le banc de calibration comprend un séparateur qui divise le signal en 16 canaux. Cela permet de brancher jusqu'à 16 fibres optiques, toutes capables de mesurer plusieurs cibles (cf. figure 9). Chaque canal utilisé aura

donc son propre signal avec les pics associés aux réflecteurs dans le champ de vision de sa fibre.

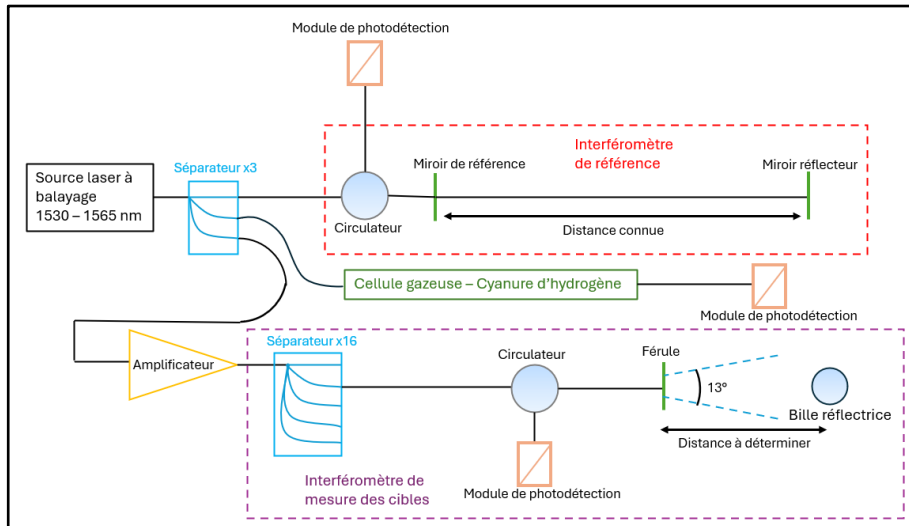


Figure 9 : Schéma simplifié de l'architecture de l'interféromètre FSI utilisé pour le banc de calibration (SOSIN, 2019)

D'après COE (2002), la technologie FSI est capable d'atteindre une précision d'un micromètre pour des distances inférieures à 20 cm. Pour le banc de calibration, nous avons estimé préférable d'utiliser dans les calculs une précision de 4 μm (CALMELS, 2023) pour plusieurs raisons. Les conditions atmosphériques locales (température, humidité et pression) ne sont pas suffisamment stables et nous ne prenons pas en compte l'incertitude sur l'indice de réfraction calculé à partir de celles-ci. De plus, les mesures faites sur le banc seront toujours comprises entre 30 cm et 1 m.

II.1.2 Concept du banc

Ce mémoire constitue la suite logique au Travail de Fin d'Études de CALMELS (2023) sur la conception d'un banc de calibration. Une grande partie des informations de cette partie sont donc consultables dans son mémoire. J'expliquerai donc le concept global du banc et du processus de calibration, pour plus de détails, il est possible d'aller consulter le mémoire en question.

Le banc de calibration initiale est composé d'une structure, de forme parallélépipède rectangle, sur laquelle reposent 4 fibres optiques branchées à l'interféromètre FSI. La structure est vissée sur une table à alvéoles et les fibres sont posées sur des supports de sorte à limiter au maximum les variations de position des fibres. Au centre de la structure, se trouve un support pour la tête à calibrer visible sur la figure 10. Les fiducielles sont orientées vers le haut du banc et la fêrulle est tournée vers le bas. Enfin, sur la table à alvéoles, un artefact possédant 9 points étalonnés en CMM est fixé. Cet artefact sert de référence au banc

et définit le repère dans lequel les calibrations seront calculées. Il est situé sous le support des têtes de sorte que celles-ci puissent le mesurer avec leur férule.

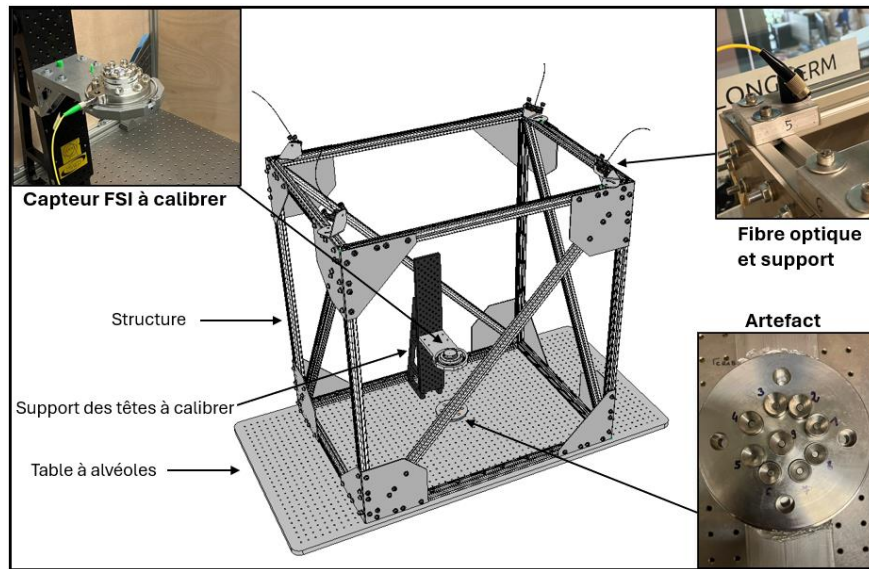


Figure 10 : Maquette du banc (CALMELS, 2023)

Pour procéder à la calibration, on pose la tête à calibrer sur le support et on la connecte à l'interféromètre avec une fibre optique. Il faut alors installer des billes réfléchissantes sur les 9 points de l'artefact ainsi que sur les 13 fiducielles de la tête FSI. Cette configuration est illustrée sur la figure 11. Les billes utilisées sont en verre et possèdent deux légères couches d'aluminium et de silicium (SOSIN, 2019) recouvrant partiellement la bille sur 8 mm, appelé coating (revêtement). Le coating améliore la réflexion du rayon optique.

Les fibres du banc ont été placées de sorte à respecter plusieurs contraintes, notamment que les billes de la tête et les billes de l'artefact soient dans le cône de mesure de 13° de toutes les fibres. Nous optimisons ainsi la redondance des calibrations.

Une fois l'installation terminée, on peut procéder aux mesures de toutes les billes avec le logiciel FSI évoqué dans la partie II.1.1. À l'issue de ces mesures, on aura 3 catégories de distances à traitées. Les distances entre les fibres de référence et les billes de l'artefact (d'environ 1 mètre), les distances entre les fibres de référence et les billes de la tête (d'environ 0.8 mètre) et les distances entre la férule de la tête et les billes de l'artefact (d'environ 0.3 mètre). On détermine ensuite la position de la férule et des fiducielles, dans

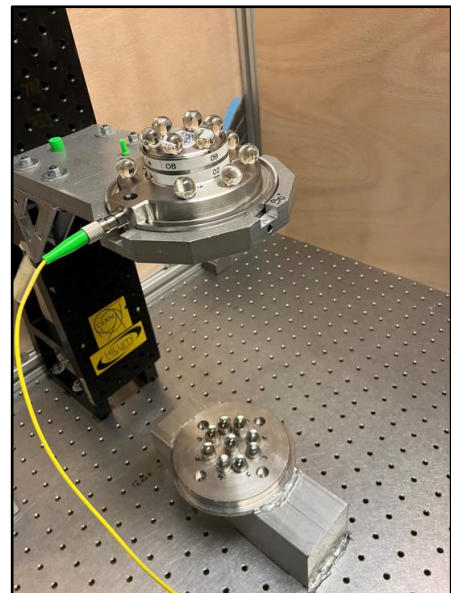


Figure 11 : Photo d'une tête FSI prête à être calibrée

un repère défini par les coordonnées des points de l'artefact, à l'aide d'un calcul par moindres carrés. Le banc pouvant se déformer et vibrer avec le temps, les positions des férules des fibres de référence sont aussi déterminées, on dit que le banc est en autocalibration.

Cependant, plusieurs facteurs influencent la précision et la vitesse de calibration du banc. Nous évoquerons les principales problématiques à résoudre pour l'automatisation du processus dans la partie II.2, puis nous nous concentrerons ensuite sur les solutions envisagées pour baisser considérablement le temps de calibration et améliorer la précision dans la partie III.

II.2 Limites initiales du banc

Le temps d'installation et de mesure du banc est particulièrement rapide en comparaison à des méthodes de calibration telles que la CMM ou le laser tracker. Néanmoins, la précision attendue de $10\ \mu\text{m}$ pour les coordonnées X et Y des fiducielles n'est pas atteinte en raison de la précision des mesures, considérée à $1\ \mu\text{m}$ en simulation, qui se rapproche plutôt des $4\ \mu\text{m}$ en réalité. De plus, à ce stade de développement du banc, plusieurs problématiques dans le traitement des données et dans l'automatisation du processus sont présentes. Une calibration prend alors 2 à 3 heures. Nous exposerons dans cette partie les facteurs principaux qui ont été identifiés et éventuellement étudiés dans le cadre de ce TFE, ainsi que leurs causes.

II.2.1 Les doubles pics

Tout d'abord, la dégradation de la précision des mesures FSI n'est pas l'unique symptôme du manque de précision du banc. Des « doubles » pics apparaissent parfois sur certaines distances. Il y a alors deux pics proches de quelques dixièmes de millimètres (cf. figure 12a). Le logiciel moyenne alors la mesure entre les deux sommets de pic et la mesure perd énormément en précision (cf. figure 12b). Il est alors possible de réduire la fenêtre de détection de pic pour ne détecter qu'un seul pic, mais on ne peut savoir lequel est le bon.

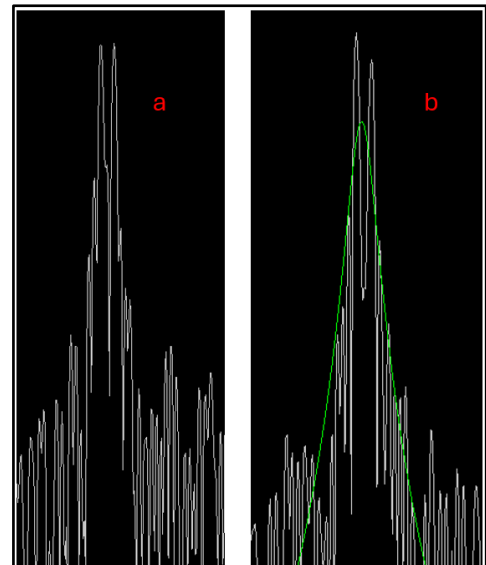


Figure 12 : Détection de deux pics espacés de $70\ \mu\text{m}$ pour une même distance (a) et son ajustement lorentzien avec une fenêtre de $0.2\ \text{mm}$ (b)

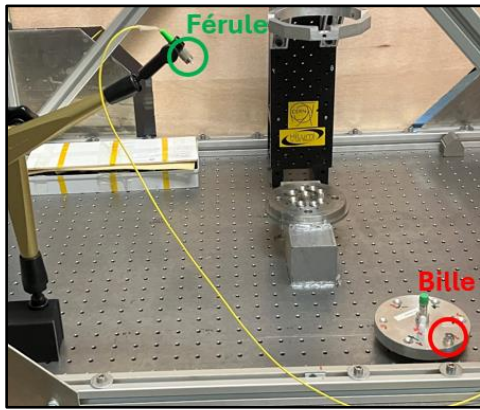


Figure 13 : Configuration d'apparition des doubles pics

Après avoir remarqué que ces doubles pics n'apparaissent pas sur des visées proches de l'horizontale ou proche de la verticale, nous avons procédé à des tests de visée inclinée susceptible de détecter des doubles pics. Une fois dans une configuration propice à l'apparition de doubles pics (cf. figure 13), nous avons observé la forme du pic avec différents supports de bille (brillant, sombre, large, etc.), différentes billes (avec ou sans coating,

petites ou grandes tailles, etc.) et avec différentes orientations du coating. Les textures moins réfléchissantes de supports ont atténué le second pic du double pic tandis qu'une orientation du coating vers la férule le supprime complètement. Nous en avons déduit que ce sont les cônes des fiducielles qui réfléchissent une partie de la lumière qui traverse la bille pour former un second pic entre 10 et 400 μm au-delà de la véritable distance (cf. figure 14).

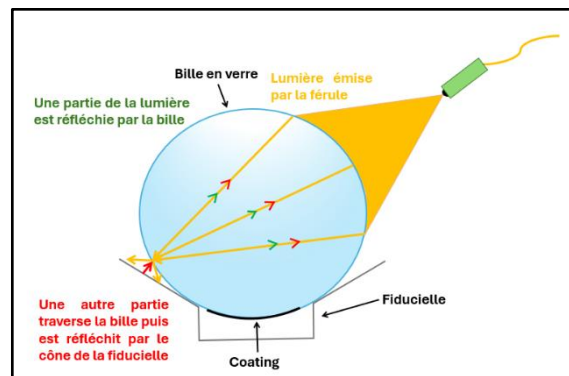


Figure 14 : Schéma du phénomène de réflexion de la lumière FSI sur les cônes des fiducielles

Ce phénomène de doubles pics affecte le nombre de mesures viables durant une calibration et réduit ainsi la précision finale des coordonnées des fiducielles calculées.

II.2.2 La reconnaissance des distances

Le second problème majeur du banc de calibration vient de la reconnaissance des distances. Lors d'une calibration, chaque fibre FSI de référence va mesurer 9 distances sur les 9 points de l'artefact qui seront très similaires. Cela se traduit sur le logiciel FSI par 9 pics très proches et il est alors difficile de savoir quel pic est associé à quelle bille. De plus, il se peut que plusieurs pics soient si proches (quelques dixièmes voir centièmes de millimètres) qu'il devient complexe de dissocier les deux distances (cf. II.2.1). Le même phénomène se produit pour les 13 fiducielles.

Nous avons donc, pour chaque fibre, deux blocs de pics (cf. figure 15) dont on peut discerner ceux correspondant aux points de l'artefact et ceux correspondant aux fiducielles.

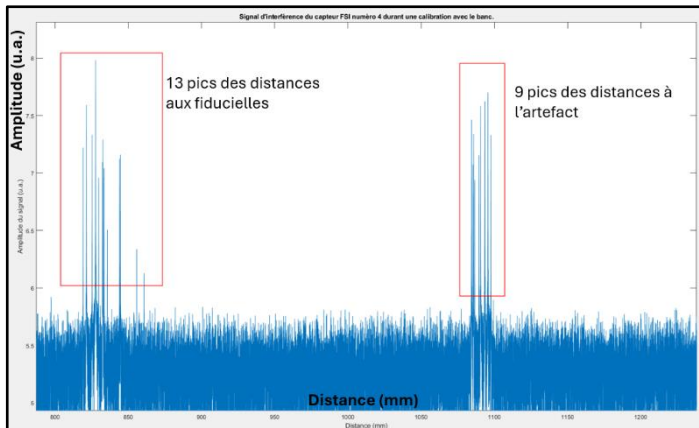


Figure 15 : Graphique d'un signal d'interférence issu d'une fibre de référence du banc durant une calibration

garder le meilleur serait beaucoup trop long. Pour se faire une idée, raisonnons avec 3 pics, c'est-à-dire 3 distances à 3 billes. L'univers des possibilités comprend alors 6 cas (cf. figure 16). Mathématiquement, cela correspond au calcul du nombre de permutation de l'ensemble {1,2,3} soit factorielle de 3. Plus généralement, pour un ensemble de n éléments, le nombre de permutations est égale à factorielle n (ROSEN, 2012). En partant de l'hypothèse que le calcul d'une calibration par moindres carrés dure 0.4 seconde sur le logiciel Matlab, pour 13 pics, on a 6 milliards de combinaisons possibles, soit presque 80 ans de temps de calcul, et cela sans prendre en compte les 9 distances à l'artefact. Pour optimiser le temps de calibration, il faudra donc chercher des solutions pour une reconnaissance des distances simple et rapide.

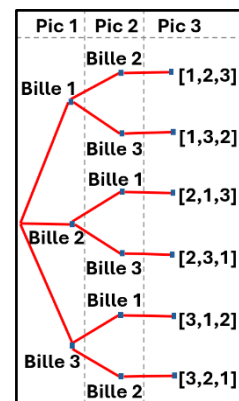


Figure 16 : Arbre de tous les cas possibles pour 3 pics

II.2.3 Autres inconvénients notables

De nombreux autres facteurs affectent également le temps et/ou la précision de calibration des têtes FSI. Une liste non-exhaustive de ces différents facteurs est faite dans le tableau 3. Nous verrons dans ce mémoire comment nous avons limité certaines de ces problématiques, et les éventuelles pistes à étudier pour les autres.

Cause	Conséquence(s) sur la calibration
Cliquer sur chaque pic sur le logiciel FSI pour pouvoir les mesurer	Coûteux en temps
Déformation de la structure du banc au cours de la calibration	Dégrade la précision
Ventilation juste au-dessus du banc	Dégrade la précision
Structure sensible aux vibrations	Dégrade la précision
Cônes de lumière des férules de 13° parfois juste pour contenir les points de l'artefact et ceux de la tête	Empêche certaines mesures donc engendre une perte de précision
Temps d'acquisition de mesure FSI de plusieurs minutes pour la mesure simultanée de dizaines de points	Coûteux en temps Les variations de conditions atmosphériques peuvent affecter la précision

Tableau 3 : Éventuelles causes de perte de temps et/ou de précision pour les calibrations avec le banc

Dans CALMELS (2023), on cachait certaines billes afin d'identifier les autres. C'est un procédé très long qui diminue grandement la vitesse de calibration espérée.

D'autre part, calculer un ajustement par moindres carrés pour tous les cas possibles et

III Amélioration et automatisation du banc

L'automatisation et l'amélioration du banc visent le gain de temps et de précision. Les objectifs de précision sont présentés dans le tableau 2. Pour ce qui est du temps de calibration, il serait convenable de pouvoir calibrer au moins une tête FSI par heure.

Nous verrons dans cette partie les processus mis en place pour atteindre la précision voulue, puis, nous parlerons des pistes explorées pour réduire le temps de calibration.

III.1 Amélioration de la précision de calibration

Avec une précision de mesure FSI de $4\ \mu\text{m}$ et 4 fibres de références, les précisions estimées en simulation (cf. tableau 4) ne sont pas conformes aux attentes de $10\ \mu\text{m}$, énoncées au tableau 2. À noter que les précisions des fiducielles annoncées correspondent à une moyenne des précisions des 13 points.

	Précision en X	Précision en Y	Précision en Z
Férule	28 μm	27 μm	2 μm
Fiducielles	19 μm	16 μm	7 μm

Tableau 4 : Précisions de calibration (1σ) en simulation avec 4 capteurs sur le banc

Afin d'améliorer la précision, la première perspective a été l'ajout de redondance dans le calcul par moindres carrés. Dans un second temps, il a été question d'améliorer la qualité des mesures.

III.1.1 Densification du réseau de distances

La redondance correspond au surnombre de mesures par rapport au nombre de paramètres que l'on souhaite estimer. En densifiant le réseau de mesure sans pour autant augmenter le nombre d'inconnues à déterminer, nous pouvons améliorer la précision. Étant donné le nombre de canaux de l'interféromètre FSI présenté au II.1.1, nous pouvons ajouter quelques fibres de références au banc de calibration. Après plusieurs simulations, nous avons décidé d'ajouter 4 fibres de références, soit 8 en tout.

Ce choix a été fait pour diverses raisons :

- le gain de précision est moindre au-delà et il faut 12 références pour atteindre les précisions X et Z souhaitées (cf. tableau 2).
- le temps d'acquisition d'un jeu de mesures augmente considérablement avec le nombre de canaux et de mesures, et un temps trop long engendre des variations de conditions atmosphériques pouvant impacter la calibration.
- l'interféromètre n'est pas réservé au banc, il est donc important de garder des canaux disponibles.

En doublant le nombre de fibres de références, on double les distances références-artefact et les distances références-fiducielles. Nous aurons alors au total 185 mesures (cf. tableau 5). Il peut cependant manquer plusieurs mesures à cause des cônes de vision des fibres qui sont restreints à 13°.

	Distances férule du capteur - artefact	Distances fibres de référence - artefact	Distances fibres de référence - fiducielles	Total
Nombre de mesures	9	8 x 9 = 72	8 x 13 = 104	185

Tableau 5 : Nombre de mesures avec 8 fibres de références sur le banc

Le tableau 6 renseigne les précisions issues des préanalyses de cette configuration, ainsi que celles d'un premier test de calibration effectué sur une tête. Celles-ci sont plus proches de nos objectifs, mais ils ne sont toujours pas atteints.

	Précision en X	Précision en Y	Précision en Z
Férule (simulation)	28 µm	27 µm	2 µm
Fiducielles (simulation)	13 µm	11 µm	4 µm
Férule (réalité)	30 µm	29 µm	2 µm
Fiducielles (réalité)	12 µm	14 µm	7 µm

Tableau 6 : Précisions de calibration (1σ) en simulation et en réalité avec 8 fibres sur le banc

L'une des propositions pour encore ajouter des mesures est d'effectuer une seconde série de mesures après une rotation de la tête calibrée autour de l'axe Z. L'idée est de procéder à une première mesure dans la configuration de la figure 11, puis d'effectuer une rotation de 180° de la tête et de répéter les mesures. Pour une plus grande redondance, on fera le postulat qu'aucune des fibres de références n'a bougé entre les deux calibrations malgré d'éventuelles vibrations et variations de températures, pression et humidité.

Le calcul par moindres carrés admettra donc jusqu'à 185 nouvelles équations. Les équations d'observations seront les mêmes à un détail près : les coordonnées des fiducielles et de la férule ont changées. Par exemple, dans les équations de distance capteurs-fiducielles (équation 3) on devra remplacer les coordonnées (X_{fi}, Y_{fi}, Z_{fi}) des fiducielles par leurs coordonnées transformées $(X'_{fi}, Y'_{fi}, Z'_{fi})$ calculées avec l'équation 4.

$$d_{\text{capteur-fiducielle}} = \sqrt{(X_{fi} - X_{\text{capteur}})^2 + (Y_{fi} - Y_{\text{capteur}})^2 + (Z_{fi} - Z_{\text{capteur}})^2} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} X'_{fi} \\ Y'_{fi} \\ Z'_{fi} \end{pmatrix} = R * \begin{pmatrix} X_{fi} \\ Y_{fi} \\ Z_{fi} \end{pmatrix} + T \quad (4)$$

R correspond à la matrice de rotation et T au vecteur de translation (équation 5 et 6) :

$$T = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & \sin \theta_z & 0 \\ -\sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_y & 0 & -\cos \theta_y \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & \sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & -\cos \theta_x \end{bmatrix} \quad (6)$$

En échange des 185 nouvelles mesures, nous ajoutons donc seulement 6 paramètres à estimer : les 3 translations (T_x, T_y, T_z) et les 3 angles de rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$).

Nous avons également procédé à des préanalyses et à des tests de ce processus de « double calibration ». Les résultats indiqués dans le tableau 7 ont été calculés dans une configuration à 8 capteurs et en effectuant une rotation d'environ 180°.

	Précision en X	Précision en Y	Précision en Z
Férule (simulation)	21 µm	20 µm	1 µm
Fiducielles (simulation)	9 µm	8 µm	3 µm
Férule (réalité)	19 µm	20 µm	1 µm
Fiducielles (réalité)	9 µm	10 µm	5 µm

Tableau 7 : Précisions de calibration (1σ) en simulation et en réalité dans deux positions

La précision visée pour une calibration est finalement atteinte en procédant à une rotation. Néanmoins, des erreurs non détectables peuvent se glisser dans les calibrations. Il est donc important qu'en plus de respecter la précision demandée, les calibrations soient fiables.

Nous avons donc calculé la fiabilité des mesures ainsi que la fiabilité des paramètres estimés (cf. tableau 8) pour une calibration simple et pour une calibration avec ajout de rotation (2 positions). Les risques de première et de secondes espèces ont été fixés respectivement à 1% et 5%. Cela se traduit par un paramètre de non centralité $\delta_0 = 4.1$. Ce test a été mis en place pour mettre en évidence le gain de fiabilité avec deux positions de mesures. Il a été réalisé sur une tête FSI à 13 points.

	Fiabilité locale (%)		Fiabilité externe - fiducielles (µm) (Moyenne)		
	Minimum	Maximum	Coordonnée X	Coordonnée Y	Coordonnée Z
Calibration simple	28.3	89.1	30	26	18
Calibration deux positions	59.7	94.6	13	15	8

Tableau 8 : Comparaison de la fiabilité entre une calibration une position et une calibration deux positions

On remarque qu'avec une seule position, la fiabilité locale dépasse les 25% pour toutes les mesures. On considère généralement une géométrie comme correcte entre 25% et 60%, et on estime qu'au-delà, il existe potentiellement des mesures non nécessaires. On pourrait donc supposer qu'une calibration double n'est pas indispensable en termes de fiabilité. En revanche, la plus grosse erreur non détectable sur les paramètres (fiabilité externe) estimés est nettement réduite. Atteindre ce niveau de fiabilité est très important, cela permet de valider que la solution obtenue n'est pas entachée d'erreurs indétectables et

qu'elle est donc proche de la véritable position des points calibrés. L'ajout d'une position de mesure semble donc non négligeable. Cependant, cela double le temps de calibration. L'automatisation du banc devra donc permettre de réaliser cette « double » calibration en une trentaine de minutes.

III.1.2 Perfectionnement des pics de mesure

Lors du calcul de compensation des calibrations, il n'est pas rare que certaines mesures admettent des fautes. Certaines de ces fautes ont pu être identifiées comme étant dues à des pics de mauvaise qualité. Les doubles pics (cf. II.2.1) sont notamment un exemple de ces « mauvais » pics. Les mesures qui empêchent la validation globale de la solution sont retirées du calcul. Nous verrons plus généralement, dans la partie III.2.3, comment ces fautes sont gérées durant la calibration et nos hypothèses sur leur origine.

Après avoir identifié la cause des doubles pics (réflexion du cône de la fiducielle), nous avons déterminé 3 solutions possibles pour résoudre cela sans pour autant changer la configuration du banc :

- Modifier le logiciel FSI pour qu'il ne s'ajuste que sur le premier pic (bon pic) d'un double pic malgré une fenêtre de détection englobant les deux (solution 1).
- Modifier le cône des fiducielles avec une matière non réfléchissante pour éviter une seconde réflexion engendrant un second pic (solution 2).
- Augmenter la taille du coating des billes réfléchrices afin de cacher l'ensemble du cône des fiducielles et améliorer la réflexion (solution 3).

La solution 1 n'a pas été essayée car celle-ci demande une bonne connaissance du logiciel FSI et de son code. Cela serait trop coûteux en temps. De plus, il est probable qu'en supprimant le problème des doubles pics de cette manière, on supprime en même temps des mesures de distances similaires et donc viables. La solution 2 a été essayée en couvrant les fiducielles d'une fine couche de charbon ou en ponçant leur cône pour réduire leur réflectivité. Le test le plus concluant a été celui avec le charbon. Le second pic a bien été atténué, mais pas suffisamment pour ne pas le confondre avec un éventuel bon pic (cf. figure 17). En outre, cela ajoute du temps de développement et de fabrication pour l'ensemble des capteurs que l'on souhaite calibrer avec le banc. Finalement, c'est la solution 3 qui a été retenue. Après des tests

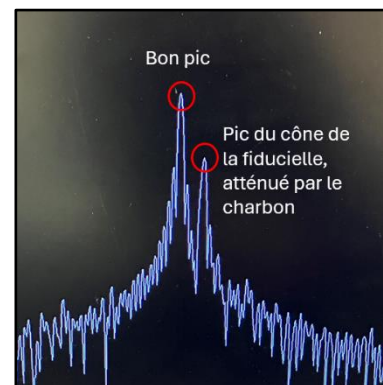


Figure 17 : Double pic atténué par le charbon

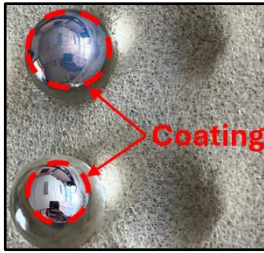


Figure 18 : Billes réfléchissantes avec coating 8 mm (en bas) et coating 12 mm (en haut)

concluants sur une bille que nous avons peinte, nous avons commandé 30 billes avec un coating de 12 mm, contre 8 mm avant (cf. figure 18). La composition du coating est la même. Après réception des billes, nous les avons essayées. Les doubles pics ont complètement disparu. Plus généralement, le nombre de mesures problématiques dans les calculs a drastiquement diminué. Pour vérifier cela, nous avons réalisé 2 calibrations sur la même tête FSI : une avec les anciennes billes et une avec les nouvelles billes. Nous

avons ensuite regardé le nombre de mesures retirées du calcul pour valider le test du chi-deux avant et après l'ajout de la seconde position de mesure (cf. tableau 9).

	Nombre de mesures supprimées du calcul en calibration simple	Nombre de mesures supprimées du calcul avec une rotation ajoutée	Précision en X Fiducielles (Rotation)	Précision en Y Fiducielles (Rotation)	Précision en Z Fiducielles (Rotation)
Anciennes billes (8 mm)	9	42	10 μm	11 μm	5 μm
Nouvelles billes (12 mm)	3	12	8 μm	9 μm	4 μm

Tableau 9 : Comparaison des résultats de calibration d'une même tête avec différentes tailles de coating de bille

Les résultats montrent qu'il y a bel et bien une amélioration. Nous pensons qu'en plus de supprimer les doubles pics, le nouveau coating augmente la qualité de nombreux pics. Sa surface plus grande va mieux intercepter le laser du FSI et faciliter la réflexion. Ces nouvelles billes apportent donc un nombre de mesures viables plus grand, ce qui accroît la précision. Maintenant que nous sommes capables d'effectuer des calibrations précises, fiables et robustes, nous allons aborder le processus développé pour les automatiser.

III.2 Optimisation du temps de calibration

Afin de réduire le temps de calibration, deux axes majeurs ont été étudiés. Premièrement, nous nous concentrerons sur la détection des mesures qui est longue et fastidieuse (cf. tableau 3). Ensuite, il sera question d'automatiser la reconnaissance des distances évoquée dans la partie II.2.2. Enfin, nous verrons quels sont les inconvénients amenés par l'automatisation du processus de calibration.

III.2.1 Automatisation de la détection des mesures

Lors d'une calibration, le logiciel requiert que l'utilisateur identifie toutes les distances qu'ils souhaitent mesurer en sélectionnant les pics un par un. La sélection se fait en cliquant approximativement sur le pic. On paramètre ensuite une fenêtre de détection sur chaque canal. Le logiciel va faire l'ajustement lorentzien des pics pour chaque distance sélectionnée dans la fenêtre de détection choisie pour pouvoir ensuite mesurer. On dénombre 370 pics à identifier et à cliquer dans 9 signaux différents pour la calibration d'une tête FSI

interne. À raison de 5 pics sélectionnés à la minute, on arrive à plus de 70 minutes uniquement pour la préparation aux mesures, ce qui est déjà trop long.

Cependant, le logiciel FSI est doté d'une option qui permet d'insérer des fichiers de configuration. Ces fichiers, lorsqu'ils sont bien formatés, permettent de paramétrer certaines options du laser et des canaux utilisés. Il est notamment possible de définir les distances où l'on souhaite mesurer un pic ainsi que la fenêtre de détection (cf. figure 19). Un fichier de configuration contenant les distances approximatives à mesurer pour chaque canal permettrait donc d'identifier les pics sans avoir à les sélectionner un par un. De plus, le logiciel permet l'export du signal sous la forme d'un fichier tableur comportant une colonne pour les distances (abscisses), et une deuxième pour l'amplitude du signal correspondant (ordonnées).

```
[Channel 9]
enabled = True
name = Ch9
distance window = 0.2]
initial distance = ['0.30873', '0.31014', '0.31111', '0.3126', '0.31449', '0.31592', '0.31688', '0.31695', '0.31716']
range = 200 m
repetitions =
delay =
```

Figure 19 : Lignes de configuration du canal correspondant à la férule du capteur calibré

L'idée est donc d'exporter les 9 signaux des 9 canaux utilisés pour nos calibrations (8 fibres de références et le capteur connecté à la tête à calibrer). Les fichiers exportés seront ensuite traités avec un code MATLAB pour ressortir un unique fichier de configuration à importer dans le logiciel. Ce code devra donc traiter le signal afin de trouver un maximum de pics qui nous intéressent pour la calibration, sans pour autant sélectionner un bruit de mesure important comme pic.

Un algorithme nommé *PeakDetection* a donc été développé pour effectuer cette tâche. Il nettoie d'abord le signal d'origine (courbe bleu de la figure 20) en supprimant toutes les valeurs inférieures à sa moyenne. Cette opération est réitérée 4 fois pour ne garder que les pics remarquables du signal. Au-delà de 5 itérations, plus de 50% des pics disparaissent, alors que jusqu'à 4 itérations, le signal contient encore trop de bruit pour détecter les pics.

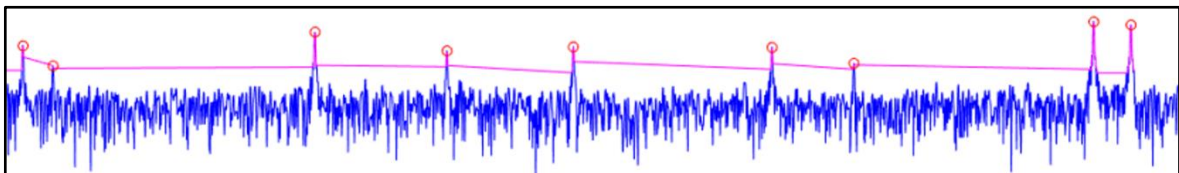


Figure 20 : Graphe d'un signal et de la détection de ses pics

Le signal obtenu est ensuite lissé par moyenne glissante sur 2 points pour supprimer les légères variations d'amplitude locale dues au bruit (O'HAVER, 2024). On applique ensuite la fonction `findpeaks` de MATLAB qui recherche tous les maximums locaux du signal. La courbe des maximums locaux obtenue contient généralement des valeurs ne

correspondant pas à des pics. On applique donc de nouveau un lissage, mais cette fois-ci gaussien, pour ne garder que les pics. On obtient alors la courbe rose de la figure 20.

À ce stade, on peut récupérer les pics qui nous intéressent. Le nombre de pics détectés dépend de la demande de l'utilisateur. Cela permet une meilleure adaptabilité en fonction du nombre de fiducielles du capteur calibré. D'autres filtres sont finalement appliqués pour supprimer les pics aberrants, en excluant par exemple les distances incohérentes à notre configuration de mesure. Le fonctionnement de cet algorithme est résumé sur la figure 21.

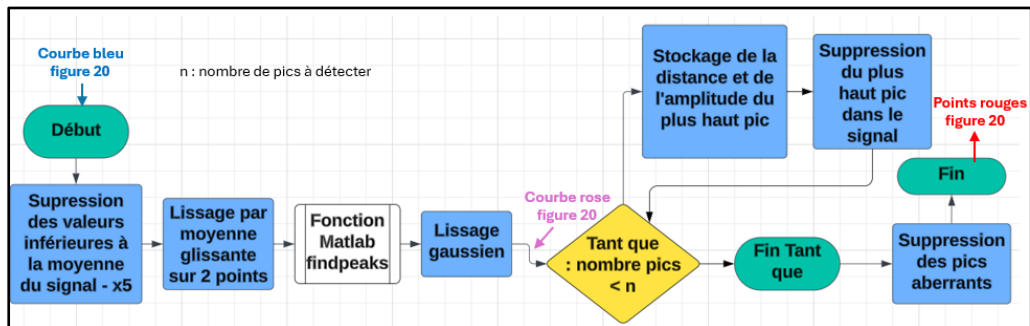


Figure 21 : Algorithme *PeakDetection* pour la détection de pics durant les calibrations

Maintenant que nous sommes capables de détecter nos pics rapidement et que nous pouvons procéder aux mesures, il faut traiter les distances mesurées et pour cela, il faut être capable de les identifier.

III.2.2 La reconnaissance automatique des distances

Nous avons vu dans la partie II.2.2 que l'étude de toutes les possibilités d'association de distances à un point n'est pas faisable dans un temps polynomial. Ce type de problème où l'on doit trouver l'association parfaite entre deux ensembles de même taille est courant en optimisation combinatoire. C'est le Stable Matching problem ou problème d'appariement stable (KLEINBERG, 2006) et il nécessite une complexité en temps noté $O(n!)$.

Pour reconnaître automatiquement nos distances, nous avons dû réduire le champ des possibles en ajoutant certaines informations sur nos points et nos distances. Cela a permis de se réduire à un problème d'affectation (ou problème d'assignement) résoluble en complexité $O(n^3)$ avec l'algorithme Hongrois (PAPADIMITRIOU, 1998). Nous sommes alors capables d'obtenir une solution en temps polynomial, ce qui est suffisant dans notre cas.

Nous expliquerons donc d'abord comment simplifier ce problème de reconnaissance de distance pour pouvoir y appliquer l'algorithme Hongrois. Nous verrons ensuite comment, à partir de cet algorithme, nous pouvons converger vers une solution suffisamment robuste pour être viable en calibration.

III.2.2.1 Réduction en problème d'affectation et algorithme Hongrois

L'algorithme Hongrois ou algorithme de Munkres-Kuhn permet d'optimiser la résolution d'un problème d'affectation. Ce type de problème est souvent illustré par l'exemple suivant : soient 4 personnes notées ici p_i ($1 \leq i \leq 4$) et 4 tâches à réaliser notés T_j ($1 \leq j \leq 4$). Chaque personne p_i a besoin de t_{ij} unités de temps pour réaliser une tâche T_j . On cherche à savoir quelle personne doit effectuer quelle tâche pour optimiser la production des tâches. Une contrainte supplémentaire est tout de même nécessaire pour que ce soit un problème d'affectation : chaque personne doit se voir affecter au moins une tâche et, puisqu'il y a autant de tâches que de personne, chaque personne doit réaliser au plus une tâche. Autrement dit, le résultat doit être une bijection.

On peut alors présenter le problème sous la forme matricielle :

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7)$$

Il est alors possible d'appliquer l'algorithme Hongrois à la matrice Q et ainsi déterminer la meilleure affectation possible personnes-tâches. Cela revient à sélectionner, dans la matrice Q , un unique coefficient t_{ij} par ligne et par colonne. Ces coefficients seront généralement parmi les plus faibles de la matrice, ceux qui correspondent aux coûts de temps moindre. Nous ne détaillerons pas le fonctionnement de l'algorithme ici, mais il est disponible dans KUHN (1955).

Revenons à notre reconnaissance de distance : on cherche à assigner l'une des 13 fiducielles à l'une des 13 distances mesurées à la tête. Le principe est le même pour les 9 distances à l'artefact. On peut donc construire une matrice 13x13 (ou 9x9), de la même façon que dans l'équation 7, où les lignes correspondent aux distances et les colonnes aux points. On peut alors se demander quelle information entre les distances et les points nous permettrait d'appliquer l'algorithme Hongrois et d'obtenir le résultat recherché.

Les coefficients de coût C_{ij} qui ont été envisagés correspondent à la différence entre la distance mesurée et la distance théorique calculée avec les coordonnées approchées des points. Cela ne demande pas de ressources supplémentaires puisque les coordonnées approchées sont nécessaires pour faire l'ajustement par moindres carrés ensuite. L'équation 8 développe le calcul de ces coefficients.

$$C_{ij} = D_i - \sqrt{(X_{\text{capteur}} - X_j)^2 + (Y_{\text{capteur}} - Y_j)^2 + (Z_{\text{capteur}} - Z_j)^2} \quad (8)$$

D_i est la i ème distance mesurée, $(X_{\text{capteur}}, Y_{\text{capteur}}, Z_{\text{capteur}})$ sont les coordonnées approchées du capteur de référence du banc sur lequel on cherche à reconnaître les distances

et (X_j, Y_j, Z_j) sont les coordonnées approchées du jème point de la tête calibrée ou de l'artefact. i et j sont tous deux compris entre 1 et 9 ou 1 et 13 suivant si on cherche à reconnaître les distances à l'artefact ou à la tête.

Les coefficients les plus proches de 0 seront les plus susceptibles de correspondre à la bonne association entre une distance et un point. Le tableau 10 représente la matrice Q dans un cas où l'on cherche à associer 9 distances à l'artefact. On remarque que les coefficients correspondant à la bonne association (en vert) ne sont pas forcément les plus faibles de leur ligne ou de leur colonne, bien qu'ils soient toujours relativement faibles.

(mm)	Point artefact 1	Point artefact 2	Point artefact 3	Point artefact 4	Point artefact 5	Point artefact 6	Point artefact 7	Point artefact 8	Point artefact 9
Distance 1	0.024	6.340	12.879	17.739	15.272	5.094	3.648	8.547	4.554
Distance 2	0.587	2.587	3.214	7.214	15.298	4.214	0.257	0.248	2.551
Distance 3	10.254	3.984	0.125	1.119	0.874	0.510	6.514	8.145	2.154
Distance 4	2.147	3.214	0.214	4.871	1.254	0.642	0.475	9.874	17.214
Distance 5	1.154	0.412	12.214	3.214	7.895	16.697	5.321	0.154	4.789
Distance 6	21.874	0.378	14.695	11.524	0.021	0.785	2.745	4.178	0.647
Distance 7	19.543	10.247	12.654	3.471	9.354	0.900	6.217	3.214	0.843
Distance 8	10.354	15.417	3.254	0.542	2.145	7.647	6.541	20.178	1.118
Distance 9	0.236	3.214	5.241	8.796	6.314	5.521	13.214	0.238	6.748

Tableau 10 : Matrice des coefficients calculés pour une reconnaissance de distance par algorithme Hongrois pour des distances références-artefact

Cependant, certaines distances étant très similaires (moins de 0.1 mm de différences), la solution dépend de la précision des coordonnées approchées des capteurs ainsi que de celles des points mesurés. Le résultat obtenu comprend souvent des erreurs, le mauvais point est parfois associé à la mauvaise distance. Une méthode a donc été pensée pour limiter cela et converger vers une solution plus optimale.

III.2.2.2 La convergence vers une solution optimale

Les coordonnées approchées des fibres de références du banc sont préalablement calculées, dans le repère du banc, en mesurant l'artefact. On estime la précision de cette calibration à environ 80 μm selon les axes X et Y, et de 40 μm selon l'axe Z. Les changements atmosphériques et les vibrations peuvent légèrement déplacer ces coordonnées au cours du temps. Les coordonnées des fiducielles varient d'une tête à l'autre (d'où l'intérêt de la calibration). On estime la précision de l'usinage des fiducielles à 500 μm . Cela est suffisant pour fausser la reconnaissance de distance.

Les coordonnées de l'artefact utilisées dans le calcul des coefficients, étant calibrées en CMM, sont considérées comme connues à une précision inférieure au micromètre. De plus, ces points fixent le repère du banc, leur position ne varie donc pas lorsque l'on modifie la position de l'artefact : ce sont les points de référence pour les calibrations.

Pour réussir à atteindre une reconnaissance des distances exploitable, nous procéderons en deux temps. Tout d'abord, on cherchera à reconnaître toutes les distances

entre les fibres du banc et l'artefact (phase 1). Ensuite, nous pourrons effectuer une reconnaissance des distances aux fiducielles (phase 2). Ces deux phases s'appuient sur le même algorithme que nous appellerons *DistanceRecognition*.

La reconnaissance des distances entre la fêrule du capteur que l'on calibre et l'artefact n'est pas réalisé dans l'algorithme : l'ordre des distances est généralement le même, et il est rapidement vérifiable si besoin puisqu'il n'y a que 9 distances.

Une première utilisation de l'algorithme Hongrois est réalisée pour déterminer uniquement la correspondance des distances à l'artefact, noté R1. On va ensuite effectuer une première compensation par moindres carrés avec la reconnaissance R1. Si le facteur unitaire de variance passe le test de validation globale de la solution on considère R1 comme correct. Sinon, on garde les coordonnées des capteurs issues de la compensation pour appliquer une seconde fois l'algorithme Hongrois avec celles-ci. On va réitérer ce processus n fois, jusqu'à ce que le facteur unitaire de variance ne baisse plus. Si le test du chi-deux n'est toujours pas validé, c'est qu'une ou plusieurs erreurs subsistent quelque part dans les données (coordonnées approchées et distances mesurées). Celles-ci vont constamment mener à une ou plusieurs associations distance-point fausses. En réalité, c'est presque toujours le cas.

Pour repérer la mesure avec l'erreur la plus grande, on va refaire un ajustement. On utilisera la norme L1 plutôt que les moindres carrés. Cette méthode confère une meilleure détection de faute sur les mesures (BONNEL, 1999). On va ensuite retirer temporairement du calcul la mesure associée au plus grand résidu de mesure, puis on réitère le processus décrit dans le paragraphe précédent : on applique l'algorithme Hongrois, puis les moindres carrés et on itère jusqu'à faire stagner le facteur unitaire de variance. Si on n'arrive toujours pas à valider le test de validation globale de la solution, on supprimera une seconde mesure. On répétera cela jusqu'à valider ce test ou jusqu'à atteindre un seuil de mesure enlevée à ne pas dépasser défini à l'avance (généralement 15 mesures). Ce seuil a été fixé car on considère qu'au-dessus de 15 mesures problématiques, ce qui nous empêche de converger réside ailleurs. Il serait par exemple judicieux de vérifier les coordonnées approchées. Cela marque la fin de la phase 1 de la reconnaissance des distances.

Une fois les distances capteurs-artefact reconnues, nous connaissons également les coordonnées « approchées » des fibres du banc très précisément. On procède alors à la reconnaissance des distances capteurs-fiducielles (phase 2) avec le même algorithme *DistanceRecognition* (cf. figure 22). Les mesures supprimées durant la phase 1 seront remises dans le calcul de sorte que les tests d'ajustements par moindres carrés et norme L1

puissent se calculer initialement avec toutes les distances mesurées en calibration. Les coordonnées approchées de l'artefact seront remplacées par celles des fiducielles, et il y aura 13 distances à reconnaître. Les coordonnées approchées des fibres de référence sont fixées et ce sont celles des fiducielles qui seront affinées au fil des itérations de la reconnaissance. Sinon, le fonctionnement est exactement le même.

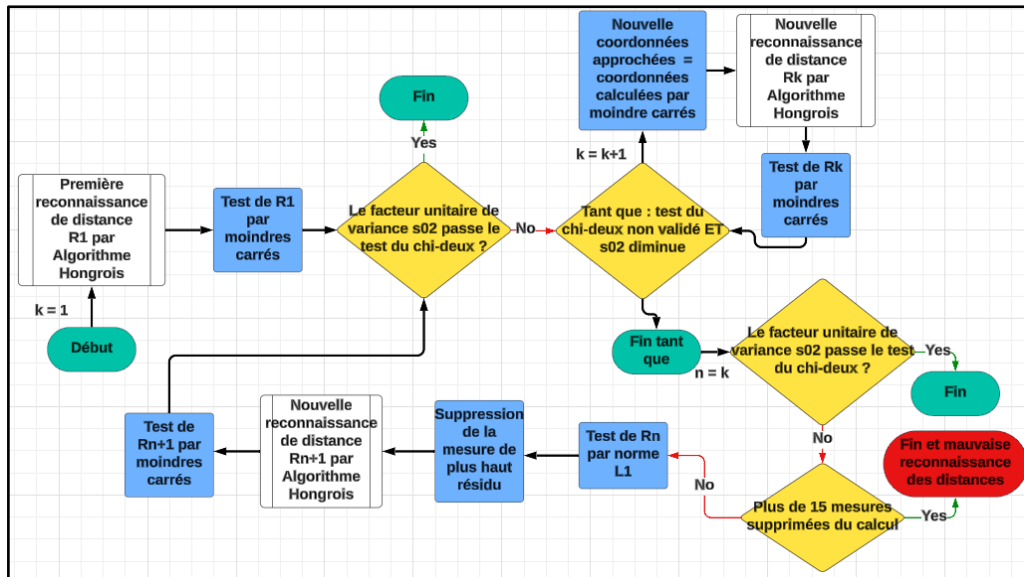


Figure 22 : Algorithme *DistanceRecognition* simplifié pour la reconnaissance des distances

Le temps de calcul de la reconnaissance des distances par cet algorithme est inférieur à une minute. Il répond donc bien aux critères de vitesse des calibrations. En revanche, le programme admet certaines limites.

III.3 Les limites actuelles du banc

Les distances retirées lors de la reconnaissance de distance de la phase 2 seront également remises pour l'estimation finale. Si d'éventuelles mesures problématiques pour la validation globale du résultat subsistent alors, elles seront détectées à l'aide de la norme L1 et définitivement supprimées du calcul lors de cette dernière étape (cf. figure 23). On peut alors se demander pourquoi ces mesures ne sont pas viables dans le calcul et quelles hypothèses pourraient justifier de les retirer.

L'automatisation des phases de détection de pics et de reconnaissance de distance, détaillée

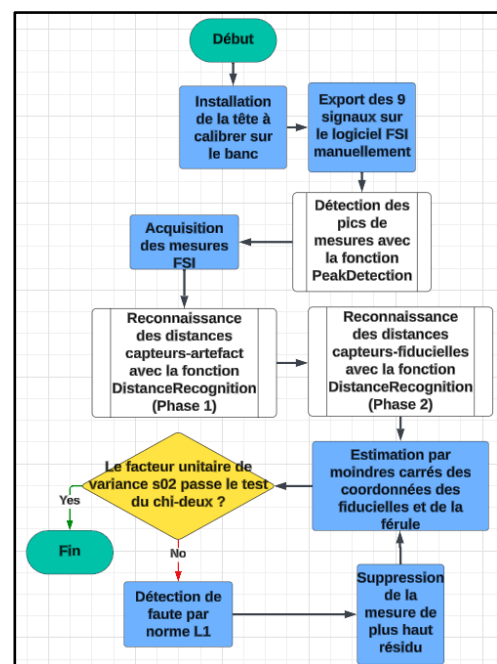


Figure 23 : Processus de calibration automatisé pour le banc

précédemment, est moins robuste que si elles étaient réalisées manuellement. Nous pensons que les mesures empêchant la validation globale de la solution sont principalement issues d'erreurs provenant d'une mauvaise détection de pics ou d'une mauvaise reconnaissance de distance.

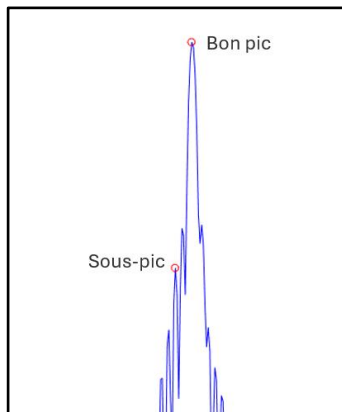


Figure 24 : Exemple de "sous-pic" détecté

La méthode de détection de pic a donc été testée sur 56 signaux issus de 3 têtes différentes, dans diverses positions sur le banc. Nous avons comparé sur tous ces signaux une détection de pic manuelle et une détection automatique. L'objectif de ces tests est de quantifier l'efficacité de l'algorithme dans des conditions réelles de calibration. Les données montrent que 99.2 % des pics détectés automatiquement sont des bons pics tandis qu'il n'y a que 2 % de bons pics qui ne sont pas détectés par l'algorithme. La méthode semble donc plutôt robuste. La majorité des mauvais pics détectés correspondent à des « sous-pics » très prononcés pouvant apparaître autour de véritables pics (cf. figure 24). Il peut aussi arriver que ces mauvais pics soient sélectionnés car l'algorithme cherche, par exemple, 13 fiducielles, et que certaines ne soient pas bien visibles dans le cône de mesure de la fibre. L'algorithme va parfois sélectionner un bruit de mesure important en pensant que c'est le 13ème pic. Au final, on estime que les 0.8% de mauvais pics peuvent représenter 3 mesures retirées lors du calcul. Les bons pics non détectés sont eux souvent trop petits donc sûrement à l'extrémité du cône d'ouverture du FSI, ou alors ils sont trop proches d'autres pics d'amplitude plus grande.

Les conséquences sont les suivantes : les bons pics non détectés nous privent d'une mesure et participent à la perte de précision tandis que les mauvais pics détectés seront simplement retirés du calcul après détection par norme L1. Les mesures supprimées visibles dans le tableau 9 peuvent éventuellement constituer des mauvais pics détectés.

Pour ce qui est de la reconnaissance des distances, il arrive que celle-ci ne converge pas vers la bonne solution. C'est le cas lorsque l'on n'arrive pas à valider le test du chi-deux lors de la phase 1 ou 2. L'algorithme Hongrois étant une méthode de résolution exacte, notre hypothèse est que cela dépend uniquement des coordonnées approchées utilisées pour initialiser l'algorithme *DistanceRecognition*.

Afin d'anticiper cela, nous préconisons de réaliser régulièrement une calibration des fibres de références du banc. Cela s'effectue en mesurant l'artefact avec ces fibres et en faisant la reconnaissance des distances manuellement, c'est-à-dire cacher les billes une par

une pour voir quel pic correspond à quel point. Cette calibration demande 1 à 2 heures, mais semble assez pérenne dans le temps. Il serait donc judicieux de la réaliser avant la calibration d'une série de capteurs importante ou lorsque le banc n'a pas été utilisé depuis plusieurs semaines. Cela sera aussi certainement nécessaire en cas de non convergence récurrente durant les calibrations ou si le banc, l'artefact ou les fibres de références sont déplacés.

Les coordonnées approchées des fiducielles étant aussi impliquées dans la reconnaissance de distance, il sera nécessaire de mesurer les fiducielles en cas de changement de capteur. Pour un même type de capteur, l'usinage est généralement suffisamment précis pour ne pas avoir à le faire. L'acquisition de bonnes coordonnées approchées pour les fiducielles peut se faire soit par calibration manuelle avec le banc ou au laser tracker, ou encore en CMM. Ces méthodes sont cependant longues ou coûteuses (cf. I.3). Nous conseillons donc de simplement installer le capteur à calibrer sur le banc et de mesurer les points de la tête et de l'artefact au laser tracker. Cela demande seulement quelques minutes et suffit à obtenir un résultat viable pour le banc.

Une autre cause de la présence de mauvaises mesures dans une calibration peut être l'ajout des 4 capteurs sur le banc et l'ajout d'une rotation. L'acquisition des 185 mesures en simultanés avec les 9 fibres (dont 8 de références) demande plus d'une minute. Les changements de conditions atmosphériques, la proximité de la ventilation déjà évoquée dans CALMELS (2023), et les éventuelles vibrations naturelles dans la pièce pourraient être à l'origine de ces mauvaises mesures. De plus, nous avons fait l'hypothèse que les coordonnées des capteurs de références sont exactement les mêmes entre la première position de la tête et sa position après rotation (cf. III.2.1). De légères variations de position peuvent arriver dans les 15 minutes entre les mesures en position initiale et les mesures en

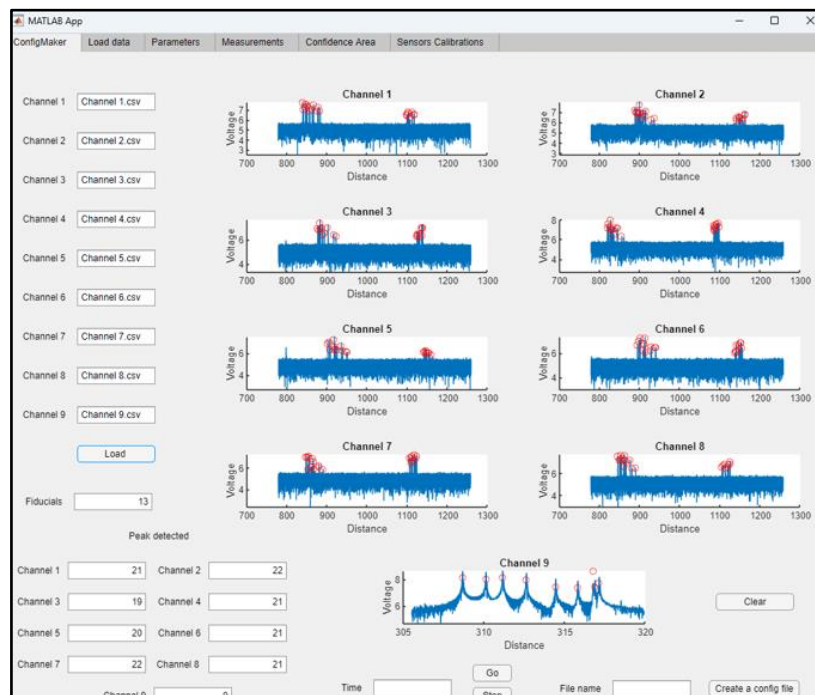


Figure 25 : Interface du programme de calibration - onglet de détection de pic et création de fichier config

seconde position. Il est donc probable que les mesures supprimées dans le tableau 9 puissent également être la conséquence de cela.

Finalement, nous avons choisi de supprimer les quelques mesures posant problème lors des calibrations pour pallier ces erreurs d'automatisation. Néanmoins, il pourrait être intéressant d'étudier plus en profondeur les différentes sources d'erreurs et d'améliorer la robustesse du processus pour le perfectionner.

Un programme MATLAB sous la forme de fichier exécutable (.mlapp) a été développé durant mon TFE. Les différentes solutions et fonctions exposées dans cette partie ont été intégrées à ce programme. Il a pour vocation de permettre au profane de pouvoir calibrer tous type de capteur optique compatible avec le banc selon une méthodologie simple. L'interface permet notamment l'affichage des signaux et des pics détectés (cf. figure 25) ainsi que de toutes les informations de calibration (cf. figure 26) : mesures, mesures retirées du calcul, correspondance entre mesures et points, résidus, précisions, fiabilité, etc.

Parameter	Value (mm)	Precision (µm)	External reliability (µm)	External Reliability measure
X capteur 8	388.7373	39.7	74.2	Sensor 3 Point fiducial 4
Y capteur 8	199.3363	44.6	45.3	Sensor 8 Point artefact 2 Position II
Z capteur 8	1013.9706	16.8	36.6	Sensor 3 Point fiducial 4
X fiducielle 1	-34.4956	7.9	53.0	Sensor 3 Point fiducial 4
Y fiducielle 1	5.3842	9.0	61.6	Sensor 3 Point fiducial 4
Z fiducielle 1	267.3568	4.2	12.1	Sensor 9 Point artefact 1
X fiducielle 2	-10.2658	8.1	7.7	Sensor 3 Point fiducial 5
Y fiducielle 2	-32.3639	9.5	13.6	Sensor 1 Point artefact 4 Position II
Z fiducielle 2	267.0421	4.1	16.3	Sensor 3 Point fiducial 4
X fiducielle 3	35.1556	8.6	6.5	Sensor 1 Point artefact 4 Position II
Y fiducielle 3	-30.0613	9.8	12.5	Sensor 1 Point artefact 4 Position II
Z fiducielle 3	266.7143	4.2	18.3	Sensor 3 Point fiducial 4
X fiducielle 4	55.6508	8.6	16.8	Sensor 3 Point fiducial 4
Y fiducielle 4	9.7726	9.1	12.4	Sensor 9 Point artefact 1
Z fiducielle 4	267.1212	4.2	19.8	Sensor 3 Point fiducial 4
X fiducielle 5	31.0344	8.4	8.9	Sensor 3 Point fiducial 4
Y fiducielle 5	47.8743	9.2	14.9	Sensor 9 Point artefact 1
Z fiducielle 5	267.2614	4.2	14.4	Sensor 3 Point fiducial 4
X fiducielle 6	-14.0309	8.3	9.2	Sensor 3 Point fiducial 4
Y fiducielle 6	45.4832	9.2	20.7	Sensor 3 Point fiducial 4
Z fiducielle 6	267.9407	4.1	7.1	Sensor 3 Point fiducial 4

Parameter	Value	Precision	External reliability	External Reliability measure
Translation en X	0.0000 mm	1.2 µm	0.7 µm	Sensor 3 Point fiducial 4
Translation en Z	0.1274 mm	1.1 µm	5.2 µm	Sensor 3 Point fiducial 4
Rotation autour de X	0.4101°	0.0009°	0.0025°	Sensor 3 Point fiducial 4
Rotation autour de Y	-0.1250°	0.0009°	0.0034°	Sensor 3 Point fiducial 4
Rotation autour de Z	180.5248°	0.0008°	0.0000°	Sensor 3 Point fiducial 4

	σX (µm)	σY (µm)	σZ (µm)
Average fiducials precision	8.3	9.3	4.2
Worst fiducial precision	8.6	9.8	4.2

Figure 26 : Interface du programme de calibration - onglet des paramètres calculés

Nous consacrerons la prochaine partie à l'évaluation et à la validation du processus automatique de calibration effectué avec le programme développé.

IV Evaluation du processus de calibration automatique

Afin de conclure sur les performances du banc et du processus automatique de calibration, nous allons effectuer plusieurs tests. Ces tests devraient permettre de valider l'efficacité de la nouvelle méthode de calibration. Nous discuterons ensuite des améliorations qui pourraient être apportées dans le futur.

IV.1 Validation du processus

Dans le cadre de la validation du processus de calibration, nous avons commencé par regarder la répétabilité de la solution obtenue. Ensuite, nous avons vérifié la justesse des calibrations automatiques en les comparant à une calibration réalisée avec une CMM.

IV.1.1 Répétabilité du processus

Nous avons estimé, dans la partie III.2.1, que le processus de calibration permet d'atteindre 10 μm de précision pour chaque coordonnée de chaque fiducielle en une trentaine de minutes. Afin de confirmer ces valeurs, nous avons réalisé un test de répétabilité. Celui-ci a consisté à calibrer la même tête FSI 10 fois pour contrôler le temps de calibration, les précisions obtenues ainsi que les coordonnées obtenues. La tête utilisée est une tête à 6 points qui avait été calibrée en CMM, de sorte que les données de ce test puissent servir dans la partie IV.1.3. Les coordonnées de la férule et des fiducielles ont été recalées dans un repère propre à la tête de sorte à faciliter les comparaisons entre les calibrations (cf. IV.1.2).

Le temps moyen de calibration obtenu pour ces 10 calibrations est d'environ 25 minutes, ce qui valide bien l'efficacité du banc en termes de vitesse. On retire, en moyenne, 8 mesures du calcul pour chaque calibration, avec deux cas extrêmes (20 mesures ou plus retirées). Nous pensons que les mesures retirées proviennent des conditions (ventilation, paramètres atmosphériques, orientation du coating, vibration) et des « mauvais pics » détectés. Nous avons ensuite regardé les coordonnées et les précisions calculées. Les résultats obtenus sont satisfaisants, la précision est cohérente avec les simulations et respecte les objectifs du tableau 2. De plus, la dispersion maximale des coordonnées est bien inférieure à plus ou moins la précision 1σ des fiducielles et la fiabilité est inférieure à 10 μm .

Cependant, la dispersion est légèrement supérieure à deux fois la précision sur la coordonnée X de la férule mais cela peut s'expliquer par un manque de fiabilité. Cela est plus inquiétant pour la coordonnée Z qui est à 5 μm . On remarque tout de même que ce résultat provient des

	Férule			Fiducielles		
	X	Y	Z	X	Y	Z
Dispersion (μm)	41	20	5	13	12	3
Précision (μm)	18	20	1	8	9	4
Fiabilité (μm)	61	71	3	9	9	5

Tableau 11 : Précisions, fiabilités et dispersions moyennes des coordonnées issues des 10 calibrations

calibrations 8 et 9, la dispersion serait inférieure à 2 μm sans les prendre en compte. On peut supposer que les conditions de ces calibrations n'ont pas correctement été prises en compte ou que ces valeurs constituent des cas extrêmes d'erreurs accidentelles. Une autre hypothèse est que le changement de repère occasionne une perte de précision. On essaiera de la quantifier et de vérifier statistiquement la justesse de ces résultats dans la partie IV.1.2.

IV.1.2 Comparaison avec une calibration en CMM

La Coordinate Measuring Machine étant considérée précise à 0.3 μm sur la mesure de coordonnée, elle constitue un bon moyen de vérifier l'exactitude des calibrations avec le banc. Néanmoins, les coordonnées n'ayant pas été mesurées dans le même repère, la comparaison ne peut pas se faire directement. Les coordonnées issues des 10 calibrations du banc et de la CMM sont donc transformées dans un repère propre à la tête calibrée.

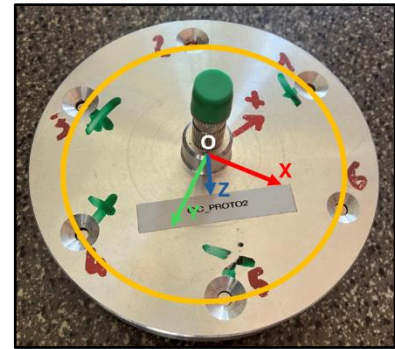


Figure 27 : Repère de la tête FSI

Le repère est défini de la sorte :

- Le centre O du cercle Γ formé par les fiducielles 1,3 et 5 sera l'origine du repère.
- L'axe Oz sera perpendiculaire au plan P de ce cercle et ira vers le positif dans la direction de la fêrue.
- L'axe Ox sera défini positivement par la direction de la fiducielle 3 vers le centre O du cercle Γ (cf. figure 27).

Pour transformer les coordonnées d'un repère dans un autre, on utilisera encore une fois l'équation 4. On calcule la matrice de rotation R et le vecteur de translation T en partant des critères mathématiques exprimés ci-dessus. Préalablement à la description du modèle mathématique, notons (X, Y, Z) les coordonnées d'un point dans le repère du banc (ou de la CMM), (X', Y', Z') seront les coordonnées de ces points dans le repère de la tête. On pourra alors exprimer le changement du repère tête vers le repère banc des coordonnées avec l'équation 9 :

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = (\vec{i}_0 \quad \vec{j}_0 \quad \vec{k}_0) * \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

Où $R = (\vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$ sont les vecteurs unitaires du repère tête et T correspond au vecteur translation. Seulement, c'est la transformation inverse qui nous intéresse. L'équation 10 permet de l'obtenir :

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = R^T * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - R^T * T \quad (10)$$

On cherche alors à calculer les vecteurs unitaires formant R et les translations (T_x, T_y, T_z) pour les injecter dans l'équation 10. On commence par le vecteur unitaire de l'axe Oz noté k_0 . Celui-ci est perpendiculaire au cercle Γ . Un vecteur w issu du produit vectoriel de deux vecteurs du cercle Γ sera également perpendiculaire à ce cercle. Il suffit alors de le normaliser pour obtenir \vec{k}_0 . Ensuite, le changement d'origine du repère correspond aux translations. On pourra donc calculer les translations en calculant les coordonnées du centre O du cercle Γ . Le centre du cercle circonscrit aux points 1, 3 et 5 est le point d'intersection des 3 médiatrices du triangle composé par ces points. De plus, il appartient au plan du cercle.

On peut alors déterminer ses coordonnées via le système présenté à l'équation 11.

$$\begin{cases} \overline{F11F13} \cdot \vec{IO} = 0 \\ \overline{F11F15} \cdot \vec{JO} = 0 \\ aT_x + bT_y + cT_z + d = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$\overline{F11F13}$ et (resp.) $\overline{F11F15}$ sont les vecteurs entre les fiducielles 1 et 3 et (resp.) les fiducielles 1 et 5. I et J correspondent au milieu des segments correspondant à ces vecteurs et a,b,c et d sont les paramètres du plan P défini par le cercle. De plus, O s'écrit $(T_x, T_y, T_z)^T$. Ce système linéaire est alors résoluble sous la forme $Ax = b$ et admet une solution unique pour x (qui correspond aux translations T que l'on cherche). On pourra ensuite obtenir \vec{i}_0 en normalisant le vecteur allant de la fiducielle 4 au point O. Enfin, le produit vectoriel entre \vec{k}_0 et \vec{i}_0 donne \vec{j}_0 . Nous avons maintenant tous les paramètres pour transformer les coordonnées de la calibration CMM et celles des 10 calibrations banc dans le repère de la tête. On peut alors étudier les écarts Δ_{ij} (équation 12) entre la $i^{\text{ème}}$ coordonnée X_{ij}^{banc} du point j, résultante de la moyenne des 10 calibrations, et la coordonnée X_{ij}^{CMM} :

$$\Delta_{ij} = X_{ij}^{banc} - X_{ij}^{CMM} \quad (12)$$

Pour analyser ces écarts, il est nécessaire de connaître la précision des coordonnées impliquées dans le calcul de Δ_{ij} . Cependant, ces précisions ont évoluées suite aux changements de repère. Il serait nécessaire d'effectuer une propagation de covariance dans

l'équation 10 que l'on exprimerait en fonction des coordonnées des points uniquement. Les formules étant difficilement manipulables analytiquement en raison du nombre important de

	Calibration banc			Calibration CMM		
	$\sigma X (\mu m)$	$\sigma Y (\mu m)$	$\sigma Z (\mu m)$	$\sigma X (\mu m)$	$\sigma Y (\mu m)$	$\sigma Z (\mu m)$
Férule	24	22	3	0.4	0.6	0.4
Fiducielle 1	16	11	0	0.5	0.3	0
Fiducielle 2	16	11	6	0.5	0.4	0.4
Fiducielle 3	5	0	0	0.2	0	0
Fiducielle 4	16	11	6	0.5	0.4	0.4
Fiducielle 5	16	10	0	0.5	0.3	0
Fiducielle 6	12	19	6	0.4	0.4	0.3

de paramètres, nous avons estimé cette propagation d'erreur avec la méthode de Monte-Carlo (cf. tableau 12). Nous avons introduit une erreur suivant une loi normale centrée d'écart-type correspondant aux précisions des coordonnées : $0.3 \mu m$ pour la CMM et les précisions issues

de la compensation par moindres carrés pour le banc (cf. tableau 11). On effectue ensuite le changement de repère pour propager l'erreur que l'on calculera ensuite. En répétant cette opération un million de fois, on obtient une estimation fiable de la précision à utiliser pour notre analyse statistique.

La coordonnée Y de la fiducielle 3 ainsi que les coordonnées Z des fiducielles 1, 3 et 5 sont à 0 car nous les avons fixées mathématiquement dans les équations vues précédemment. Nous allons maintenant pouvoir construire un test statistique. Celui-ci s'effectuera sur les valeurs Δ_{ij} (cf. tableau 13) calculées à l'équation 12. Construisons un test pour la coordonnée Z de la fiducielle 4 :

	$\Delta X (\mu m)$	$\Delta Y (\mu m)$	$\Delta Z (\mu m)$
Férule	-2.3	-9.7	6.4
Fiducielle 1	8.7	6.0	0
Fiducielle 2	3.8	1.2	1.2
Fiducielle 3	0.8	0	0
Fiducielle 4	-2.3	-0.5	-2.9
Fiducielle 5	-11.0	5.3	0
Fiducielle 6	1.5	9.7	0.4

Tableau 13 : Écart entre les coordonnées moyenne des calibrations banc et les coordonnées de la calibration CMM

On a : $\Delta_{34} = X_{34}^{banc} - X_{34}^{CMM} = -2.9 \mu m$.

On cherche à contrôler si la coordonnée calculée par le banc est la même que celle calculée par la CMM, pour valider la calibration effectuée avec le banc. On va donc faire l'hypothèse nulle suivante : $H_0 : X_{34}^{banc} = X_{34}^{CMM}$ i.e. $\Delta_{34} = 0$.

Le test est bilatéral donc l'hypothèse alternative est : $H_1 : \Delta_{34} \neq 0$.

On calcule ensuite l'écart-type de Δ_{34} :

$$\sigma_{\Delta_{34}} = \sqrt{\frac{\sigma_{34}^{banc^2}}{\sqrt{10}^2} + \sigma_{34}^{CMM^2}} = 2 \mu m \quad (13)$$

L'écart-type du banc est divisé par la racine de 10 car on propage l'erreur sur une moyenne de 10 calibrations. $\sigma_{\Delta_{34}}$ est estimé donc $\frac{\Delta_{34}}{\sigma_{\Delta_{34}}} \sim t_{\nu_{34}}$ où t est la loi de Student et ν_{34} est le degré de liberté pour deux échantillons de taille différente calculé à l'équation 14. La formule provient de HINES (2011).

$$\nu_{34} = \frac{\left(\frac{\sigma_{34}^{banc^2}}{10} + \frac{\sigma_{34}^{CMM^2}}{1}\right)^2}{\left(\frac{\sigma_{34}^{banc^2}}{10}\right)^2/11 + \left(\frac{\sigma_{34}^{CMM^2}}{1}\right)^2/2} - 2 \approx 9 \quad (14)$$

On choisit de fixer le niveau de confiance $1-\alpha$ à 95%, ce qui se traduit par l'intervalle de confiance suivant : $[-t_{\nu_{34},0.975} * \sigma_{\Delta_{34}} ; t_{\nu_{34},0.975} * \sigma_{\Delta_{34}}]$ où $t_{\nu_{34},0.975} = 2.26$. Finalement, on vérifie bien $\Delta_{34} = -2.9 \in [-4.5 ; 4.5]$, l'hypothèse H_0 est vérifiée.

Ce même test a été réalisé pour chacune des coordonnées non fixées. Les résultats sont disponibles dans le tableau 14. L'ensemble des coordonnées semble validé le test excepté la coordonnée Z de la férule. Celle-ci avait déjà été identifiée comme problématique lors du test de répétabilité (cf. IV.1.1). On a d'ailleurs remarqué que les écarts de cette coordonnée pour chaque calibration sont toujours positifs et presque toujours compris entre

3 et 7 μm . Cela pourra être la conséquence d'un systématisme. Ce systématisme pourrait venir des mesures FSI directement, de la vétusté de la fêrule ou encore de la mesure CMM. Globalement, de nombreuses autres

	$\Delta X (\mu\text{m})$	$\Delta Y (\mu\text{m})$	$\Delta Z (\mu\text{m})$
Fêrule	2.3 < 16.9	9.7 < 16.0	6.4 > 2.2
Fiducielle 1	8.7 < 11.4	6.0 < 7.6	∅
Fiducielle 2	3.8 < 11.3	1.2 < 7.7	1.1 < 4.4
Fiducielle 3	0.8 < 3.8	∅	∅
Fiducielle 4	2.3 < 11.4	0.5 < 7.9	2.9 < 4.5
Fiducielle 5	11.0 < 11.9	5.3 < 6.9	∅
Fiducielle 6	1.5 < 8.6	9.7 < 14.0	0.4 < 4.4

Tableau 14 : Résultats des test statistiques sur les écarts Δ_{ij}

raisons pourraient expliquer ces écarts au vu de leur ordre de grandeur de quelques micromètres. Il est donc difficile d'en estimer la cause. Les résultats sont tout de même optimistes et remplissent bien l'objectif de précision 1σ de 10 μm .

IV.2 Améliorations futures et pistes à explorer

Le banc de calibration FSI est maintenant viable pour des calibrations à 10 μm en moins de 30 minutes. Cependant, il y a encore beaucoup de recherche et de développement qui peuvent être mis en place pour optimiser ses performances.

Premièrement, on pourrait probablement gagner en précision en limitant les vibrations et les variations de conditions de calibration. Cela pourrait éventuellement se faire dans le cadre de la procédure Calibration, Checking and Testing (CCT) proposée par VARGA (2024), qui préconise une pièce spécifiquement pour les besoins de calibration au CERN pour le futur projet FCC. Ensuite, nous suggérons d'étudier l'algorithme zscore pour effectuer la détection de pics (cf. III.2.1). Celui-ci prend trois paramètres en entrée : un seuil, un écart-type ainsi qu'un paramètre d'influence (Stackoverflow, 2024). En prenant un écart-type (lag) égale à 100 mm, un seuil de 3 unités d'amplitude (threshold) et une influence de 1, les résultats semblent exploitables. Pour ce qui est du temps de calibration, celui-ci est contraint principalement par l'export des signaux pour la détection de pics et par le temps de mesure. Ce sont donc des contraintes inhérentes au système FSI utilisé. Une fonction permettant l'export des 9 signaux en un seul clique sur le logiciel FSI accorderait un gain d'au moins 5 minutes par calibration. En revanche, le temps de mesure ne paraît améliorable que par le développement d'un interféromètre plus performant. Enfin, nous avons pensé un grand nombre de fonctionnalités à développer dans le logiciel de calibration programmé au cours de ce TFE. Il serait particulièrement pratique de pouvoir retirer manuellement des mesures qui sembleraient critiques pour ensuite recalculer la calibration. Par ailleurs, programmer l'approche des moindres carrés par construction séquentielle permettrait un gain de quelques secondes au vu du nombre important d'itérations dans la reconnaissance des distances.

Conclusion

En conclusion, le banc d'autocalibration FSI est maintenant viable pour la calibration des capteurs FSI internes du FRAS. Il permet une calibration suffisamment performante pour atteindre une précision de 10 μm par coordonnée et tout cela dans un temps inférieur à 30 minutes. De plus, il est adaptable à toutes sortes de capteurs présentant des fiducielles d'un côté et une fêrule pour la mesure FSI de l'autre. Il devrait donc être opérationnel pour calibrer l'ensemble des capteurs FSI et des capteurs HLS pour le projet HL-LHC.

Différentes solutions ont été développées pour atteindre le résultat souhaité. La précision a été améliorée par une densification importante du réseau de distance et par l'acquisition de nouvelles billes améliorant la qualité des mesures et de leur détection. L'optimisation du temps de calibration est, quant à elle, basée sur la détection automatique des mesures par traitement du signal et sur le développement d'un algorithme de reconnaissance de distance utilisant l'algorithme de Munkres-Kuhn.

Malgré ces avancées, certaines limites persistent. Les tests de répétabilité et d'exactitude du processus de calibration ont conduit à des résultats prometteurs malgré un probable systématisme sur la coordonnée verticale de la fêrule calibrée. Les résultats rentrent tout de même dans la classe de précision souhaitée, mais il sera primordial d'étudier cette erreur pour la comprendre et la résoudre.

Par ailleurs, les futurs projets du CERN, comme le FCC, impliqueront certainement de faire face à des contraintes plus strictes et à une quantité de calibrations plus importante. Il est donc crucial de continuer à explorer des solutions pour accroître l'automatisation et les performances du processus de calibration. Cela passera notamment par un meilleur contrôle des conditions de calibration, l'utilisation de matériaux plus stables ainsi que par l'intégration de nouveaux algorithmes plus performants.

Pour finir, ce Travail de Fin d'Études a mis à l'épreuve mes compétences théoriques et techniques dans la résolution d'une problématique complexe. Faire le lien entre des disciplines variées telles que la topométrie, les statistiques, l'optique, le traitement du signal, l'optimisation combinatoire, la mécanique, la géométrie a été pour moi extrêmement formateur. Enfin, travailler en recherche et développement (R&D) a été une expérience particulièrement enrichissante et stimulante. Cela m'a permis non seulement de contribuer à des avancées scientifiques et technologiques, mais aussi de développer un esprit critique et créatif.

Bibliographie

Ouvrages

HINES W., MONTGOMERY D. C., GOLDSMAN D. M. et al., 2011, *Probabilités et statistiques pour ingénieurs*, Chenelière Education.

KLEINBERG J., TARDOS É., 2006, *Algorithm design*, Cornell University, Pearson Addison Wesley.

LOPES A., PERREY M. L., 2022, *FAQ Guide du LHC*, CERN, disponible sur : [CERN-Brochure-2022-004-Fre.pdf](#).

O’HAVER T., 2024, *Handbook of Scientific Signal Processing*, University of Maryland, disponible sur : <https://terpconnect.umd.edu/~toh/spectrum/IntroToSignalProcessing.pdf>.

PAPADIMITRIOU C. H., STEIGLITZ K., 1998, *Combinatorial Optimization : Algorithms and Complexity*, Courier Corporation.

ROSEN K. H., 2012, *Discrete Mathematics and Its Applications, Seventh Edition*, Mc Graw Hill.

SCHOPPER H., 2020, *Particle Physics Reference Library Volume 1 : Theory and Experiments*, Springer.

Articles de revues scientifiques

ATLAS Collaboration, 2012, “Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC”, *Physics Letters B*, 716(1), pp. 1-29.

CMS Collaboration, 2012, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, *Physics Letters B*, 716(1), pp. 30-61.

KUHN H. W., 1955, “The Hungarian Method for the Assignment Problem”, *Naval Research Logistics Quarterly* 2, 2(1-2), pp. 83-97.

Articles de conférences

BIEDRAWA P., BLANCO VINUELA C., CALA FRANCO C. et al., 2022, “Full Remote Alignment System for the High-Luminosity Large Hadron Collider HL-LHC”, *16th International Workshop on Accelerator Alignment*, CERN, Genève, Suisse.

COE P. A., MITRA A., GIBSON S. M. et al., 2002, “Frequency Scanning Interferometry – A versatile, high precision, multiple distance measurement technique”, *7th International Workshop on Accelerator Alignment*, Spring-8, Japon.

HERTY A., DANDEKAR M., FLEURY S. et al., 2022, “A quality assurance approach for the Full Remote Alignment System”, *16th International Workshop on Accelerator Alignment*, CERN, Genève, Suisse.

RUDE V., MAINAUD DURAND H., SOSIN M. et al., 2018, “Frequency Scanning Interferometry to monitor the position of accelerators components inside their cryostat for HL-LHC project”, *15th International Workshop on Accelerator Alignment*, CERN, Genève, Suisse.

RUDE V., HERTY A., KAUTZMANN G. et al., 2022, “3D calculation for the alignment of LHC low-beta quadrupoles”, *16th International Workshop on Accelerator Alignment*, CERN, Genève, Suisse.

Mémoires et travaux de fin d'étude

BONNEL T., 1999, *Combinaison de jeux de coordonnées de stations terrestres en norme LI*, ESGT, France.

CALMELS J., 2023, *Mise en place d'un banc de calibration pour les capteurs FSI (Frequency Scanning Interferometry)*, ESGT, France.

HERTY A., 2009, *Micron precision calibration methods for alignment sensors in particle accelerators*, Université de Nottingham Trent, Royaume-Uni.

Documentations

MAINAUD DURAND H., 2006, *Alignment requirements for the LHC low-beta triplets*, disponible sur : <https://edms.cern.ch/ui/file/344496/1.2/LHC-G-ES-0016-10-20.pdf>.

SOSIN M., MAINAUD DURAND H., RUDE V., RUTKOWSKI J., 2019, *Frequency sweeping interferometry for robust and reliable distance measurements in harsh accelerator environment*, CERN, Genève, Suisse.

VARGA M., WIESER A., 2023, *Concept for calibration, checking and testing of the geodetic equipment for the FCC*, ETH Zurich, disponible sur : <https://cernbox.cern.ch/index.php/s/DQe22rGRSJQAvOs>.

Sites internet

CERN, 2024, *The High-Luminosity Large Hadron Collider*, disponible sur : <https://home.web.cern.ch/press/2022/HL-LHC>, consulté le 28/05/2024.

Stackoverflow, 2024, *Peak signal detection in realtime timeseries data*, disponible sur : <https://stackoverflow.com/questions/22583391/peak-signal-detection-in-realtime-timeseries-data>, consulté le 10/06/2024.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du complexe d'accélérateurs du CERN (source : cern.ch)	7
Figure 2 : Schéma 3D d'un dipôle.....	7
Figure 3 : Schéma de la chaîne de composants remplacée pour le projet HiLumi	8
Figure 4 : Schéma de cavités-crabe équipées de capteurs FSI pour la surveillance interne.....	9
Figure 5 : Schéma d'un quadripôle low beta équipé du FRAS	9
Figure 6 : Photo et schéma d'une tête FSI interne et de ces fiducielles	11
Figure 7 : Schéma de principe du fonctionnement d'un interféromètre FSI (SOSIN, 2019).....	12
Figure 8 : Signal issu de la mesure de 6 billes réfléchissantes avec une même fibre	13
Figure 9 : Schéma simplifié de l'architecture de l'interféromètre FSI utilisé pour le banc de calibration (SOSIN, 2019)...	14
Figure 10 : Maquette du banc (CALMELS, 2023)	15
Figure 11 : Photo d'une tête FSI prête à être calibrée.....	15
Figure 12 : Détection de deux pics espacés de 70 μm pour une même distance (a) et son ajustement lorentzien avec une fenêtre de 0.2 mm (b)	16
Figure 13 : Configuration d'apparition des doubles pics.....	17
Figure 14 : Schéma du phénomène de réflexion de la lumière FSI sur les cônes des fiducielles	17
Figure 15 : Graphique d'un signal d'interférence issu d'une fibre de référence du banc durant une calibration	18
Figure 16 : Arbre de tous les cas possibles pour 3 pics.....	18
Figure 17 : Double pic atténué par le charbon.....	22
Figure 18 : Billes réfléchissantes avec coating 8 mm (en bas) et coating 12 mm (en haut).....	23
Figure 19 : Lignes de configuration du canal correspondant à la fêrèle du capteur calibré	24
Figure 20 : Graphe d'un signal et de la détection de ses pics.....	24
Figure 21 : Algorithme <i>PeakDetection</i> pour la détection de pics durant les calibrations.....	25
Figure 22 : Algorithme <i>DistanceRecognition</i> simplifié pour la reconnaissance des distances	29
Figure 23 : Processus de calibration automatisé pour le banc	29
Figure 24 : Exemple de "sous-pic" détecté.....	30
Figure 25 : Interface du programme de calibration - onglet de détection de pic et création de fichier config	31
Figure 26 : Interface du programme de calibration - onglet des paramètres calculés.....	32
Figure 27 : Repère de la tête FSI.....	34

Liste des tableaux

Tableau 1 : Capteurs du FRAS et leur précision (1σ) de calibration attendue pour HiLumi	10
Tableau 2 : Objectif de précision (1σ) de calibration attendue pour les FSI internes pour HiLumi (CALMELS, 2023)	11
Tableau 3 : Éventuelles causes de perte de temps et/ou de précision pour les calibrations avec le banc	18
Tableau 4 : Précisions de calibration (1σ) en simulation avec 4 capteurs sur le banc	19
Tableau 5 : Nombre de mesures avec 8 fibres de références sur le banc	20
Tableau 6 : Précisions de calibration (1σ) en simulation et en réalité avec 8 fibres sur le banc	20
Tableau 7 : Précisions de calibration (1σ) en simulation et en réalité dans deux positions.....	21
Tableau 8 : Comparaison de la fiabilité entre une calibration une position et une calibration deux positions	21
Tableau 9 : Comparaison des résultats de calibration d'une même tête avec différentes tailles de coating de bille	23
Tableau 10 : Matrice des coefficients calculés pour une reconnaissance de distance par algorithme Hongrois pour des distances références-artefact	27
Tableau 11 : Précisions, fiabilités et dispersions moyennes des coordonnées issues des 10 calibrations	33
Tableau 12 : Écart-type sur les coordonnées après changement de repère	35
Tableau 13 : Écart entre les coordonnées moyenne des calibrations banc et les coordonnées de la calibration CMM	36
Tableau 14 : Résultats des test statistiques sur les écarts Δ_{ij}	37

Automatisation du processus de calcul des calibrations des capteurs FSI (Frequency Scanning Interferometry)

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2024

RESUME

Au CERN, le projet High Luminosity LHC vise l'augmentation des collisions dans le plus grand accélérateur à particules du monde : le LHC. Ce défi nécessite un alignement des composants de l'accélérateur dans des tolérances très strictes et dans des conditions particulièrement difficiles : radioactivité, ultravide et température cryogénique. La solution envisagée est l'utilisation de capteurs optiques à balayage de fréquence appelés capteurs FSI. Cependant, environ 600 capteurs basés sur cette technologie devront être calibrés avant leur installation prévue pour 2026. Il est donc crucial d'automatiser le processus de calibration pour réduire le temps de calibration tout en atteignant la précision nécessaire au projet. Un banc de calibration basé sur cette même technologie FSI a été conçu en 2023 pour résoudre cette problématique. Néanmoins, des contraintes techniques ont limité sa précision et sa rapidité. Ce mémoire présente les solutions étudiées et développées pour rendre le banc viable malgré ces contraintes.

Mots clés : Calibration, capteur, automatisation, CERN, accélérateur, FSI, alignement, précision, topométrie, optimisation combinatoire, traitement du signal, détection de pics.

SUMMARY

At CERN, High Luminosity LHC project aims for increasing particles collisions in the world's largest accelerator : the LHC. This challenge requires precise alignment for accelerator components under particularly harsh conditions : radioactivity, ultra-high vacuum and cryogenic temperatures. The proposed solution involves using optical sensors based on frequency scanning interferometry called FSI. However, approximately 600 sensors using this technology will need to be calibrated before their scheduled installation in 2026. Automating the calibration process is crucial to reduce calibration time while reaching the precision needed for the project. A calibration bench based on the same FSI technology was conceived in 2023 to resolve this issue. Nevertheless, technical constraints have limited its precision and its speed. This thesis presents the solutions studied and developed to make the bench viable despite of these constraints

Key words : Calibration, sensor, automatization, CERN, accelerator, FSI, alignment, precision, topometry, combinatorial optimization, signal processing, peak detection.