



HAL
open science

Impact de la température et de l'humidité sur les systèmes de mesure WPS (Wire Positioning System)

Théo Savoi

► **To cite this version:**

Théo Savoi. Impact de la température et de l'humidité sur les systèmes de mesure WPS (Wire Positioning System). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03265726

HAL Id: dumas-03265726

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03265726>

Submitted on 21 Jun 2021

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 MÉTIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe

par

Théo SAVOI

**Impact de la température et de l'humidité sur les
systèmes de mesure WPS (Wire Positioning System)**

Soutenu le 9 septembre 2020

JURY

Monsieur Stéphane DURAND	Président du jury
Monsieur Vivien RUDE	Maître de stage
Monsieur José CALI	Enseignant référent

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon maître de stage, M. Vivien Rude. Il a su me partager ses connaissances et son expérience tout en faisant preuve de patience pour me guider au mieux.

Je tiens également à remercier mon enseignant référent, José Cali, pour ses conseils, mais aussi pour l'enseignement qu'il a pu me fournir lors de mes années passées à l'ESGT¹.

Merci à M. Léonard Watrelot pour sa disponibilité et ses précieux conseils sur ce sujet faisant suite à ses précédents travaux.

Toute ma gratitude aux personnes que j'ai pu côtoyer au CERN, géomètres ou non, mais qui m'ont apporté leur aide dans la réalisation de ce travail. Merci tout particulièrement à M^{me} Hélène Mainaud Durand et MM. Andreas Herty, Michael Udzik, Kamil Kucel, Bruno Perret et Kacper Widuch.

J'aimerais également avoir une pensée pour les personnes qui m'ont encouragé à me diriger vers le CERN pour mon travail de fin d'études, MM. Stéphane Durand, Thomas Touzé et Sébastien Guillaume. Merci d'ailleurs à eux de m'avoir dispensé un enseignement de qualité que ce soit à l'ESGT ou à l'HEIG-VD².

Enfin, un dernier merci à toutes les personnes qui m'ont soutenu durant ces études.

¹École supérieure des géomètres et topographes (Le Mans, France)

²Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud (Yverdon-les-Bains, Suisse)

Liste des abréviations

ALICE	<i>A Large Ion Collider Experiment</i> , expérience sur un grand collisionneur d'ions
ATLAS	<i>A Toroidal LHC ApparatuS</i> , dispositif instrumental toroïdal pour le LHC
CERN	Organisation européenne pour la recherche nucléaire
CLIC	<i>Compact Linear Collider</i> , accélérateur compact linéaire
CMS	<i>Compact Muon Solenoid</i> , solénoïde compact pour muons
HPA	<i>High Precise Alignment Technologies</i> , technologies pour des alignements de haute précision
HR	Humidité relative
LHC	<i>Large Hadron Collider</i> , grand collisionneur de hadrons
LHCb	<i>Large Hadron Collider Beauty</i> , expérience du LHC sur le quark beauté
PEES	polyétheréthercétone
PES	polyéthersulfone
ppm	partie par million
SMM	<i>Survey, Mechatronics and Measurements</i> , géomatique, mécatronique et mesures
TeV	téraélectronvolt
WPS	<i>Wire Positioning System</i> , système de positionnement par fil

Glossaire

Accélérateur de particules	Installation permettant l'accélération de particules de charges non nulles. L'accélération est réalisée à l'aide de cavités radiofréquence. Le contrôle de la trajectoire se fait grâce à des aimants.
Capacité	Quantité d'électricité qu'un accumulateur peut restituer à la décharge. L'unité SI de la capacité est le farad.
Chaînette	Courbe que forme une chaîne inextensible dont les deux extrémités sont fixées en deux points horizontaux de distance inférieure à la longueur de la chaîne, celle-ci étant alors soumise à la pesanteur. Son équation est $y(x) = a \times \cosh\left(\frac{x}{a}\right)$.
Électron	Particule fondamentale portant l'unité naturelle de charge électrique et appartenant à la classe des leptons.
Électron-volt	Unité d'énergie égale à l'énergie cinétique acquise par un électron soumis à une différence de potentiel de 1 volt.
Isostatique	Se dit d'un système matériel dont les liaisons mécaniques (notamment les réactions d'appui) peuvent être caractérisées par la statique : le nombre d'inconnues de liaison est égal au nombre d'équations données par le principe d'équilibre de la statique. Le système est alors sans contrainte excessive.
Machine à mesurer tridimensionnelle	Machine utilisée en métrologie dimensionnelle permettant d'obtenir les coordonnées des points mesurés par palpation d'une pièce mécanique.
Positron	Lepton de charge positive, antiparticule de l'électron.

Table des matières

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES ABREVIATIONS	3
GLOSSAIRE	4
TABLE DES MATIERES	5
INTRODUCTION	6
I CONTEXTE DE L'ETUDE	8
I.1 ACCELERATEUR DE SCIENCE	8
I.1.1 Organisation européenne pour la recherche nucléaire	8
I.1.2 Accélérateurs de particules et expériences	8
I.2 LE PROJET CLIC	9
I.3 LE SYSTEME WPS	11
I.3.1 Composantes du système	11
I.3.2 Principe de fonctionnement	13
I.3.3 Le système de centrage et les étalonnages	14
I.3.3.1 Le système de centrage	14
I.3.3.2 Les étalonnages	16
II INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES CONDITIONNEURS	18
II.1 ÉTAT DE L'ART	18
II.2 DEMARCHE EXPERIMENTALE	19
II.3 TRAITEMENT DES DONNEES	22
II.3.1 Calcul des polynômes	22
II.3.2 Comparaison des polynômes	23
II.3.3 Correction des paramètres environnementaux de l'air ambiant	24
II.4 RESULTATS	27
III INFLUENCE DE LA TEMPERATURE ET DE L'HUMIDITE SUR LES CAPTEURS	31
III.1 ÉTAT DE L'ART	31
III.2 CONCEPTION DU BANC	32
III.2.1 Renforcement du banc	32
III.2.2 Mise en place d'une solution alternative	34
III.3 DEMARCHE EXPERIMENTALE	35
III.4 SIMULATIONS	39
III.4.1 Calculs des observations simulées	39
III.4.2 Calcul des paramètres	41
III.5 TRAITEMENT DES DONNEES	46
III.6 RESULTATS	48
III.6.1 Analyse des résidus	48
III.6.2 Paramètres déterminés	49
III.6.3 Perspectives et tests à réaliser	51
CONCLUSION	54
BIBLIOGRAPHIE	55
TABLE DES ANNEXES	56
LISTE DES FIGURES	61
LISTE DES TABLEAUX	63

Introduction

L'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, le CERN, est l'un des plus grands laboratoires de recherche scientifique au monde. Il se concentre principalement sur l'étude des particules fondamentales, les plus petits composants de la matière.

Afin d'augmenter considérablement les probabilités de résultat des expériences, chaque composant des accélérateurs de particules doit être aligné avec la plus grande précision. Les équipes des géomètres du CERN ont ainsi pour mission d'assurer l'alignement des différents éléments des accélérateurs et des détecteurs.

Outre la maintenance nécessaire au bon fonctionnement des accélérateurs actuels, le CERN travaille à imaginer de nouveaux accélérateurs qui permettront d'étudier certaines particules de manière plus approfondie. Ces projets comme le *Compact Linear Collider* (CLIC) — collisionneur linéaire compact — ou le *Future Circular Collider* (FCC) — futur collisionneur circulaire — font l'objet de travaux de recherche afin de développer de nouvelles techniques ou de connaître leur faisabilité.

Différentes méthodes permettent de garantir ces alignements. L'une des méthodes offrant un alignement des plus fins consiste à utiliser un fil tendu comme référence. Le fil tendu représente une droite dans un plan horizontal et une chaînette dans le plan vertical. Ces représentations mathématiques simples permettent d'être utilisées comme référence pour l'utilisation de capteurs de positionnement. Les capteurs WPS (*Wire Positioning System*) mesurent leur position transversale et verticale par rapport à ce fil à des résolutions submicrométriques grâce à un principe capacitif.

Étalonnés dans un premier temps à 20°C, ces capteurs pourraient être utilisés dans le CLIC à des températures de 40°C avec des taux d'humidité variables. Le budget d'erreur d'alignement recherché dans le cadre du CLIC étant très petit, la température et l'humidité deviennent des paramètres à prendre en compte. Le présent travail a pour objectif de poursuivre les études déjà commencées afin de déterminer quels sont les impacts de la température et de l'humidité sur le système WPS. Il permettra d'améliorer la connaissance du système afin de répondre aux mieux aux besoins des différents projets.

Afin d'approfondir la connaissance de ce système, nous resituerons tout d'abord cette étude dans son contexte. Cette première partie permettra une présentation du CERN et des projets d'accélérateurs. Nous y aborderons également le fonctionnement du système WPS et son utilisation. La deuxième partie sera ensuite consacrée à la confirmation des résultats antérieurement obtenus sur les effets de la température sur les conditionneurs WPS. Au travers de ces tests, nous tenterons d'obtenir une première approximation des impacts de la température et de l'humidité sur les capteurs WPS. Nous terminerons par une dernière partie consacrée directement à l'étude des impacts de l'humidité et de la température sur les capteurs WPS grâce à une série de tests en chambre climatique.

I Contexte de l'étude

I.1 Accélérateur de science

I.1.1 Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Le CERN a vu le jour en 1954 autour d'une volonté de relancer la recherche européenne en physique au sortir de la Seconde Guerre mondiale. Sur l'impulsion de Louis de Broglie, le Conseil européen pour la recherche nucléaire, qui donnera son acronyme à l'Organisation, est créé en 1951 pour établir la convention liant les douze états membres fondateurs qui fixe la philosophie du CERN : « l'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles »³. Aujourd'hui, le CERN est dirigé par vingt-trois états membres et embauche 2 500 personnes à la frontière franco-suisse. Mais ce sont aussi plus de 17 500 personnes venant du monde entier qui contribuent à cette exploration de l'inconnu.

Depuis sa création, l'activité principale de cette organisation internationale est la recherche en physique fondamentale afin de mieux comprendre le fonctionnement de notre univers et de quoi il est fait. En parallèle des fructueux résultats obtenus dans ce domaine comme la découverte du Boson de Higgs en 2012, l'élaboration des techniques nécessaires à leur obtention ont permis de nombreuses avancées dans d'autres domaines, comme l'invention du *World Wide Web* en 1989. Cette recherche est permise grâce à un ensemble de machines composées de technologies de pointe : les accélérateurs et les détecteurs.

I.1.2 Accélérateurs de particules et expériences

Le complexe des accélérateurs de particules du CERN est le plus grand au monde et permet d'amener des faisceaux de particules à 99.999 999 1 % de la vitesse de la lumière avec des énergies allant jusqu'à 6.5 TeV à partir d'une simple bouteille d'hydrogène gazeux. Avec pas moins de huit accélérateurs et deux décélérateurs, les particules sont amenées jusqu'à divers détecteurs où elles rentrent en collision avec d'autres particules ou avec

³Extrait de la convention créant l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire.

une cible. Ces collisions permettent d'engendrer des énergies jusqu'à 14 TeV. Ces « expériences » enregistrent et identifient les particules et leur trajectoire à partir de cette collision. C'est lors de ces collisions, dont le nombre est caractérisé par la luminosité de l'accélérateur, que les particules se brisent en particules encore plus petites et livrent leurs secrets.

L'accélérateur le plus connu reste le *Large Hadron Collider* (LHC) — grand collisionneur de hadrons — qui forme un anneau de 27 kilomètres de long à une profondeur moyenne de 100 mètres. Avec ses milliers d'aimants supraconducteurs, il est l'accélérateur de particules le plus grand et le plus puissant au monde. Le LHC permet de collisionner des particules en quatre points, quatre « expériences » : ATLAS, CMS, ALICE et LHCb. Chaque collision engendrée « revient à lancer deux aiguilles éloignées de 10 kilomètres, l'une contre l'autre » (1) compte tenu de la toute petite taille des particules. C'est dans ce contexte que l'alignement des aimants de part et d'autre de chaque expérience est primordial, pour augmenter les chances de collision.

Pour cela, la section *High Precision Alignment Technologies* (HPA) — technologies pour des alignements de haute précision — du groupe *Survey, Mechatronics and Measurements* (SMM) — géomatique, mécatronique et mesures — a mis en place différentes méthodes pour assurer l'alignement des aimants sur les quelques dizaines de mètres précédant chaque détecteur. Cette section réunit une quinzaine de personnes de champs de compétences variés. On y retrouve des géomètres, de mécaniciens, des informaticiens, des électroniciens qui permettent de développer les outils et techniques nécessaires pour atteindre les incertitudes de mesure recherchées de l'ordre d'une dizaine de micromètres. La section utilise principalement des capteurs et non pas les matériels topographiques classiques. Ces capteurs utilisent des principes capacitifs pour mesurer des distances par rapport à un élément de référence comme un fil tendu ou une surface d'eau (2). D'autres dispositifs sont en développement constant, en utilisant l'interférométrie par exemple.

I.2 Le projet CLIC

Le *Compact Linear Collider* (CLIC) — collisionneur linéaire compact — est un projet d'accélérateur de particules linéaire (voir la FIG. 1). Avec l'objectif de faire collisionner des électrons et des positons, son exploitation est prévue en trois phases.

Chacune de celles-ci permettra d'augmenter la longueur de l'accélérateur, initialement de 11 kilomètres jusqu'à 50 kilomètres, et donc d'augmenter les énergies de collision. Si le projet se confirmait, les premiers faisceaux devraient être obtenus à partir de 2035.

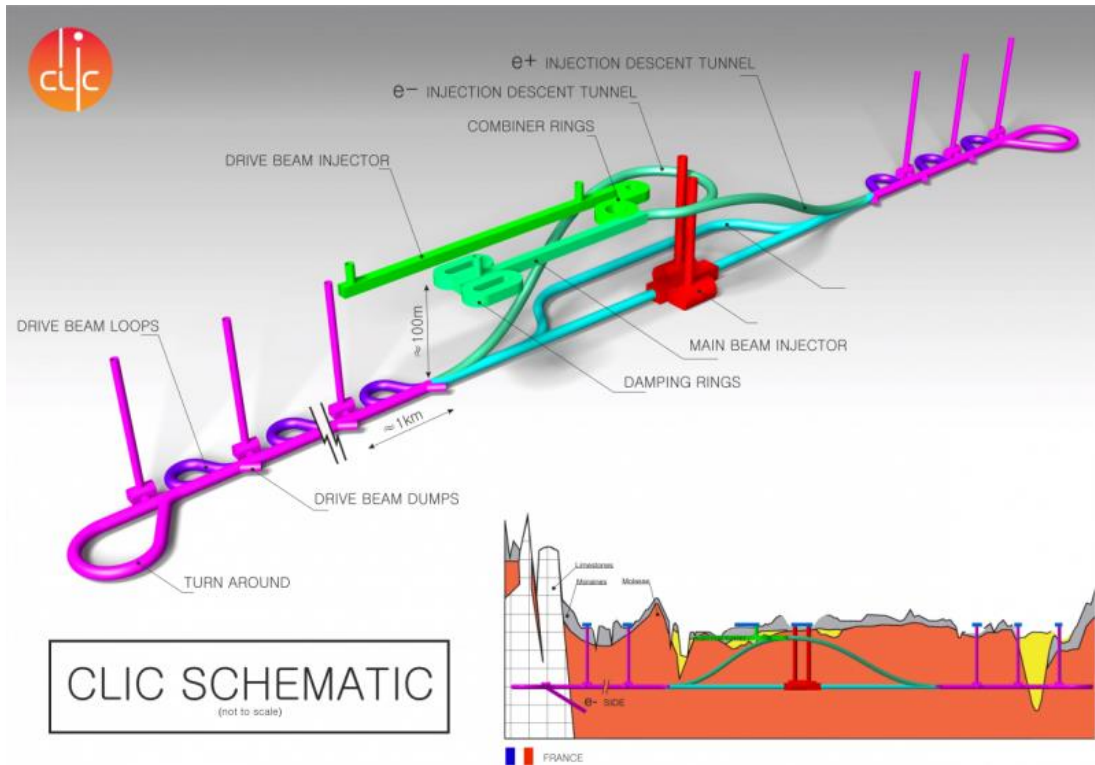


FIG. 1 — Représentation schématique du CLIC (3)

Les modules de cet accélérateur devront être alignés en respectant un budget total d'erreur compris dans un cylindre de 14 micromètres de rayon sur une fenêtre glissante de 200 mètres (voir la FIG. 2). Jusqu'à présent, l'alignement de composants d'accélérateur, lourds de plusieurs centaines de kilogrammes, n'avait jamais été contraint à une si petite tolérance. Heureusement, les capteurs actuels ou en cours de conception permettent d'atteindre des tolérances du même ordre de grandeur.

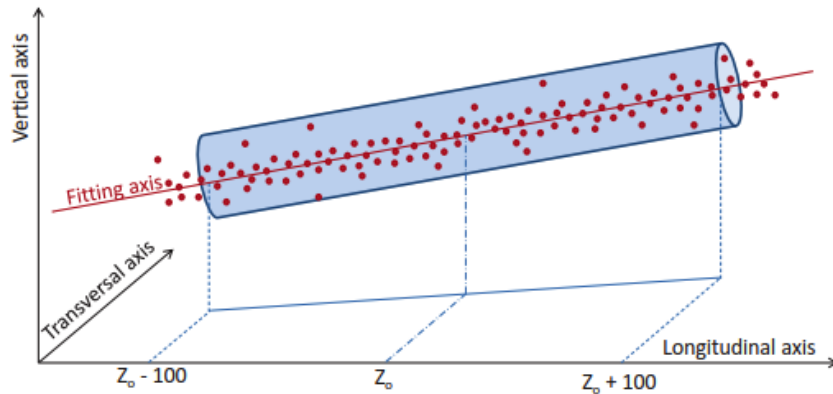


FIG. 2 — Représentation du budget d'erreur pour l'alignement des composants du CLIC (4)

En plus de cette contrainte d'alignement, le CLIC ne sera pas refroidi, contrairement au LHC dont les éléments sont à des températures de quelques kelvins. Ainsi, lors du fonctionnement de la machine et de la présence d'un faisceau de particules, la température dans l'environnement des capteurs pourrait augmenter d'une vingtaine de degrés Celsius. À cela s'ajoute aussi l'influence du rayonnement radioactif émis par le faisceau. Les mesures d'alignement réalisées vont ainsi être impactées par plusieurs variations de paramètres qu'il va falloir corriger pour garantir la tolérance demandée.

I.3 Le système WPS

I.3.1 Composantes du système

Le *Wire Positioning System* (WPS) — système de positionnement par fil — est un système de mesure écartométrique biaxial. Il permet de mesurer des déplacements selon deux axes orthogonaux par rapport à une référence matérialisée par un fil tendu. Cette référence est assimilable à une ligne droite pour les déplacements transversaux et à une chaînette pour les déplacements verticaux.

Ce système réunit plusieurs éléments :

- Le capteur, composé de quatre électrodes, est un élément passif du système (voir la FIG. 3). Il n'embarque aucune électronique, ce qui lui permet d'être soumis à de forts rayonnements radioactifs ;
- Le conditionneur (voir la FIG. 4), associé à un capteur, régulièrement appelé « électronique » au sein de la section HPA. Il s'agit d'un circuit électronique

qui transforme le signal acquis auprès du capteur vers une grandeur (ici une tension) pouvant être acquise par le système d'acquisition de données. Cet élément, du fait de ses composants électroniques, est plus sensible aux radiations et doit être éloigné au maximum des sources de rayonnement ;

- Les câbles, qui relient le capteur à son conditionneur. Ce sont eux qui permettent d'éloigner les conditionneurs des sources de rayonnement. Afin de limiter l'impact du champ électromagnétique induit (5), ils sont torsadés et blindés. L'influence de la température sur ces câbles et les mesures qui en résultent ont été étudiées en 2019 pour des longueurs de câble allant jusqu'à cent mètres avec des résultats plutôt satisfaisants (6) ;
- Le fil, qui forme la référence linéaire pour la mesure du déplacement. De nombreux types de fil ont pu être testés par le CERN. Aujourd'hui, les fils utilisés sont multibrins, en Carbone-Kevlar, Carbone-PEEK, Carbone PES ou Vectran argenté. Du fil métallique (Cuivre-Béryllium) peut parfois être aussi utilisé ;
- Le système de tension du fil, qui permet de minimiser l'erreur de chaînette qui s'applique sur un fil tendu. Il peut être composé d'un poids, d'un ressort ou d'un système à bras de levier. De nombreux travaux ont abordé la modélisation de cette erreur de chaînette (7) (8) (9) ;
- Le système d'acquisition de données qui convertit la tension en sortie de l'électronique vers un signal numérique envoyé vers un serveur. Il permet également l'alimentation du conditionneur.



FIG. 3 — À gauche, capteur WPS Fogale Nanotech fermé. Au centre, partie inférieure du capteur ouvert où l'on distingue les deux électrodes de couleur or. À droite, vue schématique en coupe d'un capteur.



FIG. 4 — Conditionneur de marque Fogale Nanotech. Le circuit électronique est placé dans un boîtier hermétique. Le capteur est relié par une paire de câbles et le conditionneur est relié au système d’acquisition par un unique câble.

Le système actuellement utilisé, développé et commercialisé par Fogale Nanotech, offre une étendue de mesure d’environ 10 millimètres avec une justesse de 5 micromètres après étalonnage d’après Rude (10). Un nouveau système est en cours de conception au sein du CERN. Il permettra d’augmenter la course du capteur grâce à sa forme cylindrique.

Le CERN dispose également d’un autre type de capteur WPS basé sur une technologie optique (appelé oWPS, en opposition aux capteurs capacitifs cWPS). Les dispositifs optiques étant plus sensibles aux rayonnements, ces capteurs ne conviennent pas pour le projet CLIC et ne seront pas étudiés dans ce mémoire.

I.3.2 Principe de fonctionnement

Les capteurs WPS sont des composants passifs composés de quatre électrodes orthogonales. Ils fonctionnent en utilisant le principe capacitif en formant un condensateur plan avec une électrode et le fil conducteur (voir la FIG. 5). On se retrouve donc avec quatre condensateurs plans : deux selon l’axe radial, deux selon l’axe vertical. Ces paires permettent de contrôler la mesure faite et de réduire le bruit lors de la transformation du signal par le conditionneur.

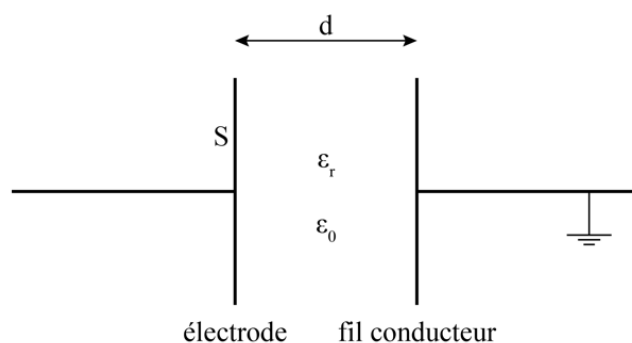


FIG. 5 — Schéma de principe du fonctionnement d'un condensateur plan

Le conditionneur du capteur permet d'obtenir en sortie deux valeurs en volt. Chaque position du fil entre les électrodes correspond à un couple de tension. Ces valeurs peuvent ensuite être converties en millimètres grâce à un polynôme. Bien que nous ne connaissions pas quelles sont les équations utilisées au sein du conditionneur, nous pouvons citer l'équation [1] d'un condensateur plan.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d} \quad \text{et} \quad Q = C \cdot U \quad [1]$$

- Avec
- C : capacité du condensateur [F]
 - ε_0 : permittivité du vide [F/m]
 - ε_r : permittivité relative entre l'électrode et le fil [F/m]
 - S : surface de l'électrode [m^2]
 - d : distance entre l'électrode et le fil [m]
 - Q : charge stockée sur la borne positive du condensateur [C]
 - U : tensions aux bornes du condensateur [V]

I.3.3 Le système de centrage et les étalonnages

Avant de pouvoir être utilisé pour positionner un élément de l'accélérateur, chaque capteur doit être installé sur un système de centrage et doit faire l'objet d'un processus d'étalonnage.

I.3.3.1 Le système de centrage

Le CERN a imaginé un système de centrage forcé isostatique, décrit par Touzé (7), afin de connaître parfaitement la transformation du repère biaxial du capteur vers celui du

support sur lequel il est positionné, un aimant de l'accélérateur par exemple. Du côté du capteur, une interface en aluminium ou en acier inoxydable est usinée d'un cône, d'un chanfrein et d'un plan. Elle vient se reposer sur l'interface côté support (voir la FIG. 6), plus précisément sur trois billes en céramique permettant également l'isolation électrique du capteur. Cette solution est basée sur le système trait-point-plan (7) (11) :

- Le point est formé par une bille venant se loger dans le cône. Cela fixe les trois translations ;
- Le trait correspond à la bille venant se loger dans le chanfrein qui a été usiné selon un axe passant par le point. Seule la rotation selon l'axe point-trait est permise à présent ;
- Le plan vient bloquer le dernier degré de liberté en reposant sur la dernière bille.

La répétabilité de repositionnement de ce système est de ± 1 micromètre.

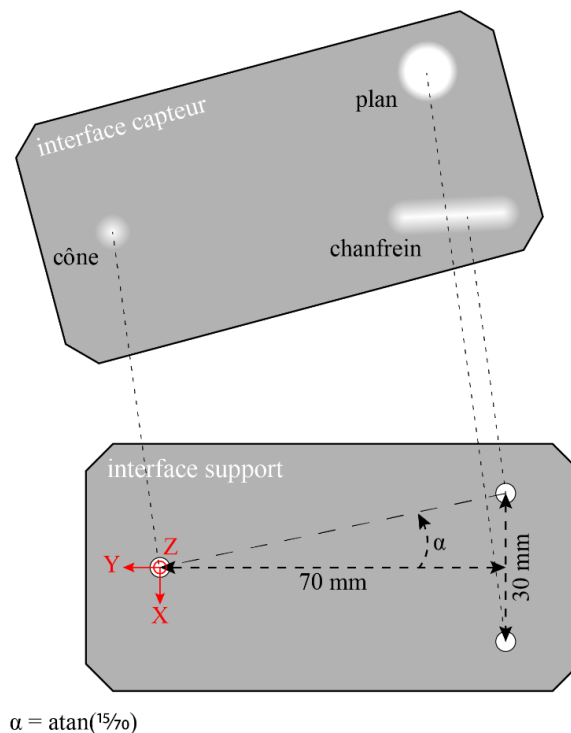


FIG. 6 — Schéma du système de centrage

1.3.3.2 Les étalonnages

Une fois équipés de leur interface, deux types d'étalonnages sont ensuite réalisés sur les capteurs : un étalonnage relatif et un étalonnage absolu. Ces étalonnages sont réalisés sur des bancs spécifiques.

L'étalonnage relatif permet de déterminer une fonction pour transformer les mesures de tension vers des valeurs de déplacements en millimètres. Grâce à une table à déplacement d'une résolution de 20 nanomètres, les données en volt sont enregistrées pour cent-vingt-et-une positions connues en millimètres. A partir de ces données, deux polynômes du cinquième degré (12) sont calculés selon les deux axes transversal et vertical, permettant la transformation des mesures de tension en déplacements. Ils sont donnés par l'équation [2].

$$\begin{aligned}
 X_{[mm]} &= \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 a_{ij} \cdot X_{[Volt]}^i \cdot Z_{[Volt]}^j \\
 Z_{[mm]} &= \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 b_{ij} \cdot X_{[Volt]}^i \cdot Z_{[Volt]}^j
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Le calcul des paramètres de ces polynômes se fait avec la méthode des moindres carrés, mais mérite une attention toute particulière lors de l'inversion de la matrice normale, presque singulière, comme souligné par Watrelot (6). Lors des calculs effectués dans le langage de programmation Matlab, la fonction « mldivide » est utilisée pour déterminer la solution d'un système linéaire selon un arbre décisionnel et plusieurs méthodes de calcul. Cette fonction permet d'obtenir de meilleurs résidus qu'en procédant à la décomposition de la matrice avec des méthodes telles que la décomposition QR, la décomposition LU ou la factorisation de Cholesky.

Nous utiliserons les deux polynômes donnés par l'équation [3] plutôt que les deux polynômes vus précédemment. Le nombre de coefficients (n = 36) est conservé, mais ces polynômes semblent plus adaptés pour retranscrire la transformation des lectures puisque des résidus plus faibles ont été observés avec ceux-ci.

$$\begin{aligned}
 X_{[mm]} &= \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^{7-i} a_{ij} \cdot X_{[Volt]}^i \cdot Z_{[Volt]}^j \\
 Z_{[mm]} &= \sum_{i=0}^7 \sum_{j=0}^{7-i} b_{ij} \cdot X_{[Volt]}^i \cdot Z_{[Volt]}^j
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Une fois l'étalonnage relatif effectué, l'étalonnage absolu permet la détermination de la transformation du repère biaxial du capteur au repère du système de centrage trois billes. Le banc d'étalonnage absolu (7) permet de calculer deux translations permettant d'effectuer cette transformation comme le décrit Rude (11). Le capteur est placé successivement sur quatre positions (voir la FIG. 7) et permet d'obtenir huit observations par rapport à un fil considéré immobile. Ces observations permettent de calculer la translation transversale et la translation verticale grâce à un script utilisant la méthode des moindres carrés non linéaires.

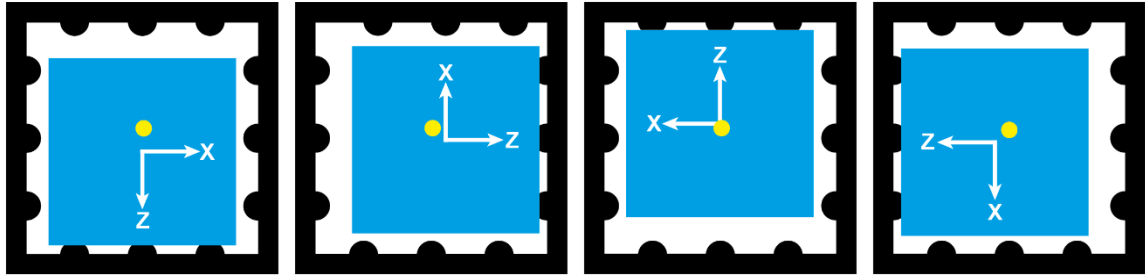


FIG. 7 — Vue en coupe des quatre positions successives du capteur (en bleu) sur le banc d'étalonnage absolu. Le point jaune correspond au fil considéré immobile.

L'étude de l'influence de la température sur les électroniques fait intervenir directement le processus d'étalonnage relatif puisque nous chercherons à comparer les polynômes calculés lors des étalonnages à différentes températures de l'électronique.

II Influence de la température sur les conditionneurs

II.1 État de l'art

Dans le cadre de l'étude du projet CLIC, une première approche a été nécessaire afin d'évaluer l'influence des variations de température sur les systèmes WPS. En 2019, un premier travail de fin d'études a été réalisé par Watrelot (6). Trois conditionneurs du fabricant Fogale Nanotech (numéros W2D-7E1-015, W2D-7E1-016 et W2D-7E1-017) ont été testés durant cette étude. Ces éléments ont été testés à des températures comprises entre 20°C et 40°C, par paliers de 5°C.

Afin de ne pas biaiser les observations réalisées, elles ont été corrigées des variations de température et d'humidité au niveau du capteur. Ces variations sont modélisées par des plans (polynômes du premier degré) sur la base des observations faites à une température du conditionneur de 20°C.

Les résultats obtenus prennent la forme de deux translations et deux facteurs d'échelles selon les deux axes d'un capteur WPS (voir la FIG. 8). À l'observation de ces résultats, il a été noté que les trois conditionneurs étudiés semblaient présenter le même comportement à part pour un des systèmes WPS ayant une translation selon l'axe X d'allure différente. L'hypothèse émise par Watrelot (6) pour expliquer ceci est la différence des résistances et condensateurs utilisés dans chaque conditionneur.

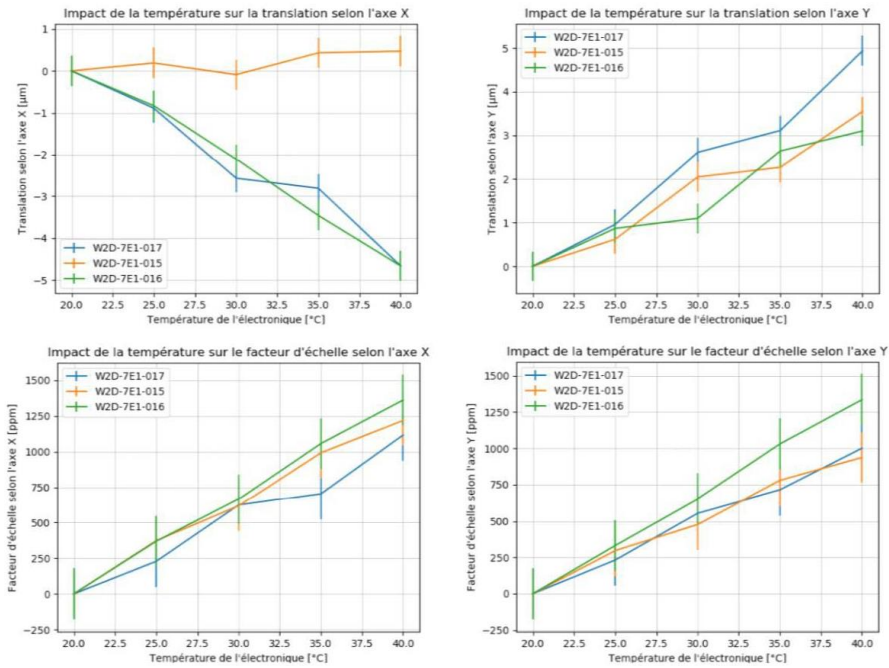


FIG. 8 — Translations et facteurs d'échelles en fonction de la température du conditionneur observés en 2019 (6)

II.2 Démarche expérimentale

Les essais réalisés cette année ont eu pour objectifs de déduire l'impact de l'humidité et de la température sur les capteurs WPS au travers des variations des conditions de la pièce tout en confirmant les résultats obtenus par Watrelot (6). Une longue période d'essai s'est déroulée sur le conditionneur W2D-7E1-016, déjà testé en 2019, afin de comparer les résultats obtenus qui devraient être identiques. Faute de temps sur site, d'autres conditionneurs n'ont pas pu être testés cette année.

La démarche utilisée pour ces expériences a été sensiblement la même que celle utilisée par Watrelot (6), c'est-à-dire une chambre thermique où la température peut être contrôlée et un banc d'étalonnage relatif avec une table motorisée installée dans une pièce close. Toutefois, il ne s'agissait pas du même banc d'étalonnage ni de la même chambre thermique qu'en 2019. Un ensemble de sondes de température et d'humidité a complété le dispositif en permettant un enregistrement des variations au sein de la chambre thermique et de l'environnement du banc. Le conditionneur étudié était placé dans la chambre thermique tandis que son capteur WPS associé était installé sur la table motorisée du banc d'étalonnage relatif (voir les FIG. 9 et la FIG. 10). Deux capteurs WPS de référence, étalonnés au préalable, avec leur conditionneur à température ambiante, étaient également présents sur le banc pour enregistrer les déplacements du fils de part et d'autre du capteur étudié.

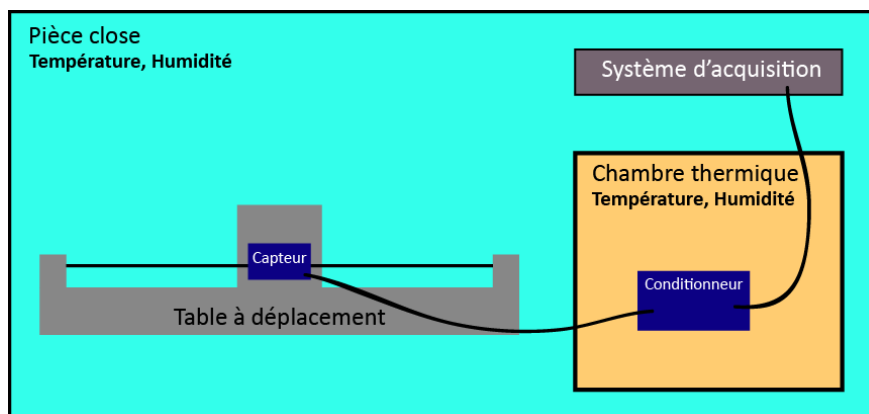


FIG. 9 — Schéma d'installation du dispositif expérimental utilisé. La température et l'humidité sont différentes dans la pièce et dans la chambre thermique.

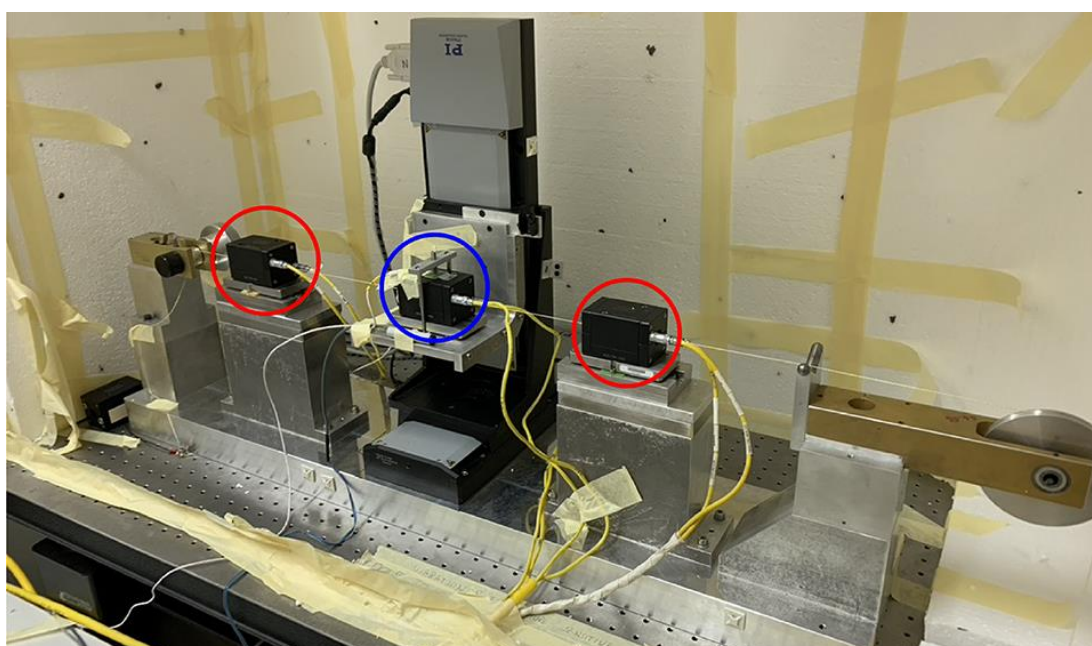


FIG. 10 — Banc d'étalonnage relatif du dispositif d'étude des conditionneurs. Le capteur en cours d'étalonnage (entouré en bleu) est placé sur la table à déplacement et les capteurs de référence (entourés en rouge) sont situés de part et d'autre sur des supports fixes. Le fil traverse les capteurs et est tendu par un poids sous la poulie.

Tandis que la température de la chambre thermique contenant le conditionneur (voir la FIG. 11) était modifiée toutes les six heures par paliers de 5°C , des étalonnages relatifs sont réalisés en continu afin d'obtenir les coefficients du polynôme de passage des volts aux millimètres. Chaque étalonnage prenant environ 12 minutes à se réaliser, de nombreuses données ont été acquises pour chaque palier de température (voir la FIG. 12). Le dispositif surveillait également la température et l'humidité de l'air ambiant au niveau du capteur en cours d'étalonnage. Ces observations supplémentaires seront utilisées lors du traitement des données afin de corriger leur influence sur les mesures de déplacements comme expliqué ci-après.



FIG. 11 — Chambre thermique dans laquelle est placé le conditionneur testé (encadré en bleu)

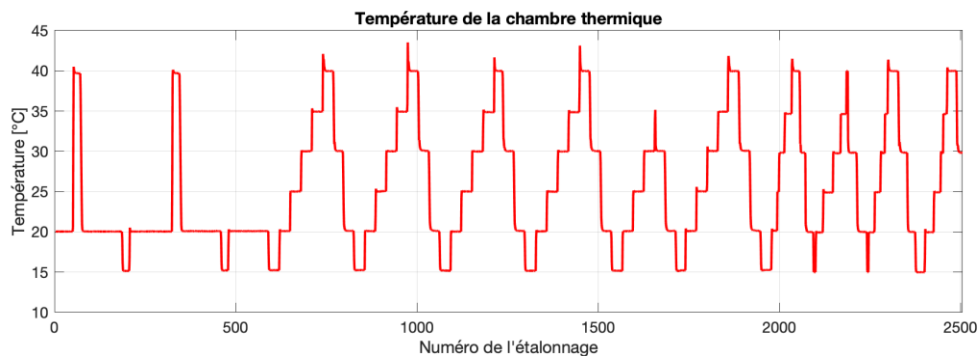


FIG. 12 — Évolution de la température de la chambre thermique en fonction du numéro de l'étalonnage lors du test de l'électronique W2D-7E1-016

Ces données peuvent être mises en relation par l'hypothèse suivante. À une température et humidité données dans la pièce ainsi que dans la chambre, les résultats de l'étalonnage devraient être identiques. Les différences observées entre les étalonnages durant l'expérience peuvent provenir des variations de température et d'humidité dans la pièce ou la chambre thermique, de la position du fil ou de l'impact de la température sur la table à déplacement. La température dans la chambre étant contrôlée, l'effet de l'humidité étant considéré négligeable sur le conditionneur et les changements de position du fil pouvant être corrigés, seules la température et l'humidité de la pièce peuvent justifier des

différences entre les étalonnages. Un modèle peut donc être déduit afin de quantifier l'impact de l'humidité et de la température sur le capteur situé dans la pièce.

II.3 Traitement des données

Cette expérience a pu être lancée juste avant le confinement imposé par une maladie à coronavirus. Le dispositif permettant un contrôle à distance de la température de la chambre thermique et la récupération des données, leur analyse a pu être réalisée au fur et à mesure. Près de 3000 données d'étalonnages ont été récoltées sur cette période. Malheureusement, plusieurs problèmes sont apparus sur ces données et il a fallu attendre la fin du confinement pour pouvoir effectuer quelques modifications sur le dispositif⁴. Une fois ces modifications réalisées, la nouvelle série de données acquise contenant environ 2500 étalonnages a permis d'obtenir des résultats plus satisfaisants en suivant différentes étapes de traitement.

II.3.1 Calcul des polynômes

Dans un premier temps, chaque donnée d'étalonnage acquise a permis de calculer les coefficients des polynômes de passage des lectures en volts aux lectures en millimètres. Ce calcul est réalisé avec la méthode des moindres carrés linéaires à partir de l'équation [3].

De plus, pour chaque polynôme calculé, la température de la chambre thermique et la température et l'humidité de l'air ambiant à proximité du capteur sont connues. La position du fil est aussi enregistrée grâce aux lectures des capteurs de référence. Ces dernières n'auront servi qu'à contrôler que le fil n'a pas subi de grand déplacement durant l'expérience compte tenu de leur corrélation avec la température et l'humidité de l'air ambiant⁵ et n'interviendra pas dans le calcul. C'est pourquoi nous ne chercherons pas à corriger l'influence de la température et de l'humidité sur ces capteurs de référence et que leurs conditionneurs sont placés à température ambiante.

⁴Voir l'annexe 1.

⁵Voir l'annexe 2.

II.3.2 Comparaison des polynômes

Théoriquement, si le capteur était dans un environnement sans aucune variation de température ni d'humidité, il existerait un unique polynôme de passage des volts aux millimètres pour chaque température du conditionneur. Les impacts de la température du conditionneur sur les mesures peuvent donc être déterminés par comparaison de ces polynômes entre eux. La simple comparaison des 36 paramètres des polynômes donnant peu de possibilités d'analyse, une grille régulière est calculée pour chaque polynôme. Cette grille a été calculée pour des tensions arbitraires comprises entre les positions [2 V, 2 V] et [8 V, 8 V] avec un pas de 1 volt (voir la FIG. 13). Ces grilles comportent chacune 49 positions exprimées en millimètres et ont donc pu être comparées au travers d'une transformation (voir la FIG. 14) composée d'une translation et d'un facteur d'échelle pour chacune des composantes du capteur selon l'équation [4].

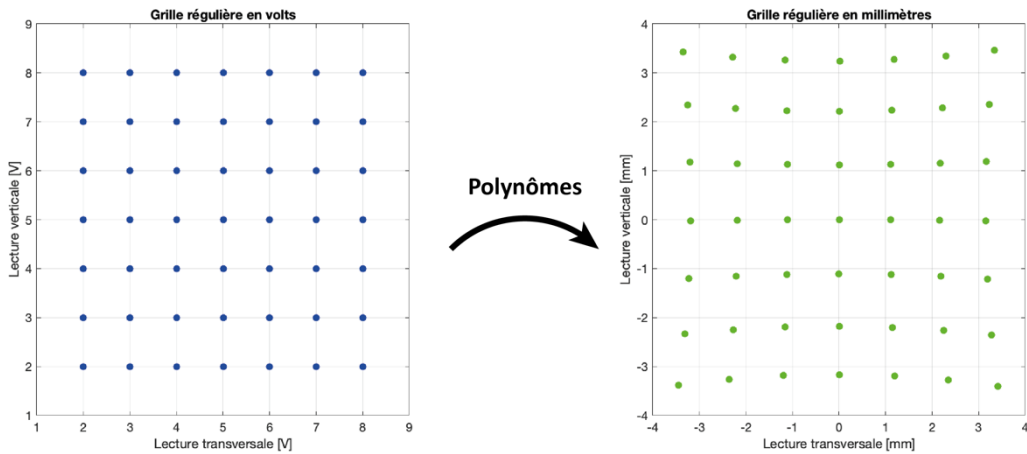


FIG. 13 — À gauche, grille régulière en volts. À droite, grille obtenue après passage en millimètres grâce aux polynômes.

$$\begin{bmatrix} X_{T1} \\ Z_{T1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_X & 0 \\ 0 & f_Z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_{T0} \\ Z_{T0} \end{bmatrix} \quad [4]$$

Avec T_X, T_Z : translations

f_X, f_Z : facteurs d'échelle

X_{T0}, Z_{T0} : lectures [mm] à une température du conditionneur T0

X_{T1}, Z_{T1} : lectures [mm] à une température du conditionneur T1

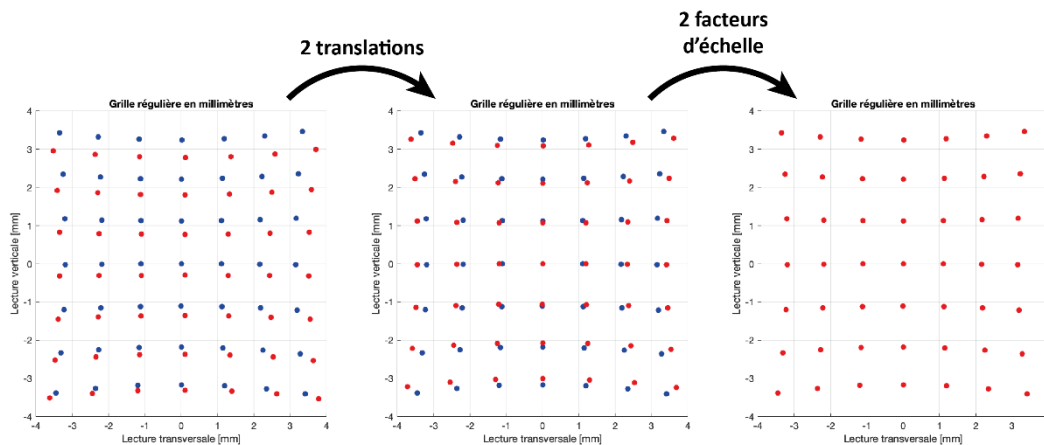


FIG. 14 — Détermination de la transformation géométrique entre les grilles calculées d’après deux étalonnages différents (la première en bleu et la seconde en rouge)

Les translations ont été calculées par simple différence de la position [5 V, 5 V] des grilles, cette position correspondant au centre mécanique du capteur. Les deux facteurs d’échelles ont ensuite été déterminés par la méthode des moindres carrés linéaires. Ces paramètres ont été calculés entre le premier polynôme et tous les polynômes suivants et ont été stockés chronologiquement dans un fichier contenant également les différentes données de température et d’humidité.

II.3.3 Correction des paramètres environnementaux de l’air ambiant

Le tracé chronologique des paramètres de la transformation préalablement calculée ne montre aucune répétabilité entre chaque palier de température du conditionneur à première vue (voir la FIG. 15). Watrelot (6) explique ce phénomène par les variations des paramètres environnementaux de l’air ambiant, qui ont un impact sur le capteur. L’étude de cet impact est détaillée dans la deuxième partie de ce mémoire. Toutefois, ne connaissant pas l’influence de la température et de l’humidité de l’air ambiant sur les lectures faites, il est proposé de modéliser cette influence sur nos quatre paramètres, à une température donnée du conditionneur, pour pouvoir la corriger par la suite.

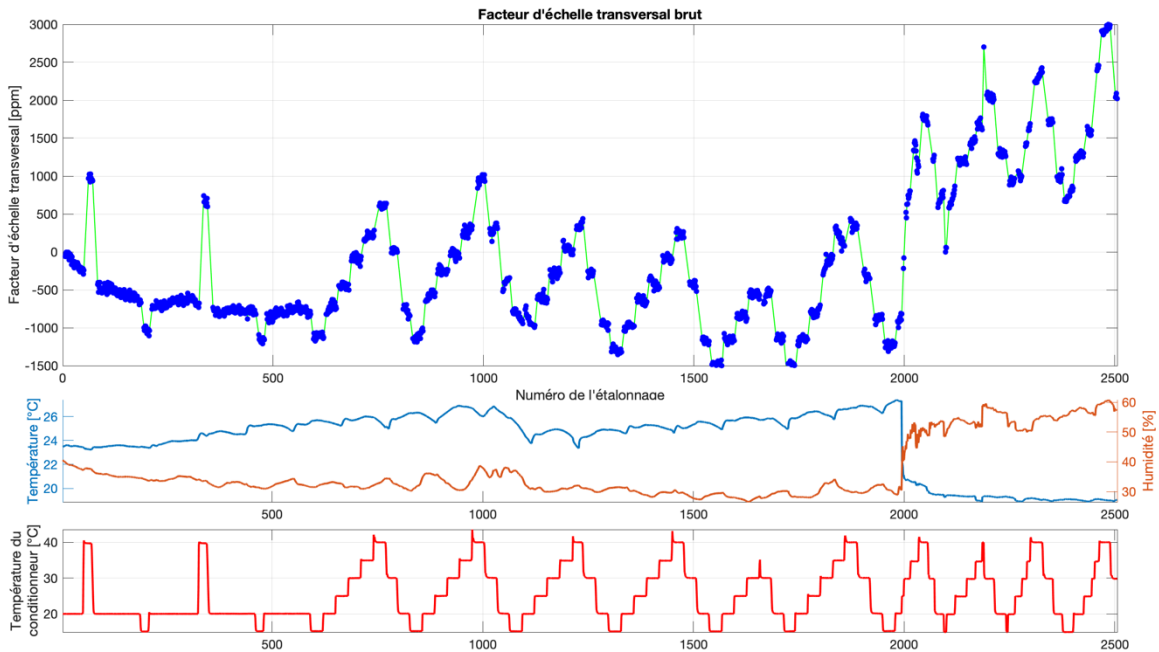


FIG. 15 — Valeurs du facteur d'échelle selon l'axe transversal sans correction en fonction des étalonnages effectués. Tandis que le motif formé par les valeurs du paramètre devrait se répéter selon la température du conditionneur (graphique du bas), on observe une dérive en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant au niveau du capteur (graphique du milieu).

Nous avons observé que les paramètres estimés étaient corrélés avec le taux d'humidité dans l'air avec un décalage de six étalonnages successifs équivalents à une durée d'environ 1h20 (voir la FIG. 16). Une fois le décalage appliqué, les résidus diminuent sensiblement. Cette durée pourrait s'expliquer par le temps nécessaire au fil pour se charger ou décharger en humidité. Une étude plus approfondie de ce phénomène serait intéressante afin de déterminer si cette durée varie en fonction du taux d'humidité relative.

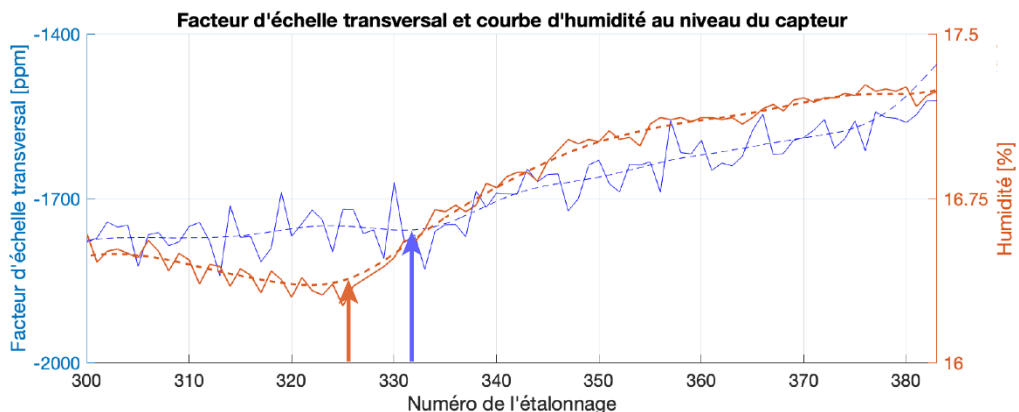


FIG. 16 — Évolution du facteur d'échelle transversal et de l'humidité au niveau du capteur. La flèche rouge montrant le début d'un changement d'humidité, on observe bien que le paramètre commence à varier avec du retard (flèche bleue).

Les translations et facteurs d'échelle déterminés lorsque le conditionneur était à $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ont été modélisés en fonction de la température et de l'humidité enregistrées au niveau du capteur. En effet, à cette température, le conditionneur n'a aucun impact sur les mesures de déplacements et seules les variations dans la pièce ont une incidence. Cette modélisation a été faite avec des surfaces polynomiales de degré deux (voir la FIG. 17). Les translations et les facteurs d'échelle ont ensuite été corrigés grâce à ce modèle (voir la FIG. 18). On observe alors une bonne répétabilité entre chaque cycle de température du conditionneur.

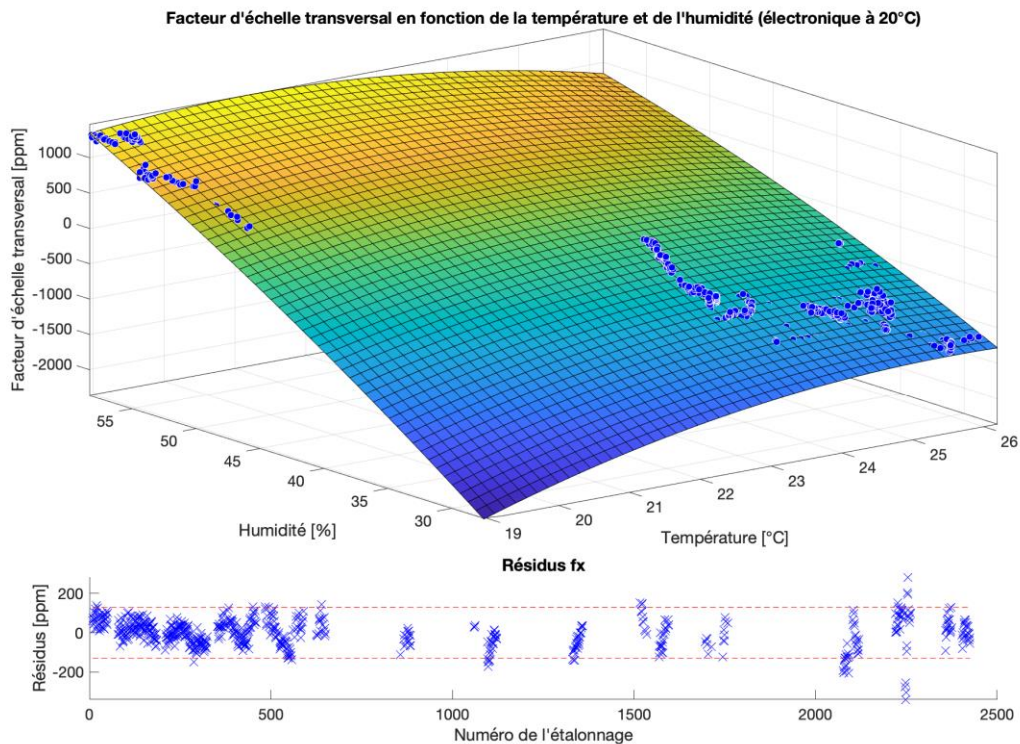


FIG. 17 — Surface de correction modélisée en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant pour le paramètre d'échelle selon l'axe transversal. Les données utilisées sont celles obtenues à partir des étalonnages effectués à une température du conditionneur de 20°C (voir la FIG. 12). Les résidus de modélisation sont pour la plupart contenus entre -130 ppm et 130 ppm, incertitudes-types a priori à 2σ de notre paramètre.

Enfin, les résultats ont été obtenus en moyennant les valeurs obtenues pour chaque paramètre à chaque palier de température⁶ du conditionneur. Un écart-type a aussi pu être calculé afin de donner un indicateur supplémentaire sur la qualité de détermination de ces paramètres.

⁶Les données sont sélectionnées pour une température de palier à plus ou moins 0.5°C .

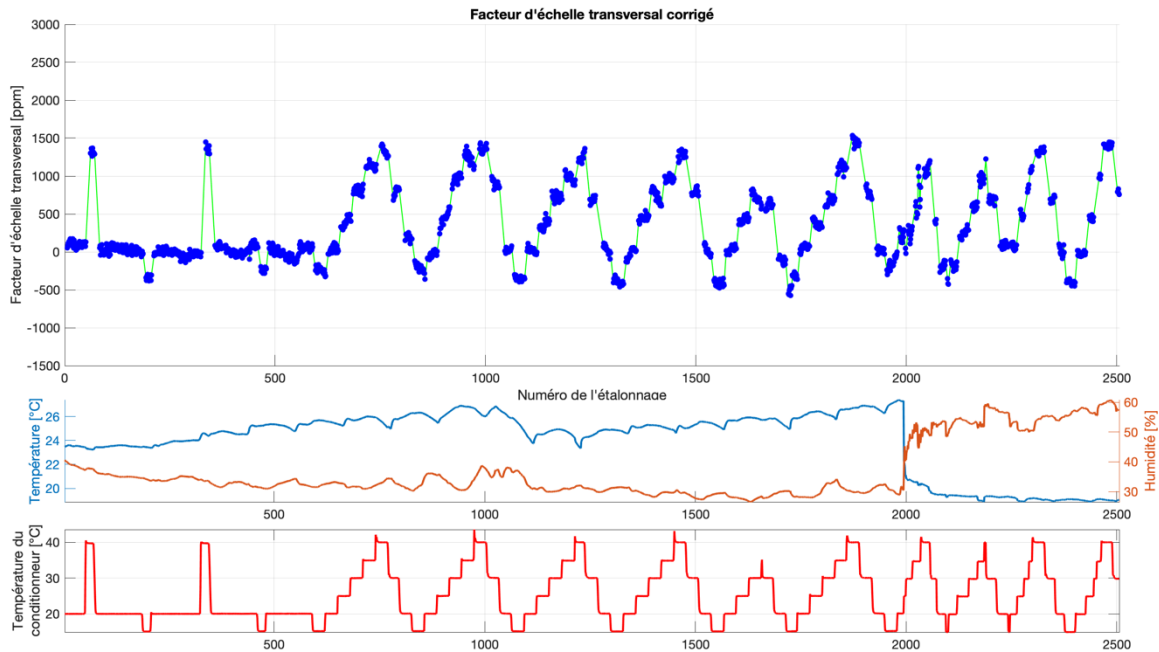


FIG. 18 — Valeurs du facteur d'échelle selon l'axe transversal en fonction des étalonnages effectués après correction des paramètres environnementaux de l'air ambiant précédemment modélisés. On observe alors une meilleure répétabilité entre chaque cycle de variation de la température du conditionneur, contrairement à la FIG. 15.

II.4 Résultats

Le traitement des nombreuses données acquises a tout d'abord permis de vérifier la répétabilité sur la détermination des paramètres. La répétabilité ainsi observée est assez bonne de façon générale. Elle est toutefois dégradée lorsque les variations d'humidité ou de température dans l'air ambiant de la pièce sont trop brusques puisque plusieurs paramètres ont pu se retrouver corrigés avec des valeurs extrapolées sur le modèle de correction.

La détermination de ces modèles de correction en fonction des paramètres environnementaux de l'air ambiant a posé plusieurs problèmes durant l'expérience. Les résidus sur la détermination des modèles étaient clairement trop éloignés de ceux espérés lors des premiers calculs. L'utilisation du décalage sur les valeurs d'humidité comme vu précédemment a contribué à améliorer ces résidus. Cet intervalle pourrait s'expliquer par le temps que met le fil pour se charger en humidité et inversement. Les quelques modifications effectuées sur le dispositif⁷ ont amélioré les résidus (voir la FIG. 19).

⁷Voir l'annexe 1.

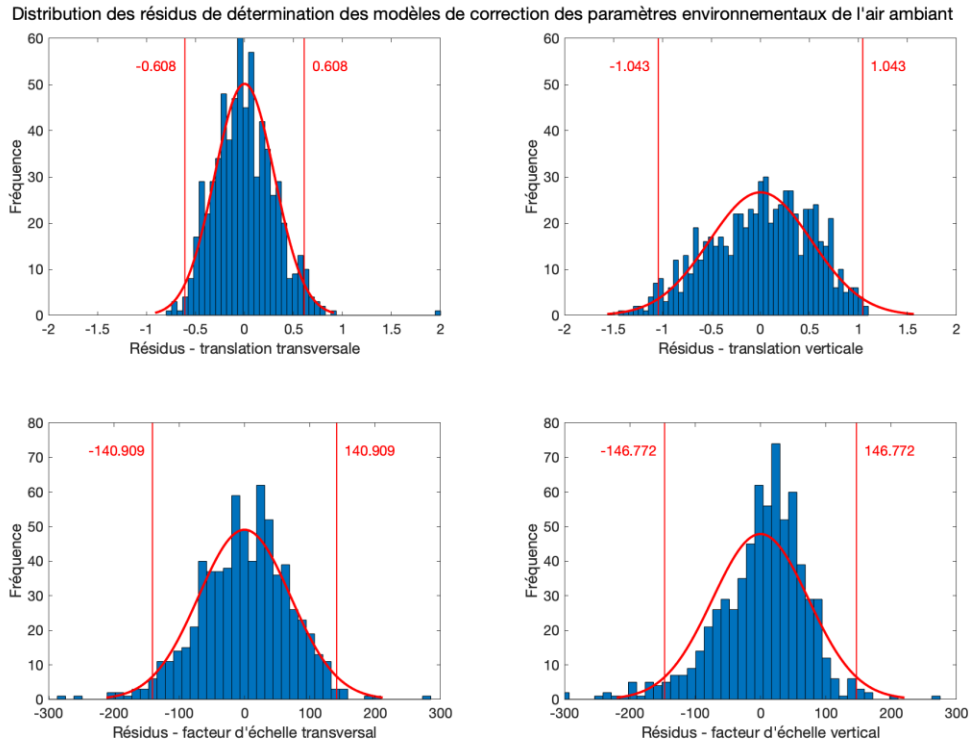


FIG. 19 — Distribution des résidus de modélisation des surfaces pour la correction des paramètres environnementaux de l'air ambiant dans la pièce. Les écarts-types à 2σ obtenus sont cohérents avec les écarts-types a priori à 2σ sur les paramètres ($\pm 2 \mu\text{m}$ pour les translations et $\pm 130 \text{ ppm}$ pour les facteurs d'échelle).

Les quatre paramètres calculés pour le conditionneur W2D-7E1-016 (voir la FIG. 20) semblent avoir le même comportement que ceux calculés en 2019 (voir la FIG. 8) obtenus par Watrelot (6) compte tenu des précisions obtenues et du faible nombre d'échantillons acquis en 2019. L'étude d'autres références de conditionneurs n'ayant pas pu être réalisée cette année, cela reste à faire pour tenter d'observer les mêmes impacts sur plusieurs conditionneurs.

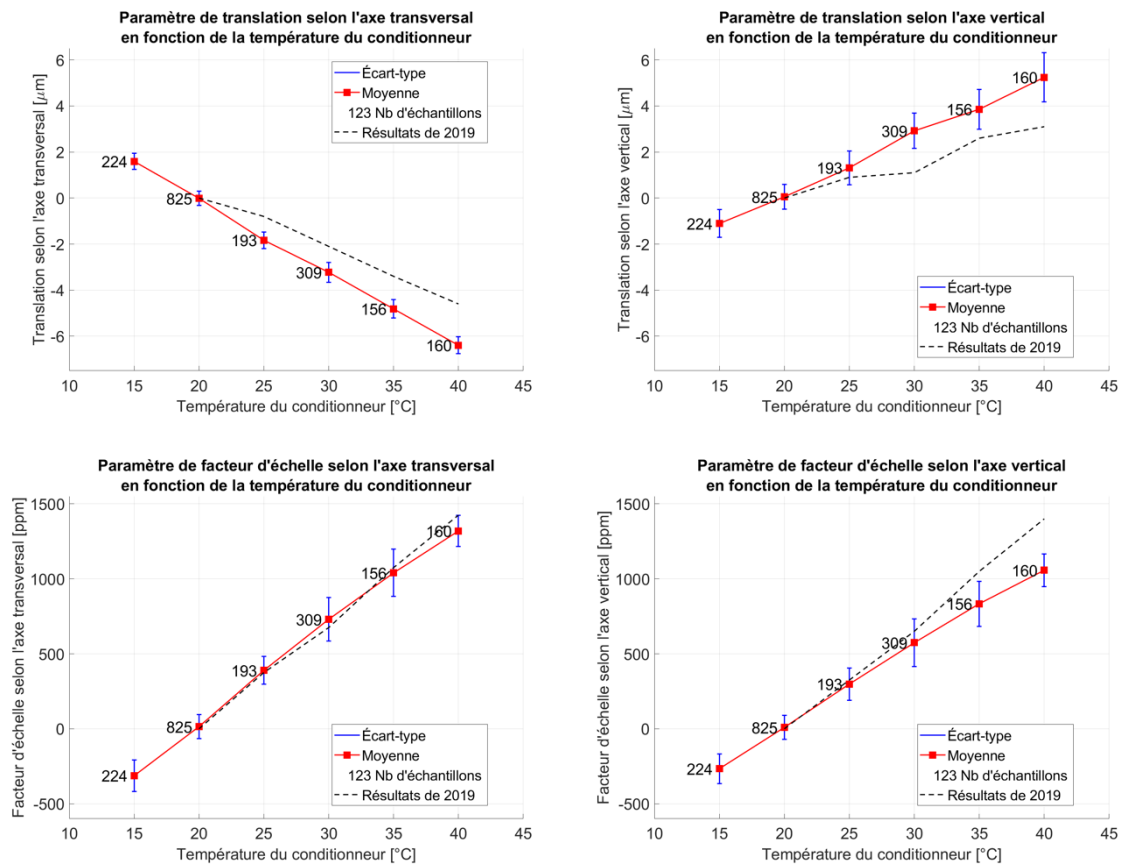


FIG. 20 — Résultats des paramètres estimés caractérisant l'impact de la température sur le conditionneur W2D-7E1-016

Les paramètres déterminés, d'une incertitude-type a priori de $\pm 1 \mu\text{m}$ pour les translations et $\pm 65 \text{ ppm}$ pour les facteurs d'échelle, semblent suivre des fonctions linéaires. Les coefficients directeurs des droites de régression linéaire nous renseignent sur les impacts des différences de température du conditionneur entre son étalonnage et son utilisation (voir le TABLEAU 1).

TABLEAU 1 — Impacts de la température sur le conditionneur W2D-7E1-016

Paramètre	Impact de la température (conditionneur W2D-7E1-016)
Translation transversale	- 0.31 $\mu\text{m} / ^\circ\text{C}$
Translation verticale	0.26 $\mu\text{m} / ^\circ\text{C}$
Facteur d'échelle transversal	66 ppm / $^\circ\text{C}$ soit 0.066 $\mu\text{m} / \text{mm} / ^\circ\text{C}$
Facteur d'échelle vertical	54 ppm / $^\circ\text{C}$ soit 0.054 $\mu\text{m} / \text{mm} / ^\circ\text{C}$

Enfin, nous pouvons avoir une première idée des impacts de la température et de l'humidité sur les mesures des capteurs grâce aux modélisations des paramètres environnementaux de l'air ambiant dans la pièce (voir le TABLEAU 2).

TABLEAU 2 — Première approximation des impacts de la température et de l'humidité sur le capteur W2D-7E1-016

Paramètre	Impact de la température (capteur W2D-7E1-016)	Impact de l'humidité (capteur W2D-7E1-016)
Translation transversale	-1 $\mu\text{m} / ^\circ\text{C}$	0 $\mu\text{m} / \%$
Translation verticale	-1 $\mu\text{m} / ^\circ\text{C}$	-1 $\mu\text{m} / \%$
Facteur d'échelle transversal	0 ppm / $^\circ\text{C}$	80 ppm / %
Facteur d'échelle vertical	0 ppm / $^\circ\text{C}$	90 ppm / %

III Influence de la température et de l'humidité sur les capteurs

III.1 État de l'art

Lors de son travail de fin d'études en 2019, Watrelot (6) s'est également penché sur l'influence de la température sur les capteurs. Pour cela, un nouveau banc de dimensions réduites a été conçu. Il a pu être installé dans la chambre thermique avec deux capteurs WPS de références et trois capteurs WPS étudiés. Ces derniers peuvent être positionnés dans quatre positions différentes sur des supports en acier invar. Ces supports ne sont pas dans le même alignement transversal ou vertical puisqu'ils présentent des décalages de position de 2.5 mm entre eux. Douze positions de fil peuvent ainsi être obtenues pour chaque capteur observé (voir la FIG. 21).

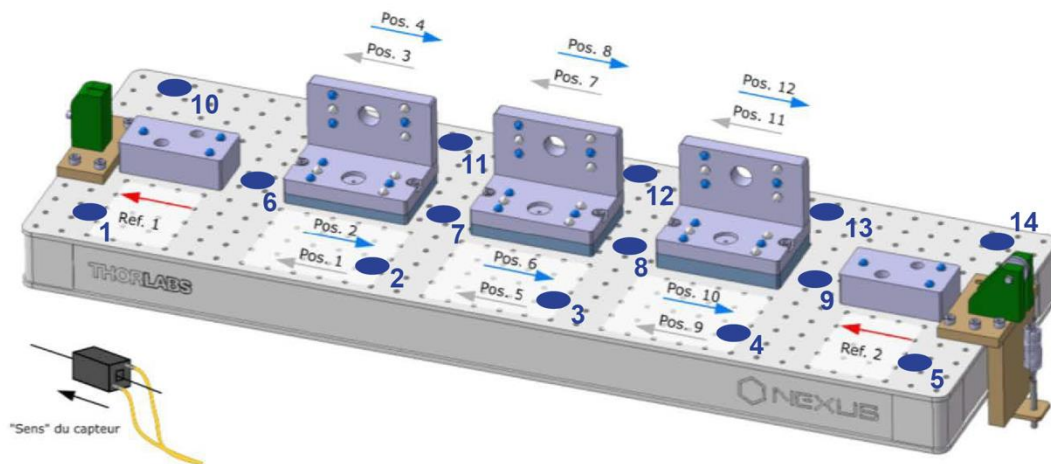


FIG. 21 — Banc conçu en 2019 permettant douze positions de capteurs (6). Les pastilles numérotées correspondent aux 14 points de mesure pour le contrôle de la déformation du banc expliqué ci-après.

Les expérimentations de 2019 n'ont pas permis d'obtenir de résultats à la suite de différentes difficultés résumées dans ce paragraphe. Dès les premières expériences réalisées, un second paramètre d'influence sur les capteurs a été identifié. En effet, les lectures faites par les capteurs sont également sensibles à l'humidité de l'air ambiant compte tenu du principe capacitif utilisé. Watrelot propose de réitérer les tests sur les capteurs dans une chambre climatique où il sera possible de contrôler température et humidité. Outre ce nouveau paramètre identifié, le nouveau banc conçu s'est déformé à la suite des cycles thermiques effectués. Le banc, composé d'une table optique à nid d'abeille d'une épaisseur de 6 centimètres, s'est affaissé jusqu'à 60 micromètres. Enfin, l'absence de système de

maintien des capteurs de références a permis aux vibrations de la chambre de se transmettre aux capteurs. Ces vibrations se sont traduites par un bruit plus important sur les mesures de ces capteurs de référence.

L'objectif cette année a été de réitérer l'étude des capteurs afin de déterminer l'influence de la température et de l'humidité. Il a fallu avant tout résoudre les problèmes rencontrés en 2019.

III.2 Conception du banc

Comme vu précédemment, un nouveau banc permettant aux capteurs d'observer douze positions de fil a dû être imaginé (voir la FIG. 21). Compte tenu de l'affaissement observé en 2019 allant jusqu'à 60 micromètres, la priorité a été de renforcer le banc afin qu'il ne se déforme plus lors des cycles thermiques.

III.2.1 Renforcement du banc

Afin d'éviter la déformation du banc, les mécaniciens ont vissé trois éléments en aluminium sous la table optique. Six traverses supplémentaires sont également vissées entre ces éléments (voir la FIG. 22). Tous ces ajouts ont pour but de renforcer la structure de la table optique qui constitue le banc en y ajoutant des contraintes.

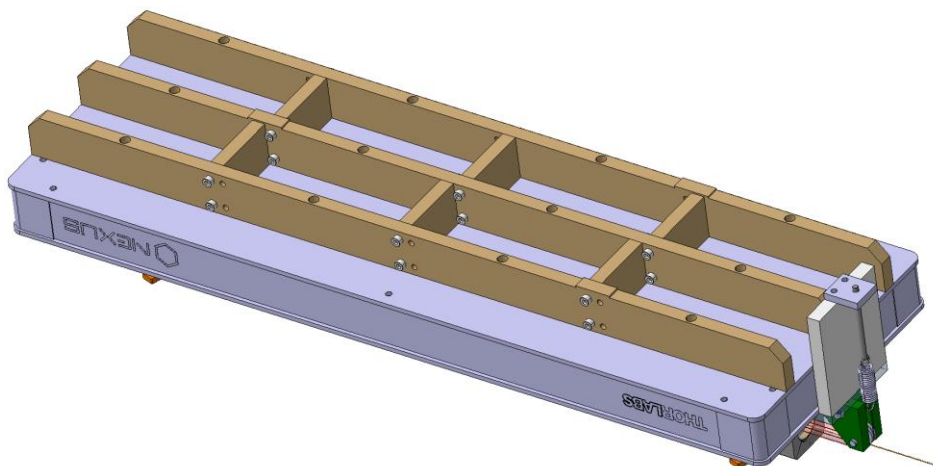


FIG. 22 — Vue 3D du dessous du banc et des éléments de renfort ajoutés (illustration T. Blaszczyk)

Une fois ces renforts installés, nous avons procédé à la vérification de l'efficacité de ceux-ci. Cette opération s'est déroulée en plusieurs phases : une mesure initiale du banc, la chauffe du banc et une nouvelle mesure après cette montée en température.

La mesure initiale a été réalisée dans une pièce dont la température est maintenue à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ après un temps de stabilisation thermique du banc. Quatorze supports de prismes sphériques (voir la FIG. 21) ont été installés sur la surface du banc et un support a également été collé sur une interface trait-point-plan permettant des mesures sur cinq positions supplémentaires dans l'axe du banc. La mesure de ces points a été faite avec un Leica Absolute Tracker AT401 sur une sphère CCR 1.5'' depuis deux stations.

Une fois la mesure initiale faite, le banc a été placé dans la chambre climatique pour une alternance de variations de température de 15°C jusqu'à 50°C . Plusieurs montées-descentes ont été effectuées avant que le banc soit stabilisé à 20°C . Il a alors été ramené dans la pièce de la mesure initiale et une nouvelle mesure est faite dans les mêmes conditions. La mesure a été comparée avec la mesure précédente par ajustement par moindres carrés grâce au logiciel SpatialAnalyzer de New River Kinematics. Trois translations et trois rotations ont été calculées pour cette comparaison. Théoriquement, si le banc ne s'est pas déformé, ces paramètres permettent de réaligner les différents repères de mesure en obtenant des résidus nuls. Toutefois, les résidus obtenus sur les points mesurés nous ont permis d'estimer la déformation. Cette série d'étapes a été répétée plusieurs fois afin de confirmer les résultats observés.

Cette série de tests a montré que malgré le renforcement de la table optique, le banc continue à se déformer lors des cycles thermiques. Les déplacements observés sont minimes et sont à la limite de leur incertitude de mesure⁸. L'on pourrait croire que les valeurs obtenues ne sont pas significatives, mais leurs représentations graphiques obtenues grâce à un script Matlab nous informent du contraire en faisant apparaître des figures de déformation nettes, particulièrement en observant les déplacements selon l'axe normal au banc. À la suite du premier cycle thermique, la déformation observée s'apparente à une torsion (voir la FIG. 23) que nous avons expliquée par la réorganisation des contraintes au sein de la structure du banc après l'ajout des renforts, le coefficient de dilatation de l'aluminium étant de $23 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

⁸Leica donne pour son Absolute Tracker AT401 une erreur maximale tolérée (MPE — *Maximum Permissible Error*) de $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ pour la mesure angulaire et une MPE de $\pm 10 \mu\text{m}$ pour la mesure de distance.

Après chaque cycle suivant, les figures observées sont semblables et montrent des déformations le long de l'axe longitudinal du banc.

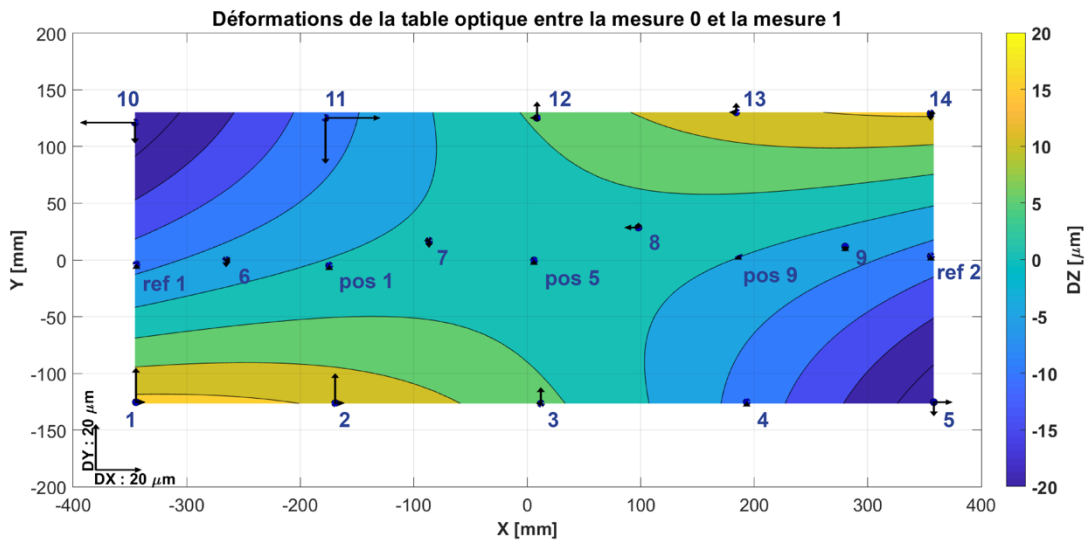


FIG. 23 — Champ de déformation du banc après le premier cycle thermique calculé grâce à un script Matlab sur la base des positions mesurées (voir la FIG. 21). On y observe une torsion du banc probablement expliquée par une réorganisation des contraintes à la suite de l'ajout des éléments de renforcement.

Enfin, des tests supplémentaires ont montré que la tension du fil ou le transport du banc ne semblaient pas avoir d'impact significatif sur sa déformation.

III.2.2 Mise en place d'une solution alternative

Compte tenu des déformations observées précédemment, il n'était pas envisageable d'utiliser le banc en l'état. Les déformations provenant sans aucun doute de la structure complexe de la table en nid d'abeille, constituée de différents matériaux, nous avons cherché un support constitué d'un unique matériau.

Notre choix s'est porté vers un petit banc en marbre de longueur 1 mètre et de section 60 par 110 millimètres. Les pièces en acier invar formant le banc pourraient y être collées et le faible coefficient de dilatation thermique du marbre (6.10^{-6} K^{-1}) serait un avantage. Afin de vérifier qu'il ne se déforme pas, le protocole réalisé pour le banc original a été réitéré. A la suite de quatre cycles thermiques, aucune déformation n'a été observée.

Les éléments en acier invar ont donc été démontés de la table optique pour être collés à la colle Araldite 2011 sur le marbre (voir la FIG. 24). Chaque partie a été soigneusement désaxée avec des cales afin de respecter la configuration souhaitée lors de la conception du banc. Après collage, un dernier essai thermique a permis de confirmer la stabilité du banc.

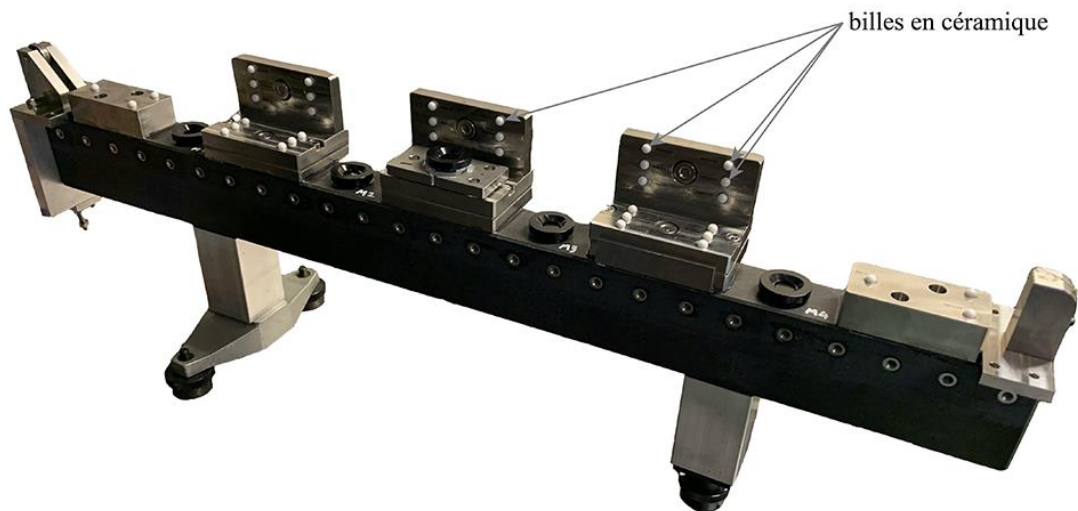


FIG. 24 — Nouveau banc constitué des pièces en acier invar collées sur une poutre en marbre. Les 42 billes en céramique des interfaces ont dû être mesurées avec une grande précision par le service métrologie du CERN.

Le nouveau banc étant prêt, chaque position des billes des interfaces doit être relevée le plus exactement possible pour que leurs coordonnées dans le repère du banc puissent être intégrées dans le calcul abordé plus loin. Cette mesure a été réalisée par le laboratoire de métrologie du CERN à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle. Cette dernière, modèle Leitz PMM-C 12.10.7, possède une incertitude de mesure $E_0 = 0.5 + L/700 \mu\text{m}^9$ inférieure à la résolution des capteurs WPS. Afin de contrôler l'absence de faute sur cette mesure, le banc a aussi été mesuré à l'aide d'un bras de mesure de marque Romer d'incertitude de mesure de l'ordre de $30 \mu\text{m}$.

III.3 Démarche expérimentale

L'expérience réalisée sur les capteurs a eu pour objectif de déterminer l'impact de la température et de l'humidité de l'air sur les mesures faites par les capteurs WPS. L'utilisation d'une démarche semblable à l'étude des électroniques n'était pas envisageable puisqu'un banc d'étalonnage relatif possède des dimensions trop grandes pour entrer dans une chambre climatique de dimensions utiles $100 \times 113 \times 95$ centimètres. De plus, les changements de

⁹L'erreur de mesure de longueur d'une machine à mesurer tridimensionnelle, E_0 , définie par la norme ISO 10360-2, correspond à l'erreur pour une mesure sans déport entre l'axe du support du système de palpation et la touche du stylet. La valeur L correspond à la longueur ou au diamètre de l'objet à mesurer.

température et d'humidité pourraient avoir un impact sur la table à déplacement. Le banc précédemment présenté a ainsi été imaginé en 2019. Chaque capteur peut y être disposé dans 12 positions différentes permettant ainsi d'obtenir suffisamment d'observations pour calculer une translation et un facteur d'échelle selon les deux axes du capteur. Ce total de 12 positions est obtenu à l'aide des trois supports en « L » permettant chacun de positionner le capteur selon quatre positions (voir la FIG. 25).

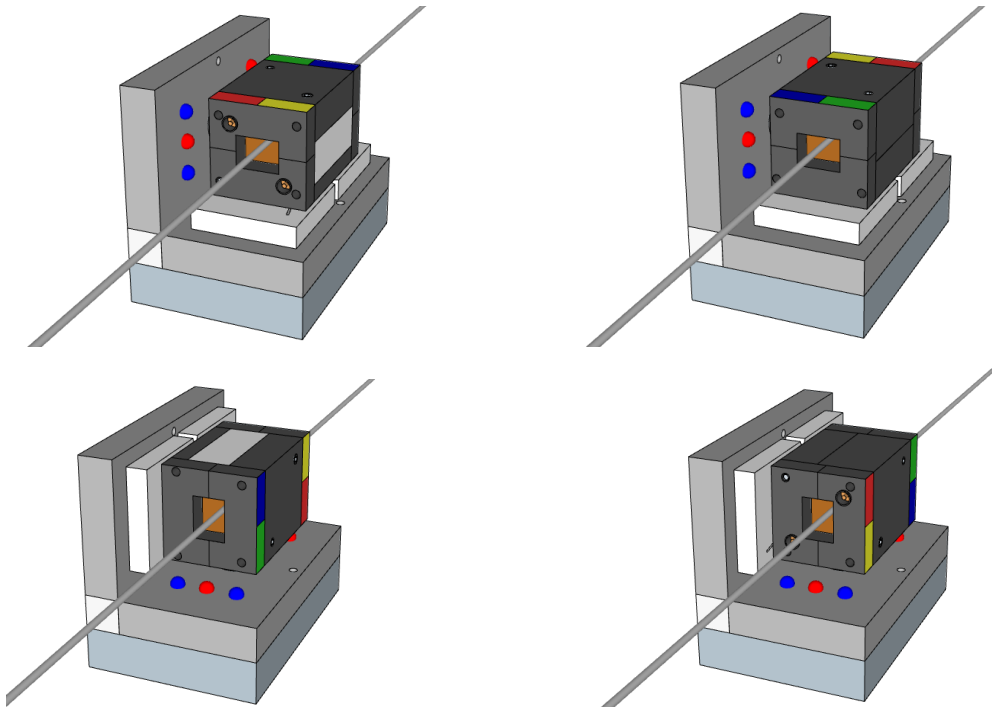


FIG. 25 — Les quatre positions possibles du capteur sur un support en « L ». La stabilité du capteur est assurée par un aimant situé sous son embase.

Chaque capteur est étudié à différentes valeurs de température et d'humidité représentatives de la situation qui pourrait se présenter dans le tunnel du CLIC. Le banc équipé des capteurs à étudier a été placé dans une chambre climatique où nous avons pu y contrôler la température et l'humidité (voir la FIG. 26).



FIG. 26 — Banc équipé des capteurs dans la chambre climatique

Les douze positions possibles ont donc été observées pour chaque couple température – humidité, chacun donnant lieu au calcul des paramètres définis ci-dessus. Ces couples ont été définis au nombre de neuf compte tenu des contraintes de temps liées à la maladie à coronavirus. Une période de test plus longue aurait permis d'étudier les capteurs à des valeurs intermédiaires afin d'obtenir des résultats plus détaillés. Après plusieurs essais, il est apparu que les capteurs ont besoin de plus de deux heures trente pour stabiliser leurs lectures. Les neuf couples de valeurs (voir le TABLEAU 3) ont donc été maintenus durant des paliers de deux heures quarante-cinq afin de permettre la stabilisation des lectures du capteur WPS et seules les toutes dernières données de chaque palier ont été utilisées.

TABLEAU 3 — Valeurs de température et d'humidité pour l'étude des capteurs WPS

Température [°C]	20	20	20	30	30	30	40	40	40
Humidité relative [%]	20	50	80	20	50	80	20	50	80

La succession de ces paliers pour une position des capteurs nécessite vingt-six heures d'observations. Au bout de cette durée, les capteurs ont été changés de position et le cycle est répété. Il a donc fallu plus de 400 heures pour obtenir toutes les observations nécessaires au calcul.

L'expérience a été réalisée dans un bâtiment de type hangar et la température y évolue au cours de la journée. Afin d'éviter des impacts dus aux variations de température des conditionneurs des capteurs WPS, positionnés en dehors de la chambre climatique, il a fallu trouver un moyen de stabiliser leur température. Une cave à vin de mise en température (voir la FIG. 27) a été utilisée pour maintenir les conditionneurs à une température constante de $18 \pm 2^\circ\text{C}$.

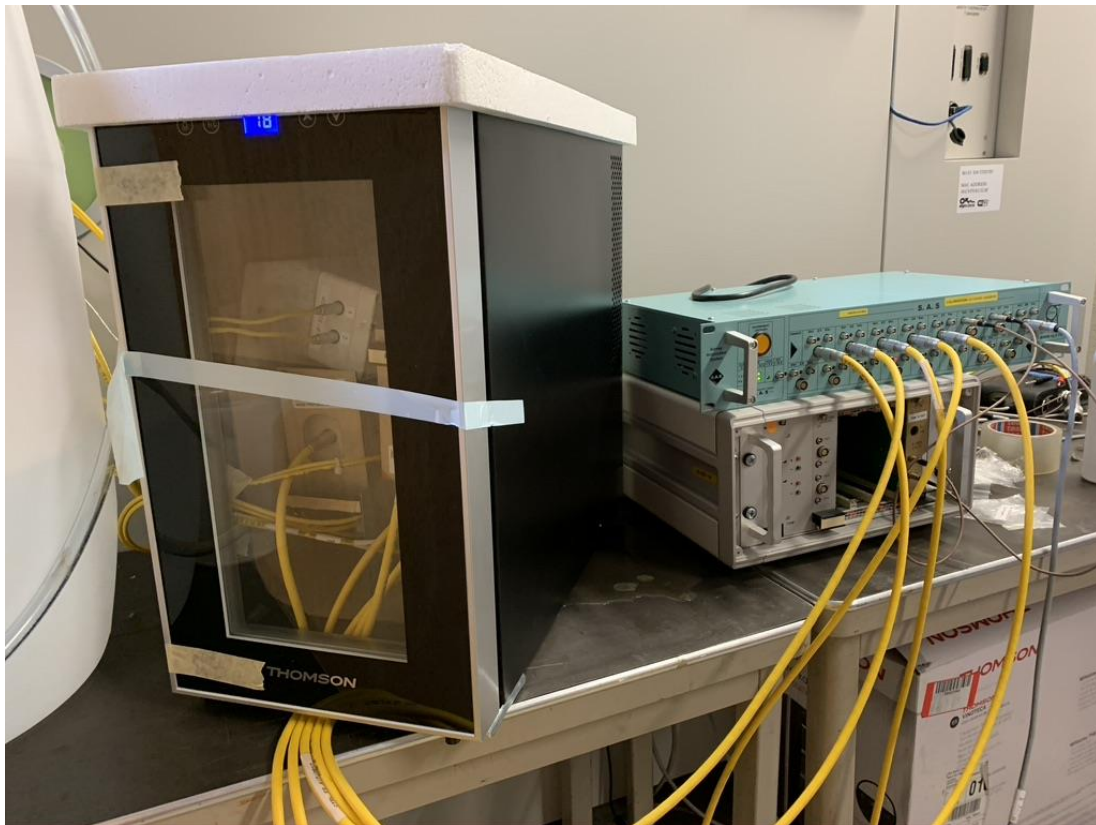


FIG. 27 — Système d'acquisition des données et cave de mise en température contenant les conditionneurs

Préalablement à l'expérience dans la chambre climatique, les capteurs utilisés ont dû être étalonnés. Chacun a été étalonné en relatif et en absolu sur le type de fil utilisé pour l'expérience. Ces étalonnages permettent d'obtenir pour chaque capteur les 72 coefficients polynomiaux ainsi que les deux translations (voir I.3.3.2). Ces valeurs sont indispensables pour convertir les lectures des capteurs en millimètre et pour le traitement des données.

III.4 Simulations

L'objectif des simulations est la validation de la conception du banc et la possibilité d'une bonne détermination des paramètres de correction à partir des douze positions de fil mesurées.

Ces simulations se sont déroulées en deux temps : le calcul d'observations simulées à partir de paramètres fixés, et la détermination de ces paramètres à partir des observations simulées. Théoriquement, si la conception du banc est satisfaisante, nous devrions retrouver les paramètres définis initialement. L'ensemble du processus de calcul développé ci-dessous a été programmé dans le langage Matlab.

III.4.1 Calculs des observations simulées

Les observations simulées ont été calculées grâce à l'équation [5] permettant le passage du repère de coordonnées du capteur au repère de coordonnées du banc (voir la FIG. 28).

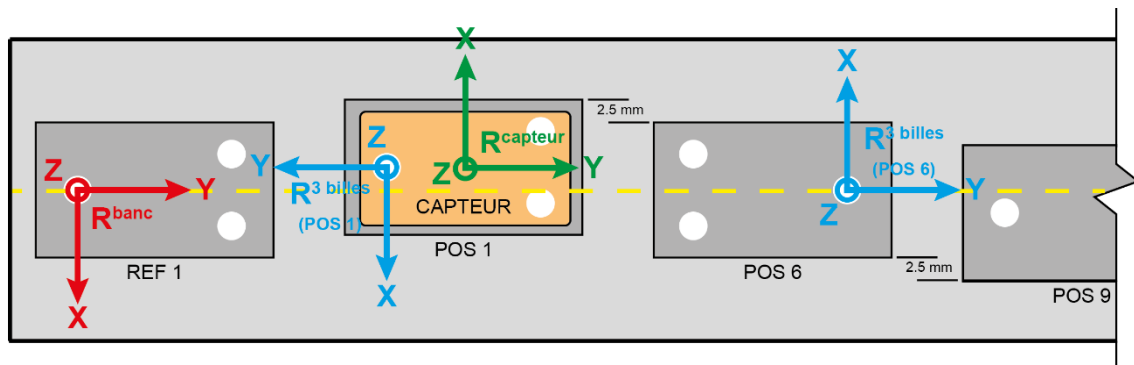


FIG. 28 — Trois types de repères différents sont présents sur le banc : le repère du capteur R^{capteur} , les repères des interfaces 3-billes $R^{\text{3-billes}}$ et le repère du banc R^{banc} .

$$M^b = T^b + R_{3b}^b \times \left(t^{3b} + r_c^{3b} \times (\tau^c + \lambda^c \times l^c) \right) \quad [5]$$

Avec M^b : coordonnées du point M sur le fil

T^b : vecteur translation

R_{3b}^b : matrice de rotation

t^{3b} : vecteur translation

r_c^{3b} : matrice de rotation

τ^c : vecteur translation (correction de l'impact de la température et de l'humidité)

λ^c : facteur d'échelle (correction de l'impact de la température et de l'humidité)

l^c : lectures de déplacements du capteur

Et \dots^b : repère banc

\dots^{3b} : repère 3-billes

\dots^c : repère capteur

Soit :

$$\begin{bmatrix} X_M^b \\ Y_M^b \\ Z_M^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X^b \\ T_Y^b \\ T_Z^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & R_{1,3} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{3,1} & R_{3,2} & R_{3,3} \end{bmatrix}_{3b}^b \times \left(\begin{bmatrix} t_X^{3b} \\ t_Y^{3b} \\ t_Z^{3b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_c^{3b} \times \left(\begin{bmatrix} \tau_X^c \\ 0 \\ \tau_Z^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_X^c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_Z^c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} l_X^c \\ 0 \\ l_Z^c \end{bmatrix} \right) \right)$$

À partir des lectures du capteur de la position d'un point M situé sur le fil, l'impact de la température et de l'humidité a été corrigé avec les paramètres de translation et de facteur d'échelle. Ensuite, le passage du repère du capteur au repère de l'interface de centrage 3-billes a été effectué grâce à la transformation calculée par l'étalonnage absolu de chaque capteur. Enfin, les coordonnées du point M ont été obtenues dans le repère du banc grâce à la transformation permettant le passage du repère de l'interface 3-billes au repère du banc calculée pour chaque position avec les coordonnées des billes mesurées par le laboratoire de métrologie.

Les coordonnées du point M sur le fil peuvent également être exprimées au travers de l'équation [6] entre les extrémités A et B du fil.

$$M^b = A^b + (B^b - A^b) \times \frac{d}{D} \quad [6]$$

Avec M^b : coordonnées du point M sur le fil
 A^b : coordonnées du point A, première extrémité du fil
 B^b : coordonnées du point B, seconde extrémité du fil
 d : distance AM
 D : distance AB

En posant l'égalité entre les équations [5] et [6], il est possible de déterminer l'équation d'observation [7].

$$f(X) = l^c = \lambda^{c-1} \times \left(r_c^{3bt} \times \left(R_{3b}^b{}^t \times \left(\mathbf{A} + (\mathbf{B} - \mathbf{A}) \times \frac{d}{D} - T^b \right) - t^{3b} \right) - \tau^c \right) \quad [7]$$

Avec en bleu : les observations ;
en rouge : les inconnues.

Lors du calcul des observations simulées, l'équation [7] a été utilisée en fixant les inconnues. Les autres termes de l'équation sont connus et dépendent des coordonnées des billes dans le repère du banc ou de l'étalonnage absolu des capteurs.

III.4.2 Calcul des paramètres

Une fois les observations simulées, nous les avons utilisées pour calculer nos inconnues par la méthode des moindres carrés. Nous devons alors retrouver les inconnues fixées ci-dessus.

Le vecteur des observations L est défini par l'équation [8]. Il se compose des douze observations transversales et des douze observations verticales.

$$L = \begin{bmatrix} \textit{lectures transversales} \\ \vdots \\ \textit{lectures verticales} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad [8]$$

24×1

Le vecteur des inconnues X est défini par l'équation [9]. Il regroupe les deux facteurs d'échelle, les deux translations, les coordonnées du point A et celles du point B.

$$X = \begin{bmatrix} \lambda_X \\ \lambda_Z \\ \tau_X \\ \tau_Z \\ X_A \\ Z_A \\ X_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad [9]$$

8×1

L'incertitude-type a priori des observations du capteur est fixée à 5 micromètres, d'après la validation de la justesse des capteurs WPS faite par Rude (10), et permet de renseigner la matrice de variance-covariance a priori associée aux observations. La matrice de pondération P associée peut ensuite être calculée.

Une fois ces éléments définis, la solution au sens des moindres carrés peut ainsi être calculée dans le cas non linéaire (13). La première étape consiste à linéariser la fonction f définissant l'équation d'observation [7]. On calcule pour cela la matrice jacobienne A (voir l'équation [10]) contenant les dérivées partielles¹⁰ de f en X_0 , une valeur approchée des inconnues.

¹⁰ Voir l'annexe 3.

$$A = f^{(1)}(X_0) = \begin{bmatrix} \frac{dl_{X_1}}{d\lambda_X} & \frac{dl_{X_1}}{d\lambda_Z} & \frac{dl_{X_1}}{d\tau_X} & \frac{dl_{X_1}}{d\tau_Z} & \frac{dl_{X_1}}{dX_A} & \frac{dl_{X_1}}{dZ_A} & \frac{dl_{X_1}}{dX_B} & \frac{dl_{X_1}}{dZ_B} \\ \frac{dl_{X_2}}{d\lambda_X} & \frac{dl_{X_2}}{d\lambda_Z} & \frac{dl_{X_2}}{d\tau_X} & \frac{dl_{X_2}}{d\tau_Z} & \frac{dl_{X_2}}{dX_A} & \frac{dl_{X_2}}{dZ_A} & \frac{dl_{X_2}}{dX_B} & \frac{dl_{X_2}}{dZ_B} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{dl_{Z_1}}{d\lambda_X} & \frac{dl_{Z_1}}{d\lambda_Z} & \frac{dl_{Z_1}}{d\tau_X} & \frac{dl_{Z_1}}{d\tau_Z} & \frac{dl_{Z_1}}{dX_A} & \frac{dl_{Z_1}}{dZ_A} & \frac{dl_{Z_1}}{dX_B} & \frac{dl_{Z_1}}{dZ_B} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad [10]$$

24×8

Le terme constant B est défini par la différence [11].

$$B = L - f(X_0) \quad [11]$$

La forme linéarisée du problème est donc finalement :

$$B = A(X - X_0) + V \quad [12]$$

De plus, le critère d'optimisation dans le cadre des moindres carrés est :

$$A^T P V = 0 \quad [13]$$

On peut alors écrire le système d'équations normales [14] et définir la matrice normale N et le second membre C de l'équation normale :

$$N(X - X_0) = C \quad [14]$$

$$N = A^T P A$$

$$C = A^T P B$$

L'unique solution au sens des moindres carrés, notée \hat{X} , est donc obtenue par inversion de la matrice N :

$$\hat{X} - X_0 = N^{-1} C \quad [15]$$

La solution trouvée (voir le TABLEAU 4) correspond aux paramètres fixés lors du calcul des observations par simulation. En bruitant les observations avec une variable aléatoire suivant une loi normale d'espérance $\mu = 0$ et d'écart-type $\sigma = 0.005^{11}$, nous obtenons des résidus maximums sur les observations inférieurs à 10 micromètres.

TABLEAU 4 — Résultats du calcul des paramètres par la méthode des moindres carrés non linéaires à partir des observations simulées. La solution calculée correspond aux paramètres fixés lors de la simulation.

STATISTIQUES DE L'AJUSTEMENT :		PARAMÈTRES FIXÉS LORS DE LA SIMULATION DES OBSERVATIONS :	
=====		=====	
nbr itérations :	3	λ_X	= -5000 [ppm]
nbr obs. :	24	λ_Z	= -1234 [ppm]
nbr inconnues :	8	τ_X	= 0.045 [mm]
degrés de liberté :	16	τ_Z	= -0.051 [mm]
s_0^2 :	0.000 [mm]	X_A	= -0.250 [mm]
Tchi2 (95 %) :	[6.908 ; 28.845] [mm]	Z_A	= 34.600 [mm]
		X_B	= 1.200 [mm]
		Z_B	= 34.700 [mm]
RÉSULTATS DE L'AJUSTEMENT :			
=====			
(incertitudes-types a priori)			
λ_X	= -5000 +/- 15735		[ppm]
λ_Z	= -1234 +/- 15456		[ppm]
τ_X	= 0.045 +/- 0.002		[mm]
τ_Z	= -0.051 +/- 0.004		[mm]
X_A	= -0.250 +/- 0.086		[mm]
Z_A	= 34.600 +/- 0.107		[mm]
X_B	= 1.200 +/- 0.099		[mm]
Z_B	= 34.700 +/- 0.029		[mm]

Les incertitudes-types obtenues sur les paramètres sont particulièrement grandes par rapport aux valeurs recherchées. En observant les valeurs de corrélation (voir le TABLEAU 5) issues de la matrice de variance-covariance, on se rend compte qu'il existe une très forte corrélation entre presque tous les paramètres de notre problème.

Cette forte corrélation peut s'expliquer par un modèle fonctionnel incorrect qui ne modéliserait pas le problème étudié de façon satisfaisante. Cela peut être dû à une erreur dans l'hypothèse des différents types de paramètres intervenants. Plusieurs essais ont été

¹¹L'incertitude-type a priori des observations est fixée à 0.005 millimètres.

réalisés en ne conservant que deux facteurs d'échelle ou deux translations mais les résultats obtenus n'étaient pas meilleurs.

TABLEAU 5 — Corrélations entre les différents paramètres recherchés lors du calcul de la simulation

	λ_Z	τ_X	τ_Z	X_A	Z_A	X_B	Z_B
λ_X	100 %	44 %	-81 %	-100 %	100 %	100 %	-99 %
λ_Z		44 %	-79 %	-100 %	100 %	100 %	-99 %
τ_X			-36 %	-44 %	44 %	44 %	-44 %
τ_Z				79 %	-81 %	-81 %	77 %
X_A					-100 %	-100 %	99 %
Z_A						100 %	-99 %
X_B							-99 %

Afin de réussir à calculer un premier ordre de grandeur significatif de nos paramètres, nous avons fait le choix d'ajouter quatre observations dans notre vecteur L qui correspondent aux positions du fil en A et B, calculées à partir des lectures des capteurs de référence. Leur incertitude-type a priori est fixée empiriquement à 10 micromètres de façon que ces observations permettent de contraindre légèrement les paramètres X_A , Z_A , X_B et Z_B . On peut noter que le fil était proche du centre des capteurs de référence, l'impact de l'humidité sera faible sur ces observations. Les corrélations entre les paramètres obtenues dans ce cas sont bien meilleures (voir le TABLEAU 6). Les incertitudes-types, notamment sur les facteurs d'échelle, sont divisées par un facteur 10.

TABLEAU 6 — Corrélations entre les différents paramètres recherchés avec la position du fil dans les observations

	λ_Z	τ_X	τ_Z	X_A	Z_A	X_B	Z_B
λ_X	-33 %	19 %	9 %	-7 %	0 %	8 %	-1 %
λ_Z		8 %	-38 %	-73 %	76 %	67 %	-66 %
τ_X			2 %	-15 %	4 %	12 %	-8 %
τ_Z				14 %	-49 %	-44 %	12 %
X_A					-61 %	-81 %	59 %
Z_A						63 %	-79 %
X_B							-49 %

III.5 Traitement des données

Lors de l'expérience, les mesures des capteurs sont sauvegardées toutes les minutes. Le système d'acquisition utilise les polynômes calculés lors des étalonnages relatifs afin de fournir directement des valeurs de déplacement en millimètres.

L'enregistrement a été fait en continu sans interruption lors des changements de position. Après avoir concaténé les données acquises pour toute la durée de l'expérience, il a fallu identifier les paliers en fonction de la température et de l'humidité. La grande durée des paliers correspondant au temps nécessaire à la stabilisation des lectures des capteurs, seules les dernières données de chaque palier, une fois les lectures stabilisées, sont significatives.

La sélection de ces lectures s'est faite sur la base des cinq dernières données avant chaque changement de palier. Les paliers ont été identifiés manuellement en observant les variations des valeurs de température et d'humidité. La moyenne de ces cinq dernières données a été saisie dans un tableur récapitulatif pour chaque palier et chaque position des capteurs.

Afin de vérifier la répétabilité des mesures de capteurs d'un cycle à l'autre, le cycle climatique a été réitéré pour une même position des capteurs. En supposant les deux capteurs de référence parfaitement répétables afin d'utiliser leurs mesures pour corriger le déplacement du fil, les erreurs de répétabilité obtenues sont très satisfaisantes car elles sont en moyenne de 2 micromètres. Seules trois valeurs s'élèvent jusqu'à 6 micromètres sur la composante verticale (voir le TABLEAU 7). Ces maximums apparaissent lorsque l'humidité relative atteint 80 %, un taux important dans l'espace confiné de la chambre climatique. Les capteurs n'ont peut-être pas tout à fait le même comportement à des taux d'humidité élevés et n'ont peut-être pas eu assez de temps sur le palier pour stabiliser leurs mesures. Compte tenu des contraintes de temps, il n'a pas été possible de prolonger la durée des paliers pour tester cette hypothèse.

TABLEAU 7 — Erreurs de répétabilité en millimètres après répétition d'un cycle climatique. En orange, les trois maximums, toujours à un taux d'humidité relative de 80 %.

T [°C]	HR [%]	Erreurs de répétabilité (axe transversal / axe vertical) [mm]		
		Capteur W2D-7DE-015	Capteur W2D-7D7-021	Capteur W2D-7DE-019
20	20	0.000 / -0.001	-0.001 / -0.001	0.000 / 0.000
20	50	0.000 / -0.001	-0.001 / -0.001	0.000 / 0.001
20	80	0.002 / -0.006	-0.001 / -0.002	-0.003 / 0.001
30	80	0.000 / 0.000	-0.001 / 0.000	0.000 / 0.001
30	50	0.001 / -0.002	0.000 / -0.002	0.001 / 0.000
30	20	0.000 / -0.001	0.000 / -0.002	-0.001 / 0.001
40	20	0.000 / -0.002	0.000 / -0.002	0.001 / -0.002
40	50	0.001 / -0.002	0.001 / -0.001	0.000 / -0.001
40	80	0.003 / -0.006	0.001 / -0.006	0.000 / -0.003

Une fois les douze lectures transversales et les douze lectures verticales obtenues pour un capteur à 20°C et 20 % d'humidité relative¹², un premier test a été réalisé afin de vérifier que les douze positions du fil mesurées et exprimées dans le repère du banc forment bien une ligne droite. Ce test a montré que les deux positions mesurées par les références ne s'alignent pas, à une vingtaine de micromètres près, sur la ligne droite formée par les douze autres positions. Cette situation pourrait s'expliquer par une erreur de mesure des coordonnées des billes avec la machine à mesurer tridimensionnelle, notamment si le palpeur utilisé a été changé pour la mesure des billes sur les interfaces des références situées aux extrémités du banc. Pour pallier cette situation, les coordonnées des billes sur les interfaces des références ont été recalculées dans le prolongement de la ligne droite formée par les douze positions. Le calcul finalement défini lors des simulations peut ensuite être réalisé pour chaque couple température – humidité et pour chaque capteur.

¹²Ce couple de 20°C et 20 % d'humidité relative est le plus proche des conditions d'étalonnage des capteurs qui étaient de 20°C et 30 % d'humidité relative.

III.6 Résultats

III.6.1 Analyse des résidus

Une fois le calcul effectué pour le capteur W2D-7DE-015, les résidus sur les observations nous donnent un premier aperçu de la résolution du problème (voir la FIG. 29). Globalement, les résidus sur les 24 observations du capteur étudié sont satisfaisants et ne dépassent jamais les 15 micromètres. On observe cependant des résidus élevés pour les observations n° 26 et n° 28 qui correspondent aux positions verticales du fil en A et en B. De plus, ces résidus se regroupent par trois paquets en fonction de la température.

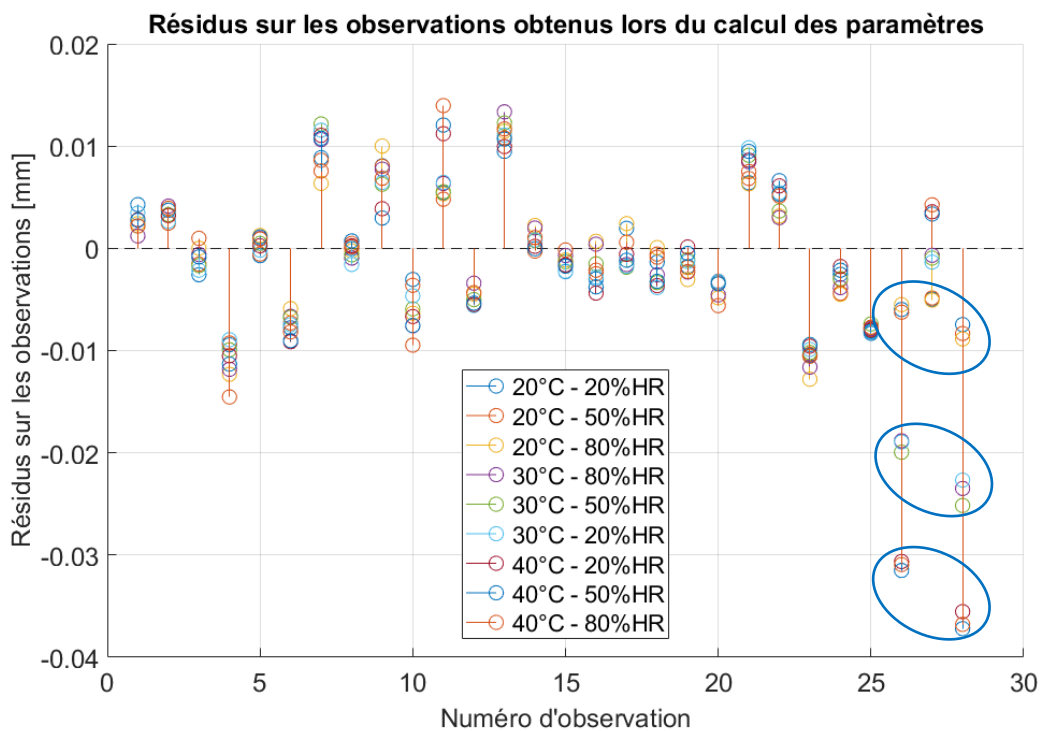


FIG. 29 — Résidus sur les observations obtenus pour chaque couple température – humidité lors du calcul des paramètres pour le capteur W2D-7DE-015. On distingue bien les résidus élevés pour la position du fil verticale en A et B, regroupés en fonction de la température dans les ellipses bleues.

Les calculs pour les deux autres capteurs étudiés W2D-7DE-019 et W2D-7D7-021 donnent des résidus légèrement supérieurs (jusqu'à 30 micromètres) pour les 24 observations des capteurs. Concernant les résidus sur la position du fil aux extrémités, le comportement est le même.

Sachant qu'ils semblent liés à la température, ces résidus pourraient provenir de la dilatation thermique du banc ou d'une partie de ses éléments. En effet, les différents tests sur le banc lors de sa conception ont seulement permis de contrôler qu'il reprenait sa position initiale une fois revenu à la même température. Même si le banc est majoritairement en

marbre et en invar, des matériaux ayant un faible coefficient de dilatation thermique, il est possible que certaines parties se dilatent en chauffant. Les paramètres selon l'axe vertical déterminés ci-après sont peut-être entachés de cette erreur.

III.6.2 Paramètres déterminés

Les huit paramètres ont été calculés pour chaque capteur et chaque couple température – humidité (voir le TABLEAU 8). Les paramètres X_A , Z_A , X_B et Z_B étant secondaires, seuls les paramètres λ_X , λ_Z , τ_X et τ_Z sont présentés ci-après. Ces derniers correspondent à la correction de l'impact de la température et de l'humidité sur le capteur. Les incertitudes-types a posteriori de ces paramètres sont respectivement de ± 1800 ppm, ± 2300 ppm, ± 3 μm et ± 4 μm .

Compte-tenu de ces incertitudes, nous pouvons déjà observer que les facteurs d'échelle semblent égaux pour les deux axes du capteur. De plus, pour un couple température – humidité donné, on retrouve, à l'incertitude-type près, les mêmes valeurs de facteur d'échelle pour les trois capteurs étudiés. Il est en effet très probable que les impacts de la température et de l'humidité soient identiques quel que soit le capteur, ce dernier étant un élément passif sans composant électronique. Concernant les deux paramètres de translation, la translation transversale n'est pas significativement impactée par les variations de température ou d'humidité. La translation verticale semble évoluer en fonction de la température et de l'humidité, toutefois cette translation est probablement impactée par la possible dilatation du banc expliquée précédemment.

En utilisant la moyenne des paramètres fournis par chaque capteur, nous pouvons tenter de trouver une fonction reliant le taux d'humidité relative et un des facteurs d'échelle, pour chaque palier de température. Les facteurs d'échelle peuvent alors être modélisés par une fonction linéaire selon la température (voir la FIG. 30). Un nombre de paliers d'humidité plus important permettrait de confirmer cette tendance linéaire ou de nous orienter vers une tendance polynomiale. En calculant le coefficient directeur de cette courbe de tendance linéaire, nous obtenons un impact moyen de 160 ppm / % d'humidité relative. Cette valeur est le double de la première approximation réalisée lors des tests des conditionneurs mais ces derniers se sont déroulés avec de faibles amplitudes de température et d'humidité. Il faut également noter que le fil utilisé lors des tests des conditionneurs n'est pas issu de la même bobine que les tests réalisés en chambre climatique.

TABLEAU 8 — Paramètres de correction de l'impact de la température et de l'humidité calculés pour chaque couple température – humidité et chaque capteur

T [°C]	HR [%]	λ_x [ppm]	λ_z [ppm]	τ_x [μm]	τ_z [μm]	Capteur
20	20	-200	-200	3	-10	W2D-7DE-015
		-2800	500	-8	-9	W2D-7DE-019
		-600	-2000	-3	-7	W2D-7D7-021
20	50	-2800	-2700	3	-9	W2D-7DE-015
		-5100	-1800	-8	-8	W2D-7DE-019
		-2800	-4300	-3	-5	W2D-7D7-021
20	80	-9000	-9000	2	-6	W2D-7DE-015
		-11200	-7800	-8	-4	W2D-7DE-019
		-8300	-10000	-4	0	W2D-7D7-021
30	80	-11600	-11600	2	-8	W2D-7DE-015
		-13900	-10500	-8	-6	W2D-7DE-019
		-11000	-12600	-5	-3	W2D-7D7-021
30	50	-5200	-5000	2	-12	W2D-7DE-015
		-7400	-4300	-8	-11	W2D-7DE-019
		-5100	-6500	-4	-7	W2D-7D7-021
30	20	-300	-300	3	-13	W2D-7DE-015
		-2700	500	-8	-13	W2D-7DE-019
		-800	-1900	-4	-10	W2D-7D7-021
40	20	-100	-200	2	-18	W2D-7DE-015
		-2400	600	-8	-17	W2D-7DE-019
		-500	-2000	-3	-15	W2D-7D7-021
40	50	-4500	-4500	1	-17	W2D-7DE-015
		-6400	-3500	-8	-17	W2D-7DE-019
		-4600	-6000	-4	-12	W2D-7D7-021
40	80	-11900	-11900	1	-12	W2D-7DE-015
		-13300	-10400	-8	-11	W2D-7DE-019
		-11000	-13000	-4	-6	W2D-7D7-021
Incertitudes-types :		± 1800 ppm	± 2300 ppm	± 3 μm	± 4 μm	

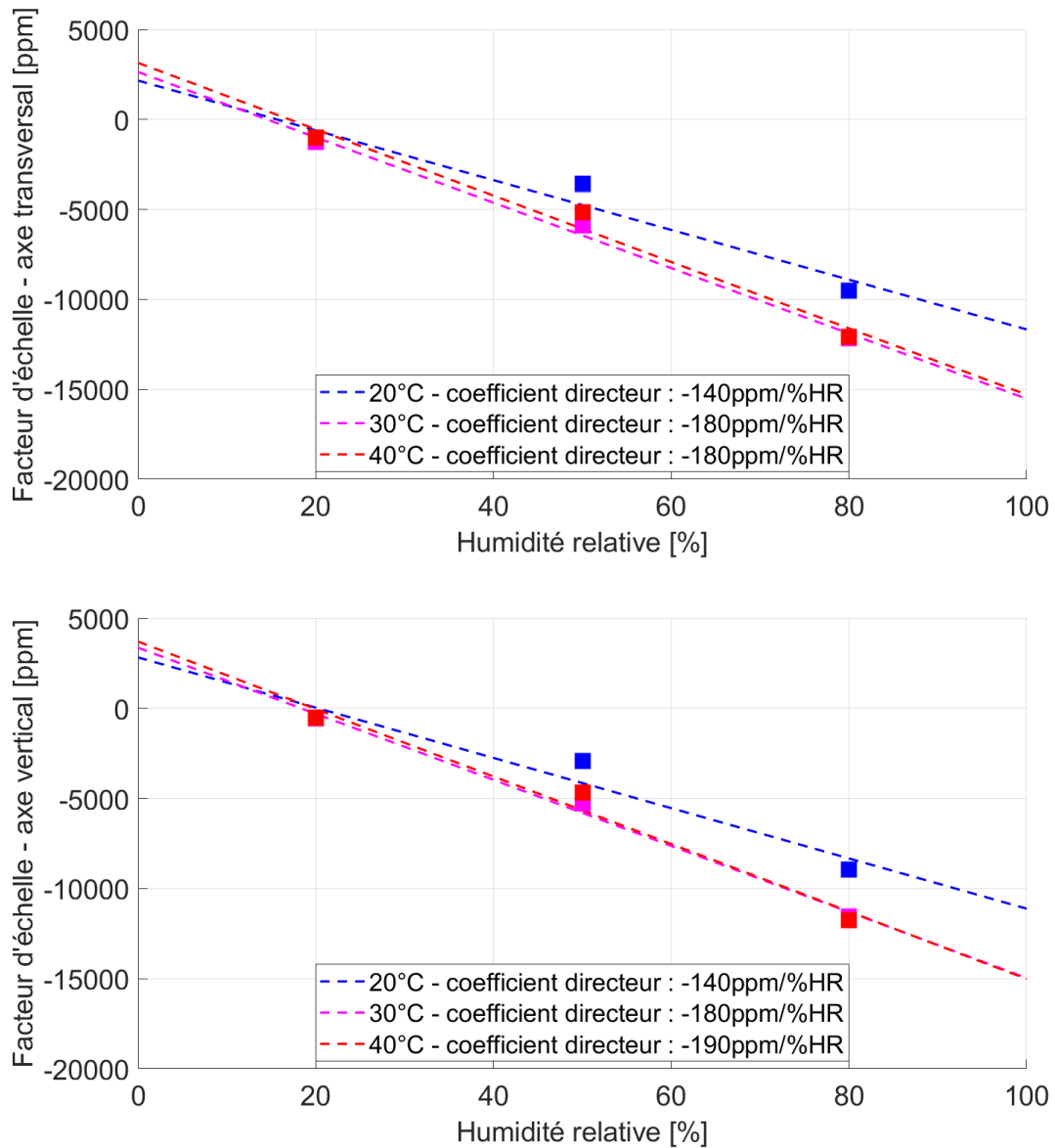


FIG. 30 — Modélisation du facteur d'échelle transversal moyen et du facteur d'échelle vertical moyen par une fonction linéaire. Il s'agit ici de la modélisation de la correction de l'impact de la température et de l'humidité sur le capteur.

Les changements de température semblent avoir un léger impact sur les facteurs d'échelle mais en étant à la limite de l'incertitude-type des paramètres. Il semblerait toutefois que la température n'a pas plus d'impact à 40°C qu'à 30°C. Le faible nombre de paliers de température ne nous permet pas non plus d'approfondir cette hypothèse.

III.6.3 Perspectives et tests à réaliser

Les tests en chambre climatique ont permis de calculer une première approche des impacts de la température et de l'humidité sur les mesures des systèmes WPS. Toutefois,

plusieurs difficultés ont été rencontrées et ne permettent pas d'affiner les résultats, ni de confirmer l'évolution de ces impacts.

Une des premières étapes à la suite de ce travail de fin d'études sera d'effectuer plusieurs opérations sur les capteurs :

- Nettoyer les électrodes et les connectiques des capteurs. Les changements d'humidité et de température en enceinte confinée ont pu former de la condensation et amener des impuretés ;
- Mesurer la position du fil avec les capteurs étudiés sur les douze positions du banc et sur les positions des références, à 20°C et humidité constante. Il sera ensuite possible de recalculer, pour chaque capteur, si la position du fil mesurée forme une ligne droite ;
- Réaliser les étalonnages relatifs et absolus des capteurs afin de vérifier que les tests n'ont pas affecté les capteurs.

Ensuite, une nouvelle mesure des coordonnées des billes du banc par machine à mesurer tridimensionnelle devra être prévue. Elle permettra de confirmer ou non la présence d'une erreur dans le premier fichier de coordonnées des billes. Une mesure du banc à 40°C permettrait également d'observer s'il se dilate, ce qui pourrait expliquer les résidus obtenus sur la position verticale du fil aux extrémités.

Enfin, plusieurs tests dans la chambre climatique pourront être réalisés pour améliorer les résultats et les connaissances sur les systèmes WPS :

- Réaliser un test avec un nombre plus important de paliers de température et d'humidité afin de confirmer l'évolution linéaire des impacts de l'humidité et de confirmer les effets de la température observés. Ces paliers pourraient également être plus longs afin de s'assurer que les lectures des captures soient bien stabilisées ;
- Réaliser des tests avec un fil de matériau différent. L'utilisation d'un fil métallique monobrin en Cuivre-Béryllium pourrait permettre d'obtenir des résultats uniquement liés au capteur. En effet, nos tests permettent d'obtenir des impacts sur le capteur et le fil utilisé. Ce dernier se compose d'une âme multibrin en Carbone entourée d'une gaine tressée en Kevlar. Il est possible que cette conception multibrin puisse être fortement impactée par l'humidité ;

- Réaliser des tests avec d'autres capteurs afin de confirmer que les résultats obtenus sont identiques quel que soit le capteur.

Il sera également indispensable de définir un nouveau modèle fonctionnel pour le calcul par la méthode des moindres carrés des paramètres. La corrélation de ces derniers ne devra pas y être trop élevée afin d'obtenir des précisions convenables. Un modèle faisant intervenir l'ensemble des observations à tous les paliers de température et d'humidité et les valeurs de ces derniers est peut-être à envisager.

Conclusion

La section *High Precise Alignment Technologies* du CERN étudie l'utilisation du système de mesure WPS pour la mise en œuvre d'alignements plus fins nécessaires à de futurs accélérateurs. Ce mémoire permet d'améliorer les connaissances sur ce dispositif au travers de l'étude des impacts de la température et de l'humidité sur le capteur.

Avant cela, nous avons pu confirmer les effets de la température sur les conditionneurs observés en 2019. L'expérience réalisée à cette occasion nous a offert la possibilité d'une première approche de l'impact de la température et de l'humidité sur les capteurs.

Les capteurs ont ensuite pu être testés de façon plus approfondie grâce à une série de tests réalisés dans une chambre climatique permettant le contrôle de la température et de l'humidité. Malgré les différentes difficultés rencontrées lors du traitement des données, il a été possible de calculer un ordre de grandeur de l'impact de la température et de l'humidité sur les capteurs. Cet impact, estimé à environ 160 ppm pour une augmentation de 1 % de l'humidité relative, n'est pas négligeable. En effet, dans un tunnel où le taux d'humidité est de 70 %, la mesure faite par un capteur étalonné à 30 % d'humidité relative serait entachée d'une erreur de 13 micromètres si le fil n'est pas au centre du capteur de 2 mm. Cette erreur étant à la limite du budget d'erreur du projet CLIC, il serait indispensable de prendre en compte le taux d'humidité dans les mesures de déplacements des composants de l'accélérateur.

Les prochaines étapes seront de résoudre les différents problèmes rencontrés lors des tests et de poursuivre ces derniers avec d'autres capteurs et d'autres types de fil. Ces essais permettront de confirmer une tendance unique pour l'ensemble des capteurs et permettront d'évaluer l'incidence du fil en particulier sur les impacts de l'humidité. Une fois ceci réalisé, et grâce aux précédents travaux, nous disposerons d'une idée globale de l'influence de la température et de l'humidité sur les principaux éléments du système de mesure WPS : le capteur, le conditionneur et les câbles.

Ce travail de fin d'études m'a fait découvrir le passionnant monde de la recherche. Les enjeux rencontrés sont particulièrement intéressants et nécessitent une certaine adaptation pour résoudre les difficultés croisées au fur et à mesure des expérimentations réalisées. Travailler au sein d'une équipe pluridisciplinaire est un atout majeur pour la recherche des solutions les plus adaptées.

Bibliographie

1. **CERN.** Grand accélérateur de hadrons. *CERN*. [En ligne] [Citation : 03 04 2020.] <https://home.cern/fr/science/accelerators/large-hadron-collider>.
2. *Sensors of the HPA section.* **HERTY, Andreas.** 24/03/2020. HPA newcomers sessions.
3. **CERN.** Compact Linear Collider. [En ligne] [Citation : 19 06 2020.] <http://clic-study.web.cern.ch>.
4. **Organisation européenne pour la recherche nucléaire.** *The Compact Linear Collider (CLIC) – Project Implementation Plan.* Genève : CERN, 2018. CERN-2018-010-M.
5. **MARIN, Antonio.** *WPS Torsadage CERN des câbles MULRAD et nouveaux câbles MULRAD.* Genève : CERN, 2013. EDMS 1310710.
6. **WATRELOT, Léonard.** *Impact de la température sur le dispositif de mesure WPS.* Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Le Mans : École supérieure des géomètres et topographes, 2019. Mémoire d'ingénieur.
7. **TOUZÉ, Thomas.** *Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC.* Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Paris : Université de Paris-Est, 2011. p. 190, Thèse de doctorat.
8. **MAINAUD, Hélène.** *Une nouvelle approche métrologique : l'écartométrie biaxiale. Application à l'alignement des accélérateurs de particules.* Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Strasbourg : Université Louis Pasteur, 1996. Thèse de doctorat.
9. **SCHOTT GUILMAULT, Vladimir.** *Détermination précise de la flèche d'un fil tendu.* Organisation européenne pour la recherche nucléaire. Champs-sur-Marne : École nationale des sciences géographiques, 2017. Mémoire d'ingénieur.
10. **RUDE, Vivien.** *Validation of the accuracy of cWPS.* Genève : Organisation européenne pour la recherche nucléaire, 2018. Rapport technique. EDMS 1891580.
11. —. *Procédure : Banc absolu cWPS.* Genève : Organisation européenne pour la recherche nucléaire, 2013. Procédure. EDMS 1529692.
12. **MAINAUD DURAND, Hélène.** *Transformation des fichiers de calibration des WPS2 fournis par FOGALE en des coefficients directement utilisables sous MSM et Excel.* Genève : Organisation européenne pour la recherche nucléaire, 2002. Procédure de calcul. EDMS 359001.
13. **DURAND, Stéphane.** *Topométrie de précision IG4.* Le Mans : École supérieure des géomètres et topographes, 2019. Cours.

Table des annexes

ANNEXE 1 Modification apportée sur le dispositif d'étude de l'impact de la température des conditionneurs WPS	57
ANNEXE 2 Étude des déplacements du fil sur le banc d'étalonnage relatif au cours des tests sur les conditionneurs WPS	58
ANNEXE 3 Dérivées partielles de l'équation d'observation utilisée pour le calcul de l'impact de la température et de l'humidité sur les capteurs	60

ANNEXE 1

Modification apportée sur le dispositif d'étude de l'impact de la température des conditionneurs WPS

Lors de la modélisation des surfaces polynomiales du second degré servant à la correction de l'influence des variations de température et d'humidité de l'air ambiant lors de l'étude des conditionneurs, les premiers résultats présentaient des résidus trop élevés par rapport à l'incertitude de détermination des paramètres. Cette observation ayant été faite durant la période de confinement causée par la maladie à coronavirus, il a fallu attendre la reprise des activités sur site afin de pouvoir observer le dispositif et faire d'éventuelles améliorations.

Le banc d'étalonnage utilisé dans ce dispositif possède une pièce en forme de « V » afin de guider le fil (voir la FIG. 31). Cet élément crée un troisième point de contact sur le fil (les deux autres étant l'ancrage du fil et la poulie du côté du poids) qui ne forme plus systématiquement une ligne droite dans le plan horizontal et une chaînette dans le plan vertical. Nous avons fait le choix de retirer cet élément et les résultats qui ont suivi sont devenus plus satisfaisants.

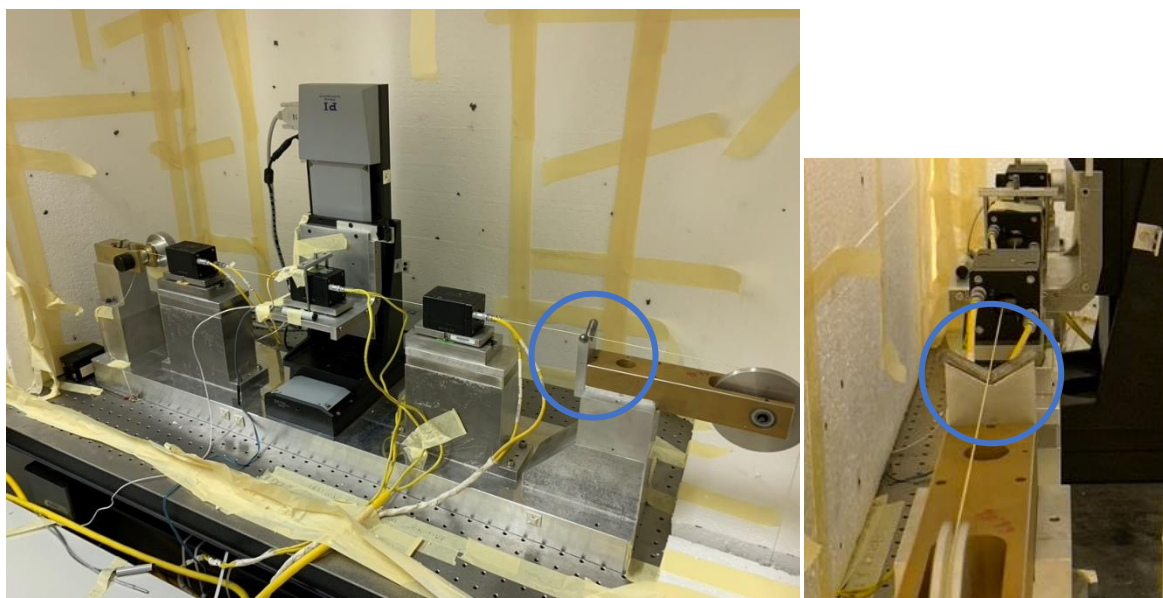


FIG. 31 — Banc d'étalonnage utilisé dans le dispositif d'étude des conditionneurs. Entourée en bleu, la pièce en « V » créant un troisième point de contact du fil.

ANNEXE 2

Étude des déplacements du fil sur le banc d'étalonnage relatif au cours des tests sur les conditionneurs WPS

Les tests sur les conditionneurs WPS ont fait intervenir une succession d'étalonnages relatifs d'un capteur placé sur une table à déplacement. Deux capteurs WPS étaient installés sur ce banc, à des positions fixes de part et d'autre du capteur étalonné (voir la FIG. 10). Ces capteurs avaient pour objectif d'enregistrer les éventuels déplacements du fil se faisant au cours du temps et qui pourraient avoir un impact sur la comparaison de deux étalonnages, en particulier les deux paramètres de translation.

Les déplacements observés par ces capteurs (voir la FIG. 32) ne sont probablement pas de véritables déplacements du fil au cours du temps. En effet, on observe facilement la corrélation entre ces déplacements avec les évolutions de température et d'humidité (voir la FIG. 15) dans la pièce. Ces paramètres environnementaux influent les mesures du capteur en cours d'étalonnage sur la table à déplacement, mais aussi les mesures des deux capteurs dits « de référence ».

Alors que l'on corrige ces variations de température et d'humidité dans la pièce à partir des données acquises lorsque le conditionneur est à 20°C pour le capteur étalonné, cela n'est pas possible pour ces capteurs de référence puisque leurs conditionneurs subissent aussi ces variations et ne sont que trop peu de fois à 20°C pour établir un modèle. Toutefois, étant donné que la courbe conserve la même tendance que les paramètres environnementaux de la pièce, nous pouvons considérer le fil comme fixe. Les pics sur le déplacement transversal observé par le capteur de référence n° 1 entre les étalonnages n° 300 et n° 600 pourraient correspondre à un déplacement du fil, mais l'absence de la même observation par le capteur de référence n° 2 laisse penser qu'il ne s'agit que d'une erreur de mesure du capteur.

Il est toutefois intéressant de noter que Touzé (7) avait observé des phénomènes de corrélation entre la flèche du fil et l'humidité lors des expériences menées en 2009 dans le tunnel TT1. Des déplacements verticaux du fil avaient été observés sur de grandes longueurs de fil. Cela pourrait s'expliquer par des changements de la masse linéique du fil en fonction de son taux d'humidité, augmentant ainsi sa flèche. Compte tenu de la faible longueur de fil utilisée sur le banc d'étalonnage relatif, il faudrait une augmentation de 40 % de la masse

linéique du fil pour observer un déplacement de 1 micromètre ce qui exclut cette possibilité de variations de la flèche du fil dans notre dispositif.

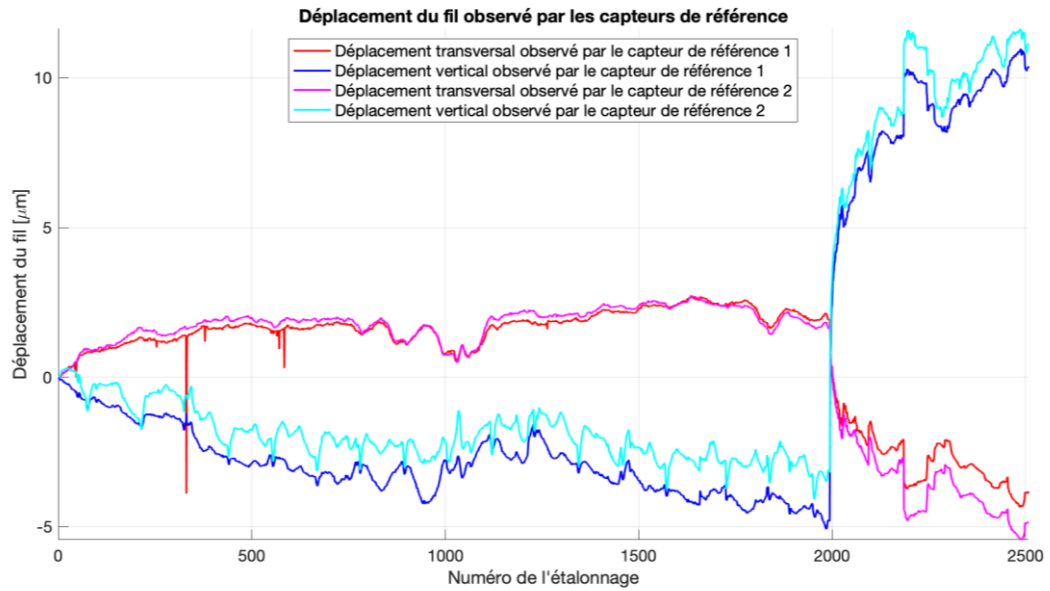


FIG. 32 — Déplacements, selon les deux composantes, du fil observé par les capteurs de référence situés de part et d'autre du capteur en cours d'étalonnage (voir la FIG. 10).

ANNEXE 3

Dérivées partielles de l'équation d'observation utilisée pour le calcul de l'impact de la température et de l'humidité sur les capteurs

Pour une observation i :

$$\frac{dl_i^c}{d\lambda_x} = \begin{bmatrix} -\lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \times \left(r_c^{3bt} \times \left(R_{3b}^{bt} \times \left(A + (B - A) \times \frac{d_i}{D} - T^b \right) - t^{3b} \right) - \tau^c \right)$$

$$\frac{dl_i}{d\lambda_z} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times \left(r_c^{3bt} \times \left(R_{3b}^{bt} \times \left(A + (B - A) \times \frac{d_i}{D} - T^b \right) - t^{3b} \right) - \tau^c \right)$$

$$\frac{dl_i}{d\tau_x} = \begin{bmatrix} -\lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dl_i}{d\tau_z} = \begin{bmatrix} -\lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -\lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dl_i}{dX_A} = \begin{bmatrix} \lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times r_c^{3bt} \times R_{3b}^{bt} \times \left(1 - \frac{d_i}{D} \right) \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dl_i}{dZ_A} = \begin{bmatrix} \lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times r_c^{3bt} \times R_{3b}^{bt} \times \left(1 - \frac{d_i}{D} \right) \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dl_i}{dX_\Delta} = \begin{bmatrix} \lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times r_c^{3bt} \times R_{3b}^{bt} \times \frac{d_i}{D} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\frac{dl_i}{dZ_\Delta} = \begin{bmatrix} \lambda_x^c & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z^c \end{bmatrix}^{-1} \times r_c^{3bt} \times R_{3b}^{bt} \times \frac{d_i}{D} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Liste des figures

FIG. 1 — Représentation schématique du CLIC (3).....	10
FIG. 2 — Représentation du budget d'erreur pour l'alignement des composants du CLIC (4)	11
FIG. 3 — À gauche, capteur WPS Fogale Nanotech fermé. Au centre, partie inférieure du capteur ouvert où l'on distingue les deux électrodes de couleur or. À droite, vue schématique en coupe d'un capteur.	12
FIG. 4 — Conditionneur de marque Fogale Nanotech. Le circuit électronique est placé dans un boîtier hermétique. Le capteur est relié par une paire de câbles et le conditionneur est relié au système d'acquisition par un unique câble.	13
FIG. 5 — Schéma de principe du fonctionnement d'un condensateur plan	14
FIG. 6 — Schéma du système de centrage.....	15
FIG. 7 — Vue en coupe des quatre positions successives du capteur (en bleu) sur le banc d'étalonnage absolu. Le point jaune correspond au fil considéré immobile.	17
FIG. 8 — Translations et facteurs d'échelles en fonction de la température du conditionneur observés en 2019 (6).....	19
FIG. 9 — Schéma d'installation du dispositif expérimental utilisé. La température et l'humidité sont différentes dans la pièce et dans la chambre thermique.	20
FIG. 10 — Banc d'étalonnage relatif du dispositif d'étude des conditionneurs. Le capteur en cours d'étalonnage (entouré en bleu) est placé sur la table à déplacement et les capteurs de référence (entourés en rouge) sont situés de part et d'autre sur des supports fixes. Le fil traverse les capteurs et est tendu par un poids sous la poulie.	20
FIG. 11 — Chambre thermique dans laquelle est placé le conditionneur testé (encadré en bleu)....	21
FIG. 12 — Évolution de la température de la chambre thermique en fonction du numéro de l'étalonnage lors du test de l'électronique W2D-7E1-016.....	21
FIG. 13 — À gauche, grille régulière en volts. À droite, grille obtenue après passage en millimètres grâce aux polynômes.	23
FIG. 14 — Détermination de la transformation géométrique entre les grilles calculées d'après deux étalonnages différents (la première en bleu et la seconde en rouge)	24
FIG. 15 — Valeurs du facteur d'échelle selon l'axe transversal sans correction en fonction des étalonnages effectués. Tandis que le motif formé par les valeurs du paramètre devrait se répéter selon la température du conditionneur (graphique du bas), on observe une dérive en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant au niveau du capteur (graphique du milieu).....	25
FIG. 16 — Évolution du facteur d'échelle transversal et de l'humidité au niveau du capteur. La flèche rouge montrant le début d'un changement d'humidité, on observe bien que le paramètre commence à varier avec du retard (flèche bleue).	25
FIG. 17 — Surface de correction modélisée en fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant pour le paramètre d'échelle selon l'axe transversal. Les données utilisées sont celles obtenues à partir des étalonnages effectués à une température du conditionneur de 20°C (voir	

la FIG. 12). Les résidus de modélisation sont pour la plupart contenus entre -130 ppm et 130 ppm, incertitudes-types a priori à 2σ de notre paramètre.	26
FIG. 18 — Valeurs du facteur d'échelle selon l'axe transversal en fonction des étalonnages effectués après correction des paramètres environnementaux de l'air ambiant précédemment modélisés. On observe alors une meilleure répétabilité entre chaque cycle de variation de la température du conditionneur, contrairement à la FIG. 15.....	27
FIG. 19 — Distribution des résidus de modélisation des surfaces pour la correction des paramètres environnementaux de l'air ambiant dans la pièce. Les écarts-types à 2σ obtenus sont cohérents avec les écarts-types a priori à 2σ sur les paramètres ($\pm 2 \mu\text{m}$ pour les translations et ± 130 ppm pour les facteurs d'échelle).....	28
FIG. 20 — Résultats des paramètres estimés caractérisant l'impact de la température sur le conditionneur W2D-7E1-016	29
FIG. 21 — Banc conçu en 2019 permettant douze positions de capteurs (6). Les pastilles numérotées correspondent aux 14 points de mesure pour le contrôle de la déformation du banc expliqué ci-après.	31
FIG. 22 — Vue 3D du dessous du banc et des éléments de renfort ajoutés (illustration T. Blaszczyk)	32
FIG. 23 — Champ de déformation du banc après le premier cycle thermique calculé grâce à un script Matlab sur la base des positions mesurées (voir la FIG. 21). On y observe une torsion du banc probablement expliquée par une réorganisation des contraintes à la suite de l'ajout des éléments de renforcement.....	34
FIG. 24 — Nouveau banc constitué des pièces en acier invar collées sur une poutre en marbre. Les 42 billes en céramique des interfaces ont dû être mesurées avec une grande précision par le service métrologie du CERN.....	35
FIG. 25 — Les quatre positions possibles du capteur sur un support en « L ». La stabilité du capteur est assurée par un aimant situé sous son embase.....	36
FIG. 26 — Banc équipé des capteurs dans la chambre climatique	37
FIG. 27 — Système d'acquisition des données et cave de mise en température contenant les conditionneurs	38
FIG. 28 — Trois types de repères différents sont présents sur le banc : le repère du capteur R^{capteur} , les repères des interfaces 3-billes $R^{3\text{-billes}}$ et le repère du banc R^{banc}	39
FIG. 29 — Résidus sur les observations obtenus pour chaque couple température – humidité lors du calcul des paramètres pour le capteur W2D-7DE-015. On distingue bien les résidus élevés pour la position du fil verticale en A et B, regroupés en fonction de la température dans les ellipses bleues.....	48
FIG. 30 — Modélisation du facteur d'échelle transversal moyen et du facteur d'échelle vertical moyen par une fonction linéaire. Il s'agit ici de la modélisation de la correction de l'impact de la température et de l'humidité sur le capteur.	51
FIG. 31 — Banc d'étalonnage utilisé dans le dispositif d'étude des conditionneurs. Entourée en bleu, la pièce en « V » créant un troisième point de contact du fil.....	57
FIG. 32 — Déplacements, selon les deux composantes, du fil observé par les capteurs de référence situés de part et d'autre du capteur en cours d'étalonnage (voir la FIG. 10).....	59

Liste des tableaux

TABLEAU 1 — Impacts de la température sur le conditionneur W2D-7E1-016	29
TABLEAU 2 — Première approximation des impacts de la température et de l'humidité sur le capteur W2D-7E1-016.....	30
TABLEAU 3 — Valeurs de température et d'humidité pour l'étude des capteurs WPS	37
TABLEAU 4 — Résultats du calcul des paramètres par la méthode des moindres carrés non linéaires à partir des observations simulées. La solution calculée correspond aux paramètres fixés lors de la simulation.....	44
TABLEAU 5 — Corrélations entre les différents paramètres recherchés lors du calcul de la simulation	45
TABLEAU 6 — Corrélations entre les différents paramètres recherchés avec la position du fil dans les observations	45
TABLEAU 7 — Erreurs de répétabilité en millimètres après répétition d'un cycle climatique. En orange, les trois maximums, toujours à un taux d'humidité relative de 80 %.....	47
TABLEAU 8 — Paramètres de correction de l'impact de la température et de l'humidité calculés pour chaque couple température – humidité et chaque capteur.....	50

Impact de la température et de l'humidité sur les systèmes de mesure WPS (Wire Positioning System)

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2020

RÉSUMÉ

Le CERN utilise la méthode du fil tendu depuis de longues années pour l'alignement des composants des accélérateurs. Les systèmes de mesure capacitifs WPS (Wire Positioning System) permettent de mesurer, à des résolutions sub-micrométriques, des déplacements selon deux axes orthogonaux par rapport au fil tendu servant de référence.

La température et l'humidité sont deux paramètres connus comme ayant une influence sur les mesures WPS. Les tolérances d'alignement demandées jusqu'à présent n'imposaient pas de considérer ces paramètres. Leur prise en compte devient dorénavant indispensable pour garantir les alignements nécessaires aux futurs accélérateurs. Des essais en chambre climatique ont permis d'étudier l'impact de la température et de l'humidité sur les systèmes WPS.

Mots clés : CERN, WPS, capteur, température, humidité, fil, alignement, accélérateur, écartométrie, topométrie de précision.

SUMMARY

CERN has been using the stretched wire method for many years for the alignment of accelerator components. Capacitive Wire Positioning Systems (WPS) are used to measure transversal offsets with respect to a stretched wire within a sub-micrometric resolution.

Temperature and humidity are two known parameters to influence WPS measurements. The alignment tolerances requested until now did not require these parameters to be considered. Their consideration is now becoming essential to ensure the necessary alignments for the future accelerators. The impact of temperature and humidity on the WPS systems was investigated through tests in climatic chamber.

Key words: CERN, WPS, sensor, temperature, humidity, wire, alignment, accelerator, offset measurement, metrology.