



HAL
open science

Impact de la température sur le dispositif de mesure WPS

Léonard Watrelot

► **To cite this version:**

| Léonard Watrelot. Impact de la température sur le dispositif de mesure WPS. Sciences de l'ingénieur
| [physics]. 2019. dumas-02959755

HAL Id: dumas-02959755

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02959755v1>

Submitted on 7 Oct 2020

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

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

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

MEMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Léonard WATRELOT

Impact de la température sur le dispositif de mesure WPS

Soutenu le 05/09/2019

JURY

PRÉSIDENT : M. Ghyslain FERRÉ

MEMBRES : M. Vivien RUDE, maître de stage
M. José CALI, professeur référent
M. Stéphane DURAND

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de ce travail de fin d'études.

En tout premier lieu, je remercie Vivien RUDE, mon maître de stage qui a su m'aiguiller tout au long de ce projet, n'hésitant jamais à prendre du temps pour me transmettre savoir et conseils.

Je remercie mon professeur référent, José CALI pour m'avoir encadré durant cette période.

Je remercie également Hélène MAINAUD DURAND, Michael UDZIK, Kamil KUCCEL, Mateusz SOSIN, Tomasz PIOTR BLASZCZYK et Andreas HERTY pour le temps passé à transmettre leurs connaissances et au suivi de ce projet.

Enfin, j'aimerais remercier l'ensemble de la section pour leur sympathie et l'accueil chaleureux qu'ils m'ont apportés.

Liste des abréviations

- SPS : Super Proton Synchrotron, Super Synchrotron à Protons
- LHC : Large Hadron Collider, Grand collisionneur de hadrons
- cWPS: Capacitive Wire Positioning System, Écartomètre à fil capacitif
- oWPS : Capacitive Wire Positioning System, Écartomètre à fil optique
- HLS : Hydrostatic Levelling System, Système de mesure par nivellement Hydrostatique
- DOMs: Distance Offset Measurement Sensor, Capteur de mesure de distance
- FSI : Frequency Scanning Interferometry, Interféromètre à balayage de fréquence
- CLIC : Compact Linear Collider, Collisionneur linéaire compact
- CERN : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
- CMS : Compact Muon Solenoid, Solénoïde compact pour muons
- LHCb: Large Hadron Collider Beauty, Grand collisionneur de hadrons quark b
- ATLAS : A Toroidal LHC ApparatuS, dispositif instrumental toroïdal pour le LHC
- ALICE : A Large Ion Collider Experiment, Expérience sur un grand collisionneur d'ions
- CMM: Coordinate Measuring Machine, Machine à mesurer tridimensionnelle
- HIE-ISOLDE: High Energy and Intensity - Isotope mass Separator On-Line facility
- LEIR : Low Energy Ion Ring, Anneau d'ions de basse énergie
- PS : Proton Synchrotron, Synchrotron à protons
- TeV : Téraélectronvolt

Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations.....	3
Introduction.....	6
I L'ORGANISATION EUROPEENNE POUR LA RECHERCHE DU NUCLEAIRE	8
I.1 INTRODUCTION	8
I.2 LES ACCELERATEURS DE PARTICULES	9
I.3 LE PROJET CLIC	10
I.4 LES GEOMETRES AU SEIN DU CERN.....	11
II LE DISPOSITIF DE MESURE WPS.....	12
II.1 LE CAPTEUR WPS	12
II.1.1 Le capteur	12
II.1.2 Le système de centrage	14
II.1.3 Les câbles.....	15
II.1.4 L'électronique.....	15
II.2 LA « CALIBRATION »	17
II.2.1 La calibration relative	18
II.2.1.1 Déroulement	18
II.2.1.2 Calcul	20
II.2.2 La calibration absolue	21
III LA DEMARCHE EXPERIMENTALE.....	23
III.1 DEMARCHE POUR LES ELECTRONIQUES ET LES CABLES	23
III.2 DEMARCHE THEORIQUE POUR LES CAPTEURS	35
III.2.1 Tentative de modification du modèle.....	36
III.2.2 Calcul d'ajustement des corrections de la température	37
III.3 RESULTATS	41
III.3.1 Électroniques.....	41
III.3.2 Câbles.....	44
III.3.3 Capteurs	46
III.3.3.1 Premiers tests.....	46
III.3.3.1.1 Temps de dilatation.....	46
III.3.3.2 Le banc en Invar	48
III.3.3.2.1 Vérification de la ligne droite.....	49
III.3.3.3 Problèmes rencontrés	51
III.3.3.3.1 Déformation de la table optique	51
III.3.3.3.2 Stabilisation du capteur de référence.....	54
IV PISTES DE TESTS COMPLEMENTAIRES	56
IV.1.1 Tests relatifs aux câbles	56
IV.1.2 Tests relatifs aux électroniques	56
IV.1.3 Tests relatifs aux capteurs	56
IV.1.3.1 Impact de l'humidité sur le fil	57
IV.1.3.2 Impact de l'humidité est de la température sur les capteurs	57
Conclusion.....	58
Bibliographie	60
Table des annexes.....	62
Annexe 1 Tentative de changement de modèle	63

Annexe 2 Exemple d'application de modèle pour corriger les impacts de la température .	67
Annexe 3 Définition du repère du banc Invar	69
Liste des figures.....	72
Liste des tableaux	74

Introduction

Le CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire) est le plus grand laboratoire de physique du monde. Il a pour mission principale d'étudier les lois fondamentales de l'univers. Il a notamment permis de prouver l'existence d'une nouvelle particule, le boson de Higgs, prédite par le modèle standard de la physique quantique.

Les géomètres du CERN ont pour mission de positionner les éléments des accélérateurs et des détecteurs à des précisions inférieures au millimètre dans les différents accélérateurs de particules du CERN, notamment dans le LHC (Large Hadron Collider). Le CERN prépare également l'avenir avec des projets de recherche et de développement sur les futurs accélérateurs. Le projet CLIC (Compact Linear Collider) a pour mission d'explorer la physique découverte dans le LHC, notamment les propriétés du boson de Higgs. Cet accélérateur sera composé de deux accélérateurs linéaires de 21 km. La création de cet accélérateur nécessite un préalignement des composants à 10 micromètres près le long d'une fenêtre glissante de 200 mètres.

Afin d'atteindre cette tolérance, la méthode des fils tendus correspond aujourd'hui à la méthode la plus adaptée à ce projet. En effet, les fils tendus ont la propriété de former naturellement une ligne droite horizontalement et une chaînette verticalement. C'est grâce à cette référence que vont être alignés les différents éléments du CLIC. Afin de connaître la position du fil, des capteurs WPS (Wire Positioning System) mesurent la distance radiale et verticale jusqu'au centre du fil selon un principe capacitif. Ces capteurs nécessitent d'être étalonnés pour atteindre des précisions inférieures à 1 μm . L'étalonnage de ces capteurs se fait en salle climatisée (20 °C). Ils sont ensuite utilisés dans des zones où la température peut aller jusqu'à 40 °C (projet CLIC). Il est donc nécessaire de garantir leur fonctionnement dans ces nouvelles conditions et pas seulement à 20 °C. L'objet de ce travail de fin d'études consiste à étudier l'impact de la température sur le dispositif de mesure WPS et conclure si possible quant à leur utilisation dans un projet tel que le CLIC.

Après une présentation générale du CERN, de ses accélérateurs et du rôle des géomètres au sein de l'organisation, nous détaillerons le dispositif de mesure WPS. Nous

détaillerons ses différents composants, leur fonction puis nous décrirons leur étalonnage. Nous pourrions ensuite nous concentrer sur la démarche expérimentale et les différents résultats obtenus. À la vue de ces résultats, nous examinerons une série de pistes pour les tests futurs.

I L'organisation européenne pour la recherche du nucléaire

I.1 Introduction

Le CERN, créé en 1954, est l'aboutissement d'une volonté commune des pays européens de doter l'Europe d'un laboratoire dédié à l'étude de la physique des particules pouvant rivaliser avec ceux des grandes puissances de l'époque. Cette organisation représente également l'unification d'une Europe récemment déchirée par la guerre et tente d'endiguer la « fuite des cerveaux » vers l'Amérique. L'acronyme CERN provient du nom du Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, premier rassemblement de scientifiques en 1952 proposé par Louis de Broglie et composé notamment de Raoul Dautry, Pierre Auger, Lew Kowarski, Edoardo Amaldi et Niels Bohr. Le site de Meyrin, près de Genève, fut choisi pour accueillir le laboratoire du CERN, notamment pour sa position centrale en Europe. Il y a actuellement 23 États membres et une multitude d'États participant à des programmes du CERN, qui emploie environ 3000 personnes à plein temps et accueille 13000 scientifiques et techniciens au rythme des différentes expériences.

La mission du CERN est l'étude de l'infiniment petit grâce à la physique fondamentale. Les scientifiques sondent les minuscules composants de la matière et étudient leur interaction à l'aide d'immenses infrastructures : les accélérateurs de particules. Ces recherches (en aucun cas militaires) ont permis bon nombre d'innovations et de découvertes, comme la création du web en 1989 ou encore la découverte du Boson de Higgs en 2012 par les expériences ATLAS et CMS du LHC.

Pour toujours permettre l'innovation et la découverte, le CERN met en œuvre des moyens considérables et repousse constamment les limites des connaissances et de la technologie.

I.2 Les accélérateurs de particules

L'infrastructure la plus iconique du CERN est sans aucun doute l'immense LHC, un accélérateur de hadrons circulaire de presque 27 km de circonférence. C'est le plus puissant accélérateur de particules du monde, situé 100 m sous terre à la frontière franco-suisse.

Cet accélérateur fait partie d'un immense complexe comprenant plusieurs accélérateurs circulaires, linéaires ainsi que diverses infrastructures contenant notamment les « expériences » qui sont d'immenses capteurs étudiant les résidus des collisions de particules accélérées.

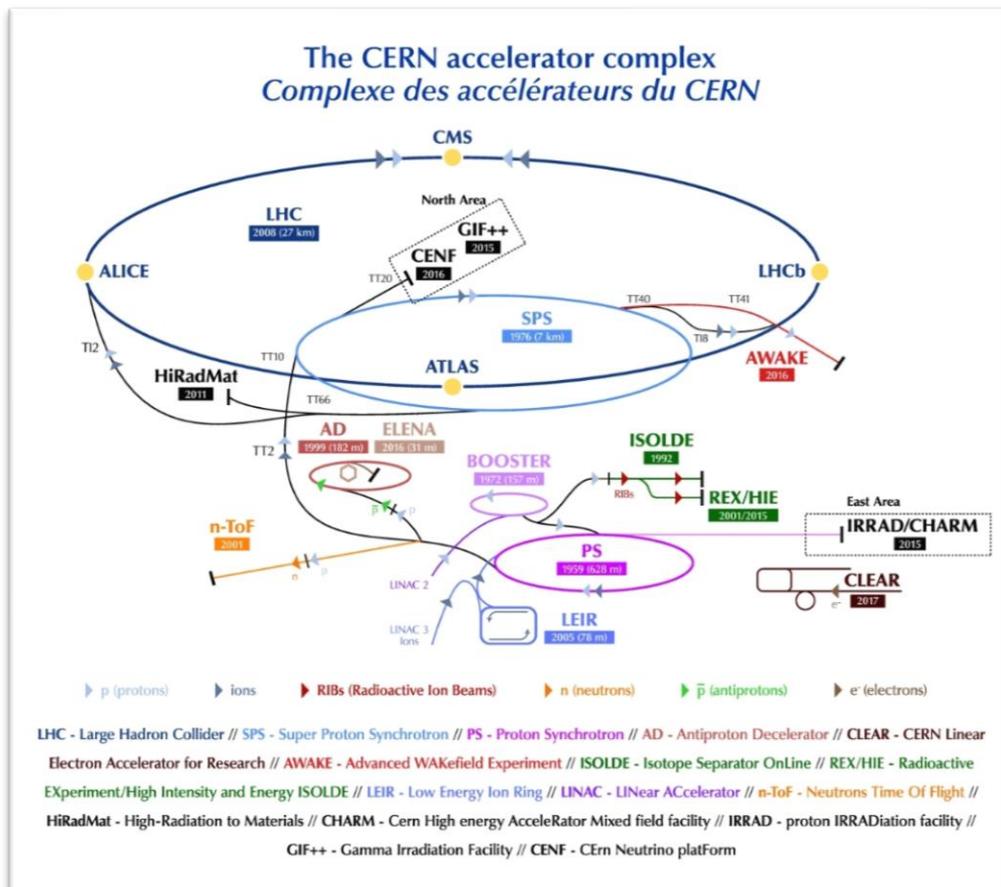


Figure 1 : Complexe d'accélérateurs du CERN (source : <http://cds.cern.ch/record/2636343>)

Ce complexe (cf. Figure 1) comprend huit accélérateurs et deux décélérateurs, qui accélèrent les particules pour des accélérateurs plus grands ou alimentent les expériences. Le LHC en est la pièce maîtresse, mais on peut également citer le PS, le SPS, le LEIR, le booster du Synchrotron à neutrons... À cela s'ajoutent les accélérateurs linéaires : les Linac 2, 3 et 4 ainsi que le HIE-ISOLDE. Les détecteurs (ATLAS, CMS, ALICE et LHCb), positionnés à des points stratégiques de ces anneaux, permettent l'observation des collisions.

Leurs différences, et donc leur complémentarité, aident à l'interprétation des résultats par les physiciens.

I.3 Le projet CLIC

Le CERN étudie actuellement de nouveaux projets d'accélérateurs de particules. Ces projets sont pensés longtemps à l'avance étant donnée la longue période de développement et de justification des fonds demandés. Certains de ces projets n'aboutissent jamais, mais leur technologie est souvent adaptée à d'autres expériences.

Le CLIC (cf. Figure 2) est un des projets actuellement étudiés. Il s'agit d'un collisionneur linéaire compact devant permettre l'exploitation des découvertes faites par le LHC. Pour ce faire, le CLIC ferait entrer en collision des électrons et des positrons à haute énergie (plusieurs TeV, un domaine d'énergie similaire à celui du LHC).

Ce projet, encore à l'étude et susceptible de n'être effectif qu'au-delà de 2040, requiert des avancées notables dans différents domaines, notamment pour le positionnement des différents éléments. Les différentes parties de l'accélérateur seront positionnées sur des poutres de quelques mètres qui seront ensuite alignées entre elles. Finalement, ces poutres devront être préalignées à une dizaine de micromètres près sur toute la longueur de l'accélérateur, qui fait 200 mètres de long, tel que le mentionne [H. MAINAUD DURAND, 2017], et ce en temps réel. À cela s'ajoutent de fortes variations de température entre le préalignement effectué en amont du passage des particules et lors du fonctionnement de la machine, ainsi qu'une exposition aux radiations issues de l'expérience. Les capteurs WPS, actuellement utilisés sur différents accélérateurs au CERN, sont étudiés afin de voir s'ils peuvent convenir pour ce projet.

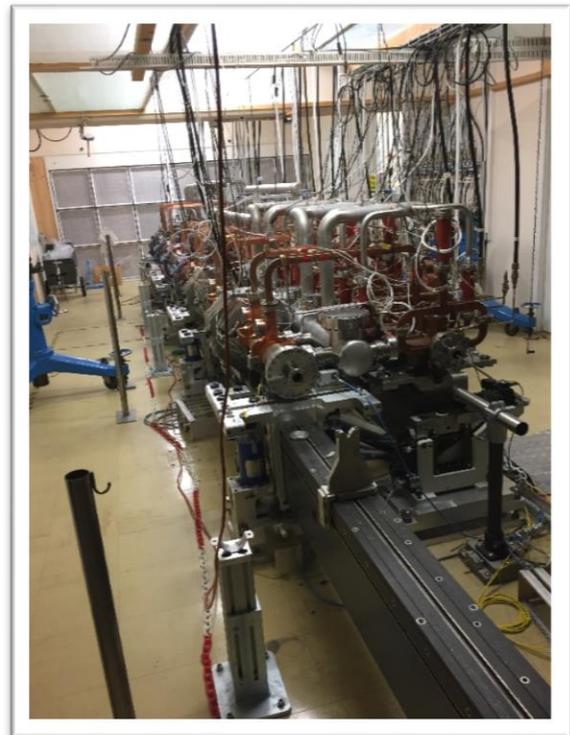


Figure 2 : Photo d'une maquette de quatre modules du CLIC

I.4 Les géomètres au sein du CERN

Le CERN comporte une section géomètre dédiée, composée d'une vingtaine de personnes. Ils travaillent en collaboration avec différents experts (mécaniciens, informaticiens et électromécaniciens...) afin d'aligner les différents éléments des accélérateurs avec du matériel à la pointe de la technologie, parfois spécialement conçu pour un chantier spécifique. Les précisions habituelles au CERN sont bien souvent supérieures à celles généralement rencontrées par le géomètre. Ainsi, ils utilisent du matériel spécialisé comme les interféromètres à la place des stations totales classiques, mais aussi des méthodes de mesures plus « exotiques » comme des mesures capacitives (sur un plan d'eau pour les HLS, sur un fil pour les WPS...) qui s'avèrent extrêmement précises et adaptées à l'alignement d'un accélérateur de particules.

II Le dispositif de mesure WPS

Les capteurs WPS (Wire Positioning System ou écartomètre à fil) (cf. Figure 3) sont utilisés à plusieurs endroits sur le site du CERN. Associés aux capteurs DOMs et HLS, ils permettent la détermination très précise de la position tridimensionnelle des objets étudiés (dipôles, quadrupôles et autres parties des accélérateurs et expériences). Les données issues du capteur en lui-même sont transmises à une électronique par des câbles spéciaux, faisant de cet ensemble capteurs/câbles/électronique un ensemble indissociable.

II.1 Le capteur WPS

II.1.1 Le capteur

Ce type de capteur permet une mesure de déplacement radial et vertical grâce à une lecture faite sur un fil le traversant. Deux technologies ont été étudiées au CERN : optique (oWPS) ou capacitive (cWPS). Cependant, étant donnée la sensibilité des capteurs optiques aux radiations, les capteurs oWPS ne sont pour l'instant pas étudiés pour ce projet. Les mesures capacitatives permettent de mesurer une distance, sans contact avec l'objet étudié. Leur fonctionnement est similaire à celui d'un

condensateur plan : la capacitance (en farads [F]) est mesurée en fonction des constantes ϵ_0 (permittivité du vide en [F/m]) et ϵ_r (permittivité relative du matériau entre les électrodes en [F/m]), de la surface S de l'électrode (en [m²]) et la distance d (en [m]) entre ces électrodes. La capacitance a alors pour équation :

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot S}{d} \quad (1)$$

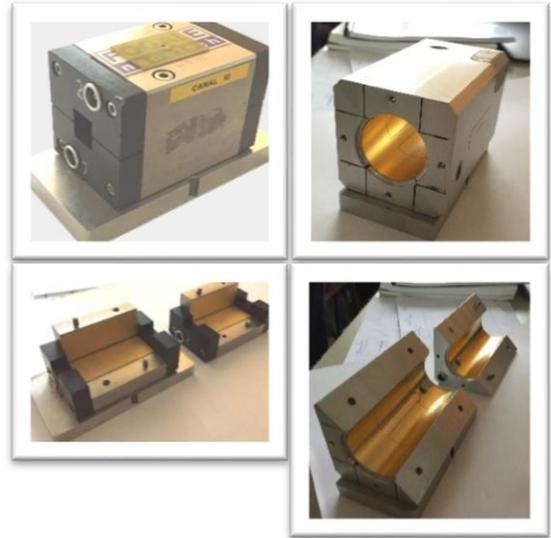


Figure 3 : Photos des deux types de capteurs WPS (fermés et ouverts) : à gauche le modèle de Fogale Nanotech, à droite le prototype du CERN

Ces capteurs sont composés de 2 paires d'électrodes. Dans le cas du capteur WPS, les condensateurs faisant la mesure sont composés d'une électrode et du fil (cf. Figure 4). C'est la position de ce fil qui est déterminée. La présence de paires d'électrodes permet un contrôle sur le fil ainsi qu'une correction du bruit. Ces capteurs, extrêmement précis, ont une fenêtre de mesure de 0.4 pF tel que le mentionne [D. De Paola, 2014].

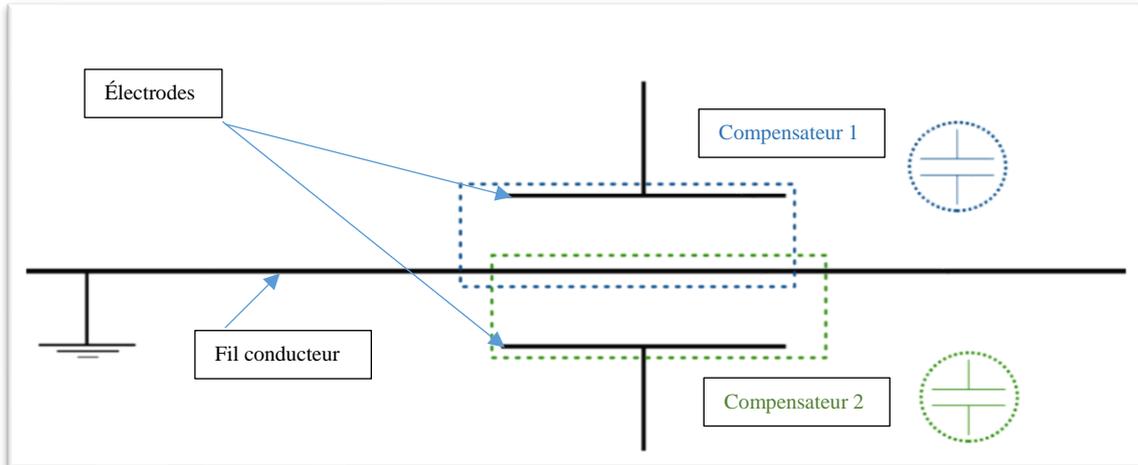


Figure 4 : Schéma du principe de fonctionnement du capteur capacitif

Les électrodes actuelles sont des plans rectangulaires permettant une course du fil d'environ 1 cm. La direction longitudinale est négligeable, tout comme le lacet et le tangage si leurs valeurs sont inférieures à 1° pour les angles et 1 mm pour la translation comme le mentionne [F. BECKER, 2003]. Ces capteurs ont une résolution de $0.3 \mu\text{m}$ pour une course de 10 mm tel que mentionné par [V. RUDE, 2018]. En parallèle, le CERN développe un nouveau type de capteur où les électrodes sont des portions de cylindres permettant notamment de doubler la course du fil dans le capteur.

Pour être utilisés au maximum de leur capacité, on réalise un étalonnage de chaque capteur et on détermine toute une série de caractéristiques spécifique à chacun d'entre eux au travers de deux « calibrations » : la calibration relative et la calibration absolue.

II.1.2 Le système de centrage

Le capteur est placé sur une interface trois billes grâce à un système de centrage forcé isostatique trait-point-plan (cf. Figure 5). L'interface trois billes est fixée sur l'objet à



Figure 5 : Photo du système de centrage : en haut, l'interface trois billes ; en bas l'interface trait-point-plan

étudier, puis le système de centrage vient se positionner dessus, plaçant les billes dans un cône, un chanfrein et un plan. Le cône (ou « point ») supprime les trois translations, le chanfrein (ou « trait ») bloque ensuite les rotations autour de l'axe issu du point et normal au plan de l'interface et finalement le plan supprime la rotation restante autour de l'axe trait-point comme mentionné par [T. TOUZÉ, 2010]. Ce système de centrage permet un transfert de repère entre le repère du capteur et le repère trois billes (cf. Figure 6) par le biais d'une calibration. L'interface trois billes et le système de centrage permettent de repositionner un capteur avec une précision de +- 1 micromètre.

1 micromètre.

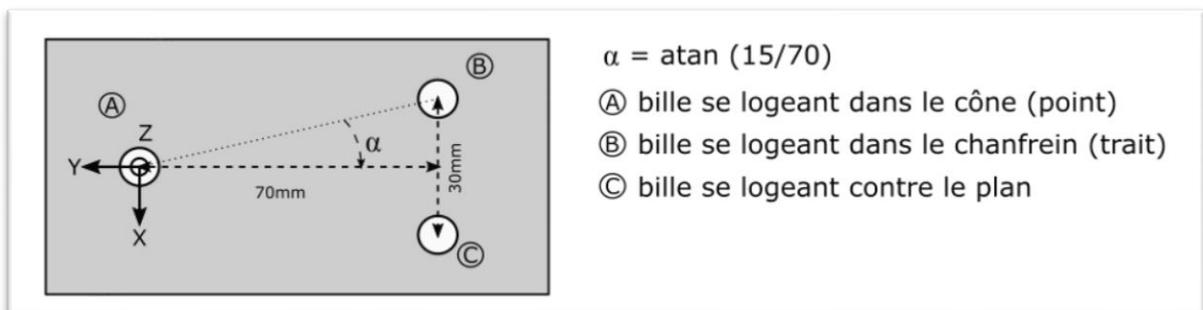


Figure 6 : Schéma du repère de l'interface trois billes

II.1.3 Les câbles

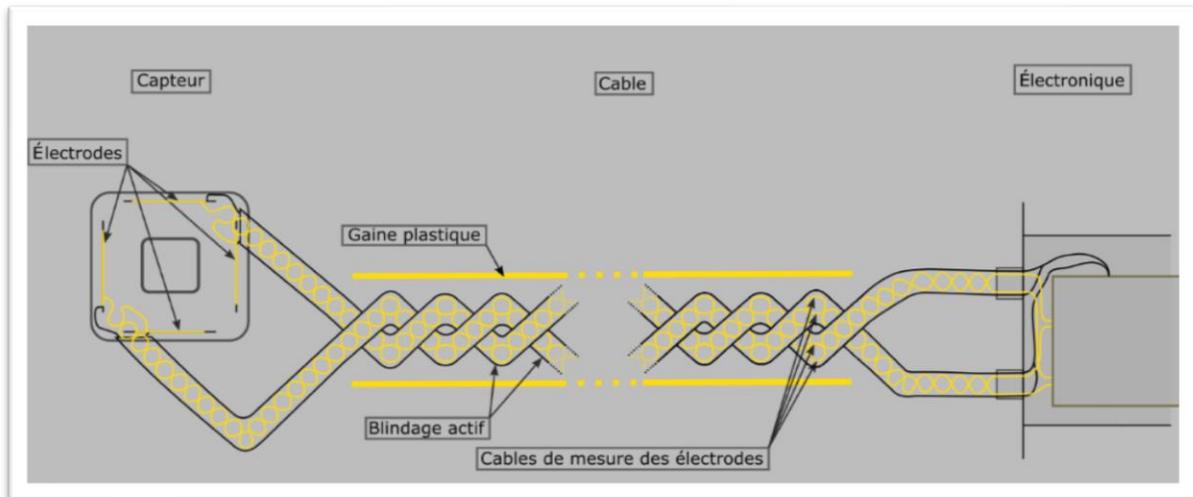


Figure 7 : Schéma des câbles torsadés utilisés avec les capteurs WPS

Les câbles utilisés dans ce dispositif ont des longueurs de 30, 60 ou 100 mètres. Ils sont composés de deux petits câbles issus de deux paires d'électrodes (cf. Figure 7). Ces deux câbles se rejoignent pour le corps du fil où ils sont torsadés à un angle précis (environ 90°) de manière à minimiser l'impact du champ électromagnétique induit par le courant circulant dans les câbles, ce qui impliquerait une erreur sur la mesure, comme le mentionne [A. MARIN, 2013]. Le câble comporte également un blindage actif destiné à augmenter la précision des mesures capteurs en protégeant l'information traversant le câble.

II.1.4 L'électronique

Ce que nous nommerons « électronique » dans le reste de ce mémoire représente le cerveau du dispositif de mesure. Il s'agit d'un boîtier rectangulaire, contenant des puces, condensateurs et résistances (cf. Figure 8). Le tout étant dans un caisson hermétique pouvant opérer en atmosphère explosive. C'est elle qui émet l'onde sinusoïdale à chacune des quatre

électrodes du capteur et qui sera modifiée selon la mesure de ces électrodes. Le déplacement du fil a pour effet de modifier la capacitance de chacun des condensateurs, ce qui impacte l'amplitude et la différence de phase lue par l'électronique. Cet impact est ensuite transformé en tension qui sera finalement lue par le système d'acquisition. Il est important de connaître précisément la fréquence (correspondant au signal sinusoïdal émis) de chaque couple électronique/capteur (situées entre 3 et 8 kHz). En effet, deux capteurs situés sur un même fil doivent avoir des fréquences différentes d'au moins 100 Hz tel que mentionné par [A. HERTY, 2009] sous peine d'avoir des interférences, qui auront pour conséquence une augmentation notable du bruit voire une perturbation sur la lecture.



Figure 8 : Photos de deux électroniques : en haut l'électronique de Fogale Nanotech ; en bas le prototype développé par le CERN

II.2 La « calibration »

Le capteur (associé à un câble et une électronique) doit être calibré avant d'être utilisé, afin de connaître les coordonnées du centre du fil dans le repère de l'interface des trois billes (cf. Figure 9). Le terme calibration regroupe ici deux opérations différentes : la première est un étalonnage de la fenêtre de mesure du capteur (pour convertir les mesures en volts en mesures en millimètres) et la deuxième est la détermination de constantes spécifiques à chaque capteur. Ces deux opérations sont appelées calibration relative (sur une table à déplacement) et calibration absolue (sur une table fixe).

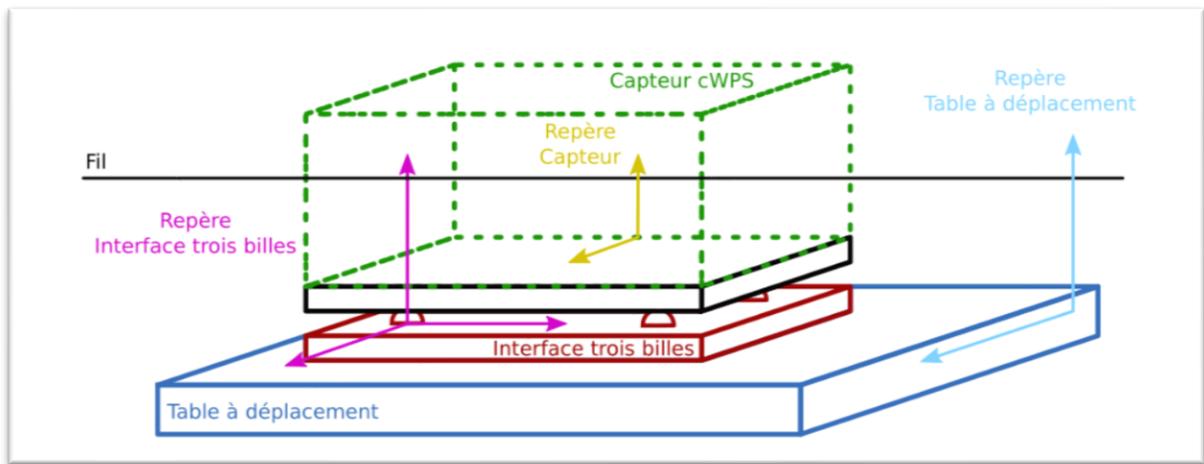


Figure 9 : Schéma des différents repères intervenant dans les calibrations

Tandis que la calibration relative sera développée, la calibration absolue ne sera qu'évoquée. En effet, seule la calibration relative sera utilisée pour l'étude de l'impact de la température sur le dispositif. La calibration absolue, elle, ne fournit que deux constantes qui ne subissent pas les effets des changements de température (supposément dans le cadre de ce mémoire).

II.2.1 La calibration relative

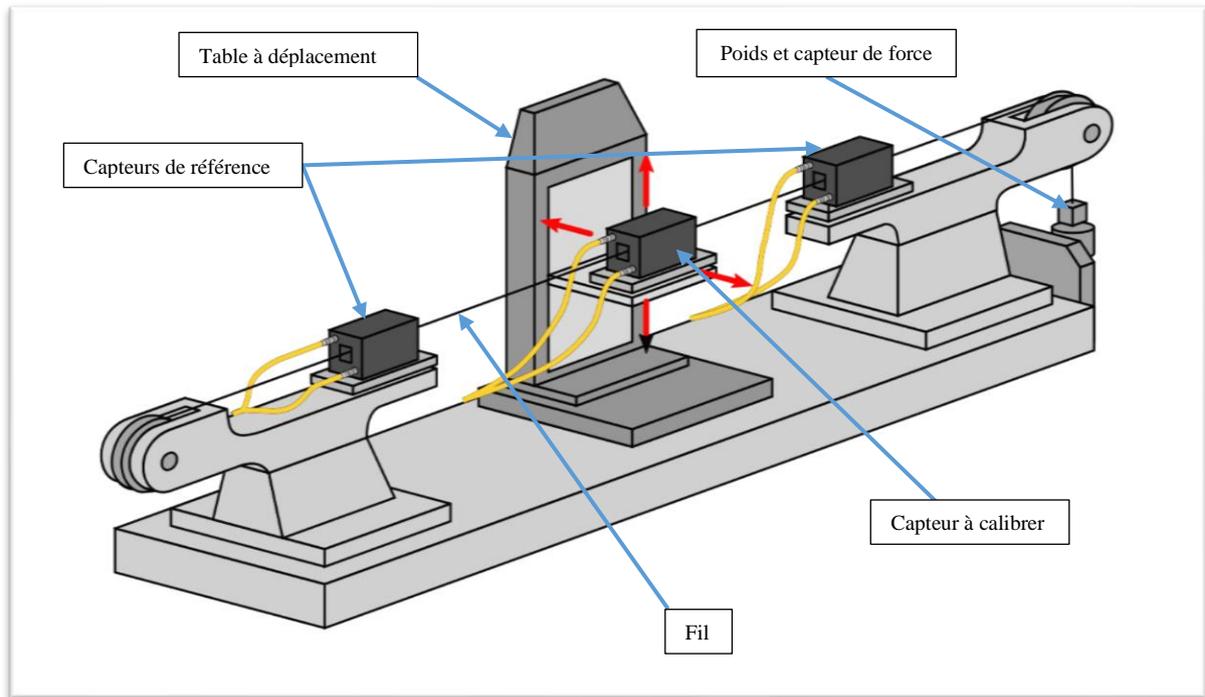


Figure 10 : Schéma du banc de calibration relative

II.2.1.1 Déroulement

Cette calibration a pour but de déterminer une fonction permettant de passer des mesures en volts faites par le capteur en mesures en millimètres exploitables pour le positionnement d'objets.

La fonction choisie est une fonction polynomiale (en X et en Y), produit de deux polynômes de degré 5, respectivement en X et en Y (cf. équations 2 et 3), les mesures radiales et verticales étant dépendantes les unes des autres.

$$X_{[mm]} = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 a_{ij} \cdot X_{[volt]}^i \cdot Y_{[volt]}^j \quad (2)$$

$$Y_{[mm]} = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 b_{ij} \cdot X_{[volt]}^i \cdot Y_{[volt]}^j \quad (3)$$

Pour déterminer les coefficients de ces polynômes, on positionne le capteur sur une table motorisée (cf. Figure 10) sur deux axes (radial et vertical) précis à une dizaine de nanomètres près comme le mentionne [V. RUDE, 2013], déplaçant ainsi le capteur par rapport au fil (cf. Figure 11) : la table à déplacement peut translater horizontalement et verticalement, permettant ainsi de poser le fil à l'endroit voulu dans la fenêtre du capteur.

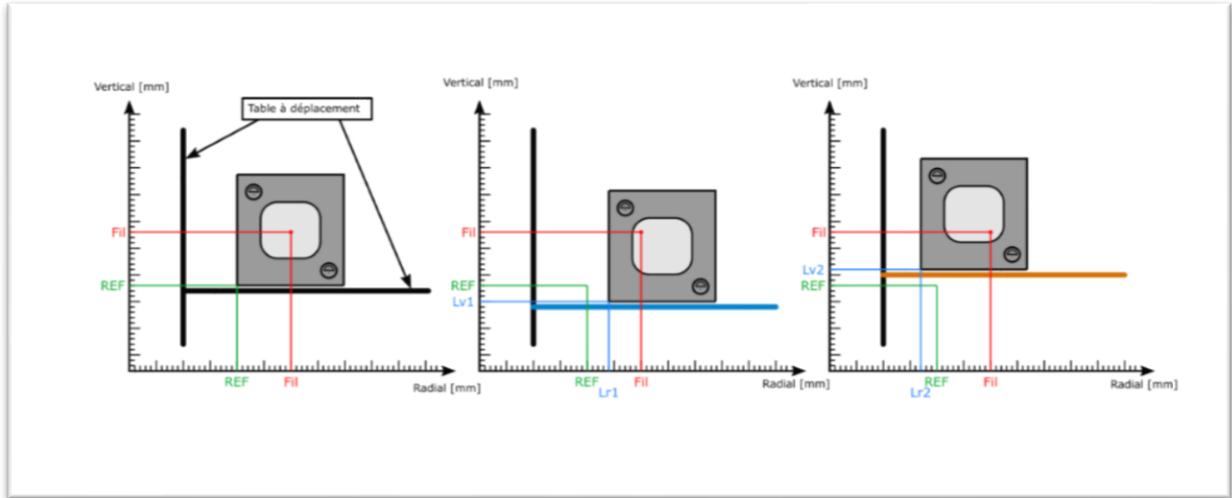


Figure 11 : Schéma du fonctionnement de la table à déplacement

Cette table occupe 121 positions (cf. Figure 12), tout en mesurant son déplacement en millimètres. Dans le même temps, le capteur effectue une mesure à chaque position. Un total de 121 mesures sont faites, la table occupant deux fois chacun des coins et trois fois la position centrale, afin de contrôler la répétabilité des mesures. Cela nous donne finalement 242 observations (observations radiale et verticale pour chaque position) qui nous permettent de déterminer les 36 paramètres des polynômes en X et en Y (les a_{ij} et b_{ij}) grâce à la méthode des moindres carrés.

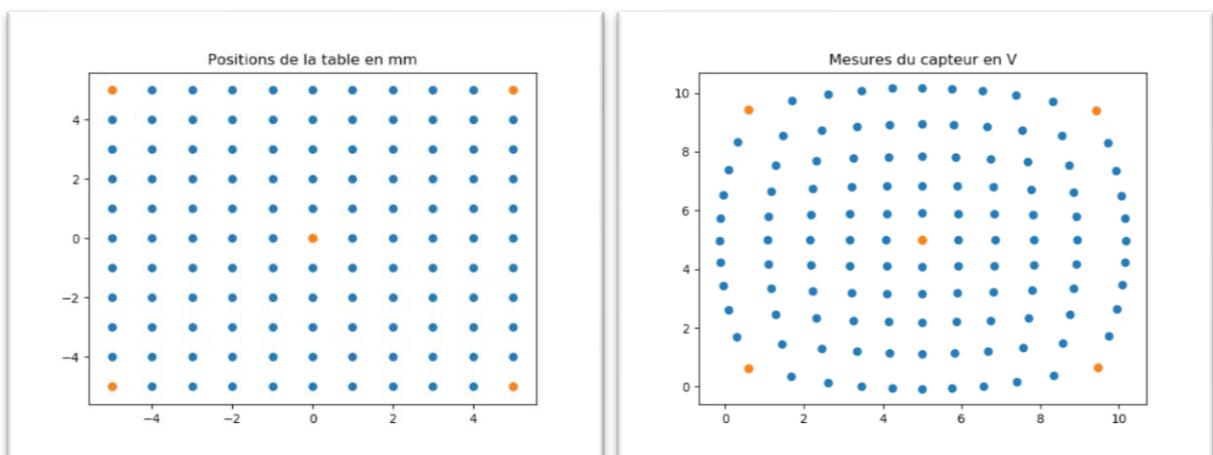


Figure 12 : positions de la table en millimètres et mesures des capteurs correspondantes en volts

II.2.1.2 Calcul

Le calcul est basé sur la méthode des moindres carrés : deux jeux de données sont reliés par une équation linéaire (polynômes) dont on ignore les paramètres : $AX = B$

Notre vecteur B est composé des mesures en millimètres réalisées par la table, la matrice A est construite grâce aux mesures des capteurs en volts pour chaque position de la table. Nous rajoutons la matrice de poids P, associée aux mesures capteurs. Le vecteur X est le vecteur des inconnues (les 36 coefficients des polynômes).

Il ne reste alors plus qu'à résoudre le système $AX = B$ par la méthode des moindres carrés :

On pose :
$$A^T P A X = A^T P B \quad (4)$$

$$\text{avec } P = I * \frac{1}{0.001^2}$$

et I la matrice identité

On pose ensuite $N = A^T P A$ (la matrice normale)

$$\text{et } C = A^T P B$$

Le système s'écrit alors : $NX = C$

Il ne reste alors plus qu'à inverser la matrice N :

$$X = N^{-1}C$$

Il se peut cependant que la matrice N soit presque singulière, ce qui pose alors problème pour l'inversion. L'inversion d'une matrice presque singulière fournira un résultat erroné si le programme utilisé réussit l'inversion.

Pour palier à ce problème, on décompose la matrice N en sous-matrices ayant des propriétés particulières (symétrie, orthogonalité...) avant de l'inverser. Pour cela plusieurs méthodes sont possibles :

- La décomposition QR, décrite par [Roger A. HORN et Charles R JOHNSON, 1985]
- La décomposition PLU, décrite par [W.H. PRESS, 1992]
- La factorisation de Cholesky, décrite par [CIARLET P., 1985]

Dans notre programme réalisé avec Python, nous calculons les trois méthodes et comparons les résidus afin de ne conserver que le meilleur résultat (la méthode retournant le plus petit résidu maximal). En effet, nous sommes à la recherche de résidus extrêmement faibles afin d'atteindre des précisions proches du micromètre. Nous avons opté pour le calcul systématique des trois méthodes, car celles-ci renvoyaient individuellement des résultats parfois aberrants, dus aux configurations particulières des matrices et des valeurs parfois très faibles des variables utilisées ou que nous cherchons (de l'ordre de 10^{-10} pour les coefficients de polynôme). Ces résultats erronés étaient facilement corrigibles par l'utilisation d'une autre méthode. C'est pourquoi, pour chaque calcul de moindres carrés, les trois méthodes sont testées.

Ceci ne permettait cependant pas de généraliser et de choisir une seule des méthodes.

II.2.2 La calibration absolue

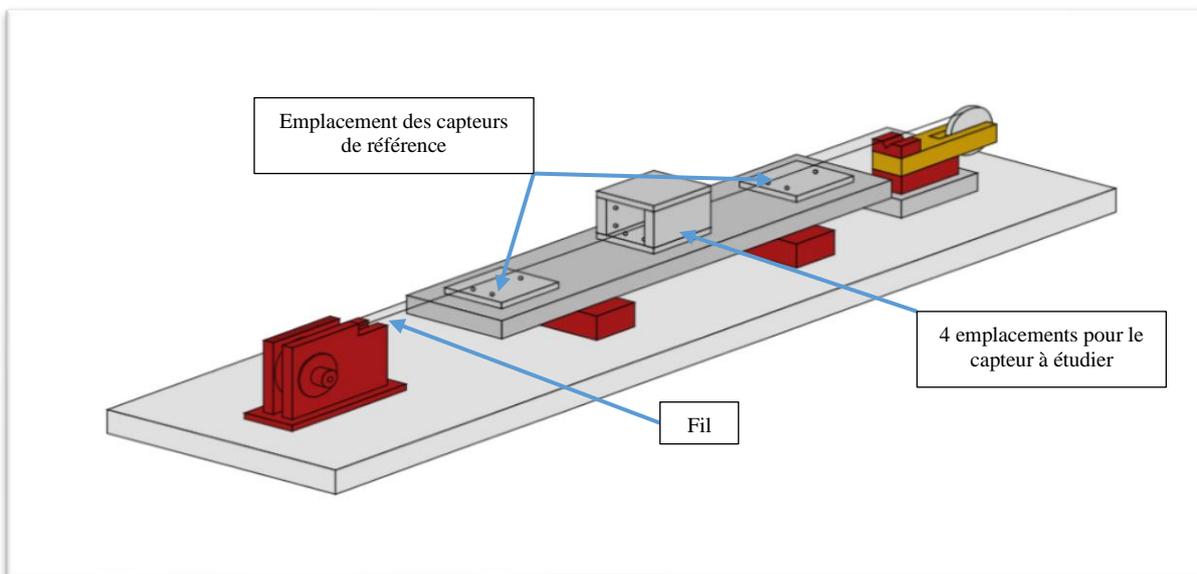


Figure 13 : Schéma du banc de calibration absolue

Cette calibration a pour but de déterminer deux translations représentant la transformation entre le système d'axes (dans le repère capteur) et le système de centrage (le repère des trois billes). Elle est réalisée lors de la fixation de l'interface trait-point-plan au capteur. Elle permet l'expression des lectures faites par le capteur directement dans le repère de l'objet sur lequel le dispositif est fixé.

Pour déterminer ces translations, on positionne le capteur successivement sur quatre interfaces trois billes (cf. Figure 15) dont on connaît précisément les positions ($0.6 \mu\text{m} \pm 1.6 \text{ ppm}$ mesurée par une CMM Leitz) tel que le mentionne [T. TOUZÉ, 2011], sur lesquelles on réalise une mesure radiale et verticale du fil. Au total, 8 observations permettront de déterminer les deux translations entre le système de centrage et le système d'axes du capteur (soit les translations radiale et verticale) ainsi que les coordonnées du fil dans le repère général. Le système d'équations est alors résolu en bloc par un calcul de moindres carrés.

Dans la suite de ce mémoire, le terme calibration désignera la calibration relative, qui est largement utilisée pour étudier les impacts de la température sur les mesures. La calibration absolue n'est réalisée qu'une seule fois lors de l'assemblage du capteur et de l'interface trait-point-plan. Cet assemblage est supposé insensible à la température.

III La démarche expérimentale

III.1 Démarche pour les électroniques et les câbles

Le but de notre étude est de comprendre comment la température influe sur les mesures à travers ses impacts sur les différentes parties du dispositif. Nous pourrions ainsi être capables, connaissant la température des différentes parties du dispositif, d'appliquer des corrections sur la calibration à 20 °C.

Nous étudions donc l'impact de la température sur l'électronique puis sur les câbles et enfin sur le capteur.

Il a été choisi une démarche similaire pour les électroniques et les câbles, qui ne nécessitent pas d'attention particulière pour les entreposer et étudier leur comportement. Pour leur étude, ces deux parties du dispositif seront positionnées tour à tour dans la chambre climatique (cf. Figure 14) tandis que le banc de calibration relative (la table à déplacement) effectuera des calibrations. Ce banc sera alors notre référence qui devra être la plus stable possible. Cependant, nous verrons qu'en réalité, la stabilité du banc n'est aucunement assurée : il est placé dans une pièce où le contrôle des conditions (température et humidité) est très difficile, voire impossible.

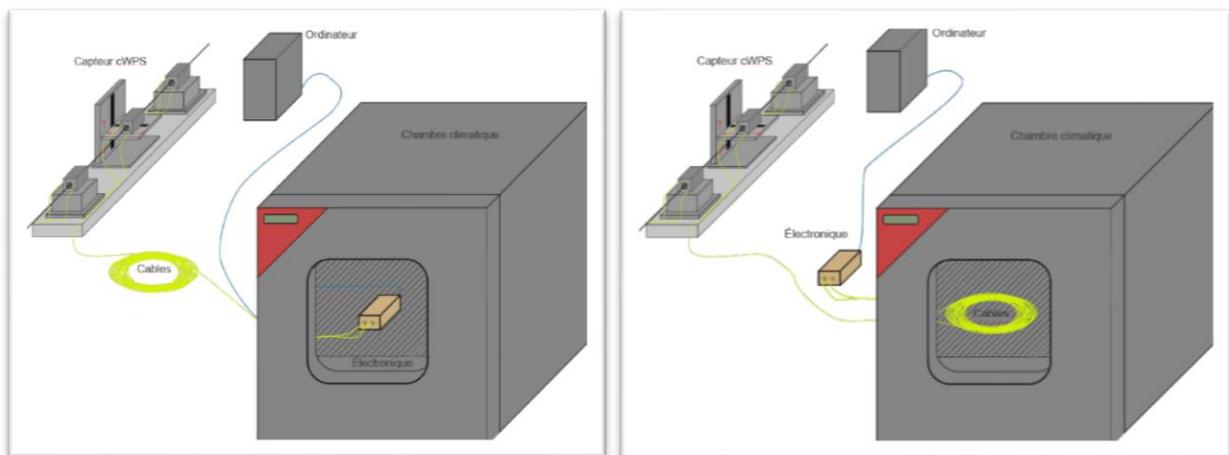


Figure 14 : Schéma de l'organisation des tests des électroniques et des câbles

Étant donné que nous étudions l'impact de la température sur les différentes parties du dispositif de mesure, nous avons placé des sondes de températures à tous les endroits stratégiques afin de corriger les éventuelles variations de la température de la pièce dans

laquelle se trouve la chambre climatique. Nous avons complété ce dispositif de suivi par des sondes d'humidité, humidité qui impacte fortement les mesures capacitives.

Démarche théorique :

La démarche est la suivante pour les câbles et les électroniques : nous réalisons des calibrations relatives, qui nous fournissent des coefficients des polynômes d'étalonnage grâce aux positions de la table et aux mesures des capteurs aux 121 positions. Ces coefficients permettent, à partir des mesures faites par les capteurs, de déterminer le déplacement de la table en millimètres. Ces polynômes ne diffèrent les uns des autres que par les conditions présentes dans la pièce et dans la chambre climatique (cf. Figure 15), le capteur, le câble et l'électronique restant les mêmes durant la durée du test.

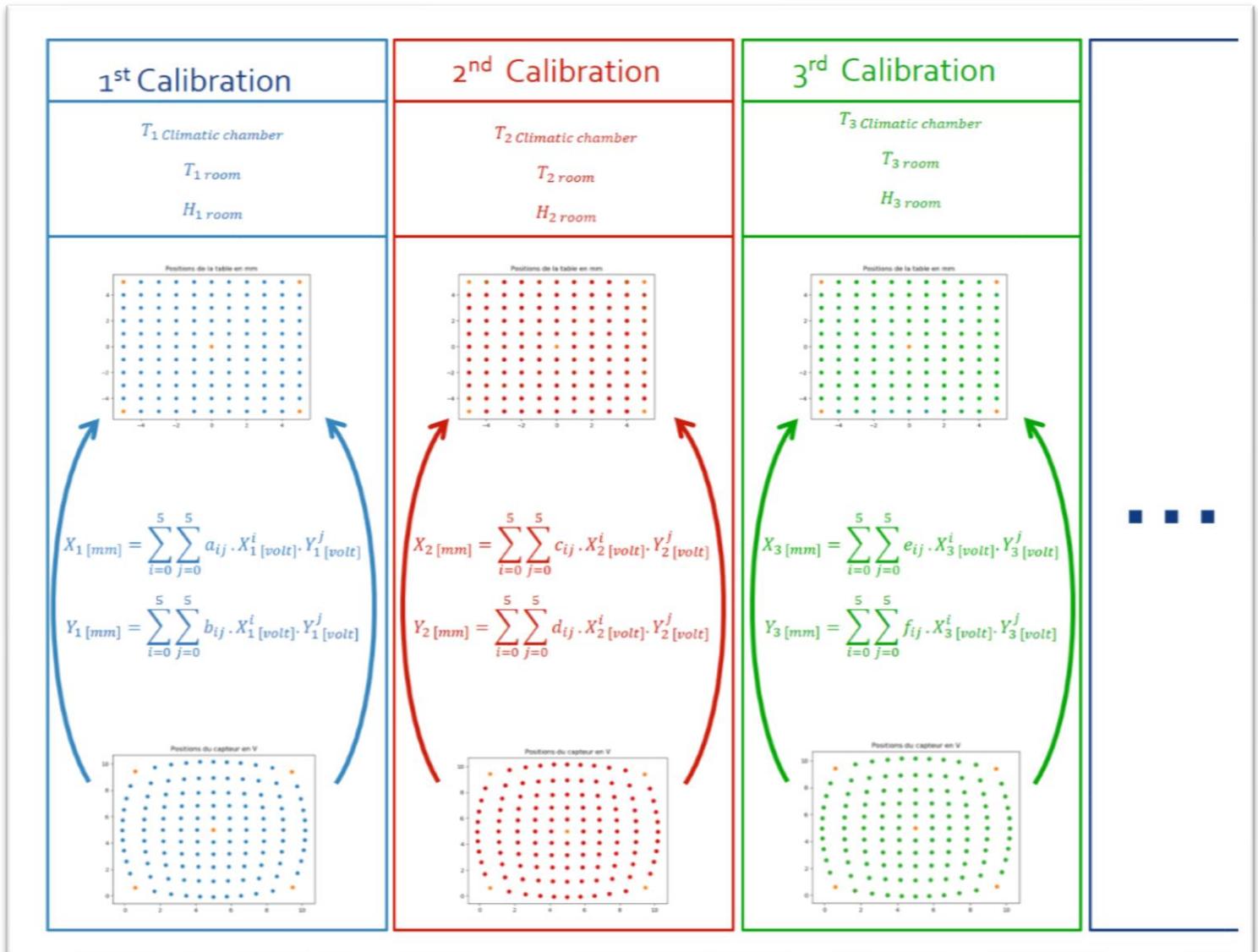


Figure 15 : Calcul des polynômes dans des conditions différentes

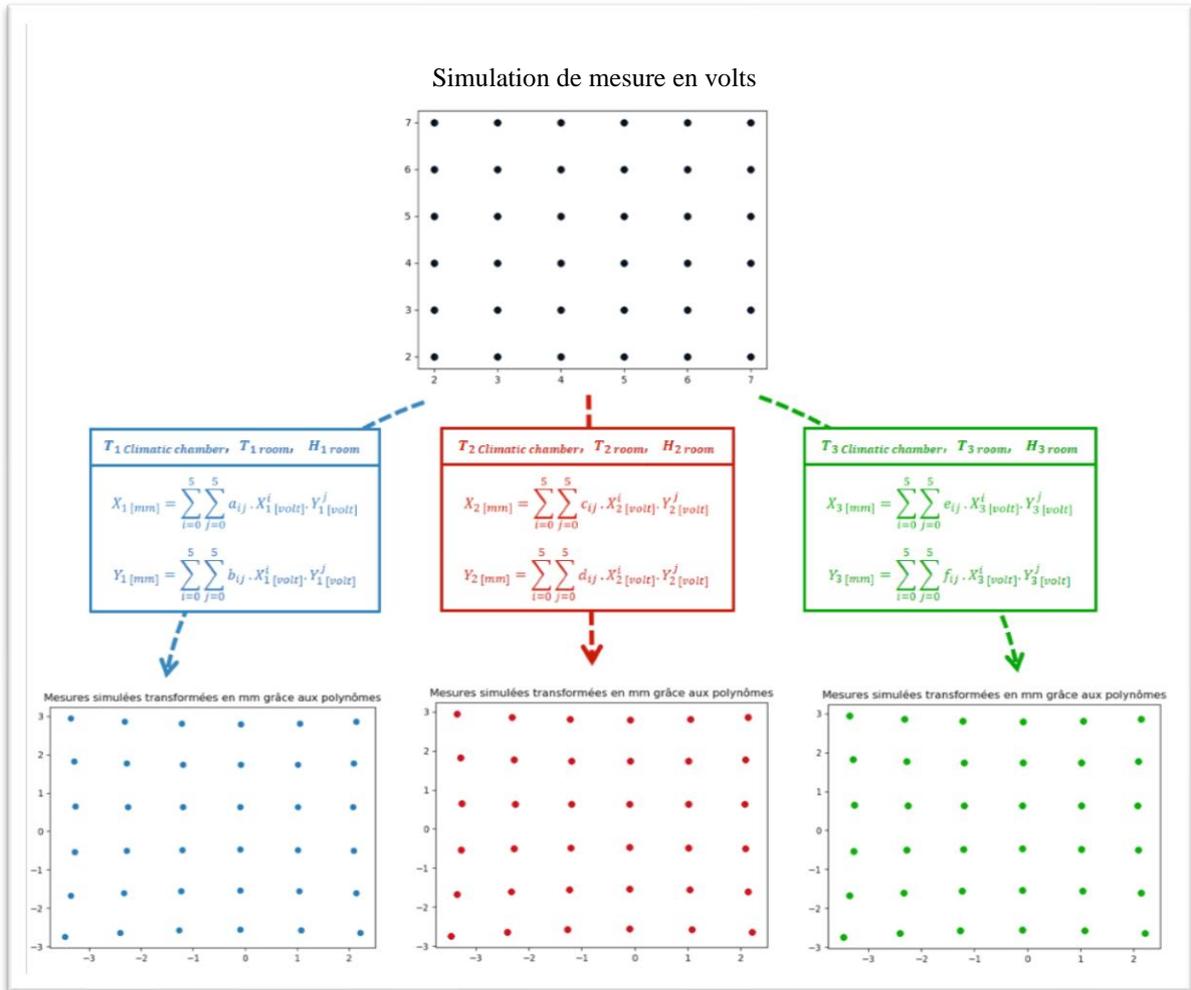


Figure 16 : Comparaison des polynômes grâce à une simulation de mesure

Ce sont alors ces polynômes que nous comparons, en simulant des mesures de capteur et en observant les « pseudo » déplacements qui en résultent (cf. Figure 16). Dans le cas idéal, les points devraient se superposer. Les différences sont dues aux variations de température de la chambre climatique majoritairement, mais aussi des variations de température de la pièce et des variations d'humidité.

On compare finalement ces résultats grâce à des similitudes 2D (cf. équation 5) : deux facteurs d'échelle (un selon l'axe X et l'autre selon l'axe Y), une rotation et deux translations (cf. Figure 17) et ce avec une bonne précision (cf. Tableau 1).

Soit :

$$M_{bleu} = T + R * f * m_{rouge} \quad (5)$$

Avec T les translations, R la rotation et f les facteurs d'échelle.

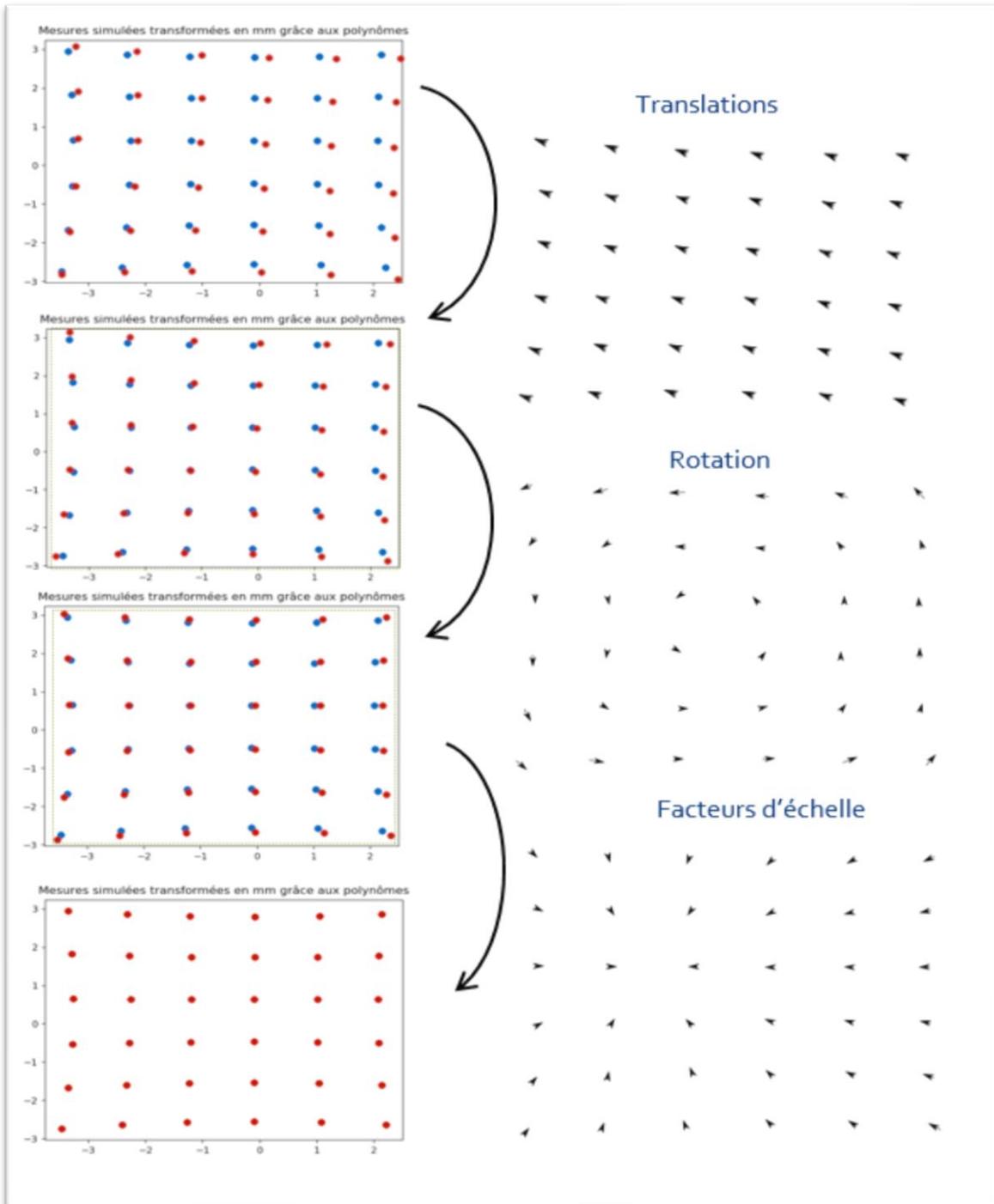


Figure 17 : Comparaison des polynômes grâce à des similitudes 2D

Précision maximum sur les similitudes	
fx	88 ppm
fy	87 ppm
tx	0,18 μm
ty	0,17 μm
rot	68 μrad

Tableau 1 : Précisions des paramètres des similitudes déterminées par moindres carrés

Une fois le dispositif correctement installé, nous programmons la chambre climatique de manière à ce qu'elle effectue des cycles de chauffe et de refroidissement par paliers : on l'initialise à 20 °C pendant une longue période (entre 8 et 12 heures) afin que les conditions dans la chambre se stabilisent avant de la faire chauffer à 30 °C puis 40 °C et enfin redescendre à 30 °C puis 20 °C. Chaque palier de température est maintenu pendant plusieurs heures, afin de pouvoir effectuer plusieurs calibrations. Lorsque plusieurs cycles de température s'enchaînent, un palier de retour à 20 °C de longue durée est toujours effectué afin de contrôler la répétabilité et d'emmagasiner des données pour le calcul des modèles de correction, qui s'avèrent nécessaires étant donné les conditions très instables dans la pièce.

Pour tenter de palier à ce problème d'instabilité d'humidité et de température de la pièce, nous avons construit un caisson en polystyrène autour du banc de calibration afin de tenter de l'isoler (cf. Figure 18). La protection procurée par le caisson s'avéra être efficace. En contrepartie de l'atténuation des variations de température de la pièce, le caisson isolait thermiquement le banc de calibration par rapport à la pièce (cf. Figure 19). Il en résulte une température, dans le caisson, supérieure au reste de la pièce, due à la chaleur produite par les électroniques des deux capteurs de référence ainsi que par les deux moteurs de déplacement de la table.



Figure 18 : Photo du caisson en polystyrène construit autour du banc de calibration mobile

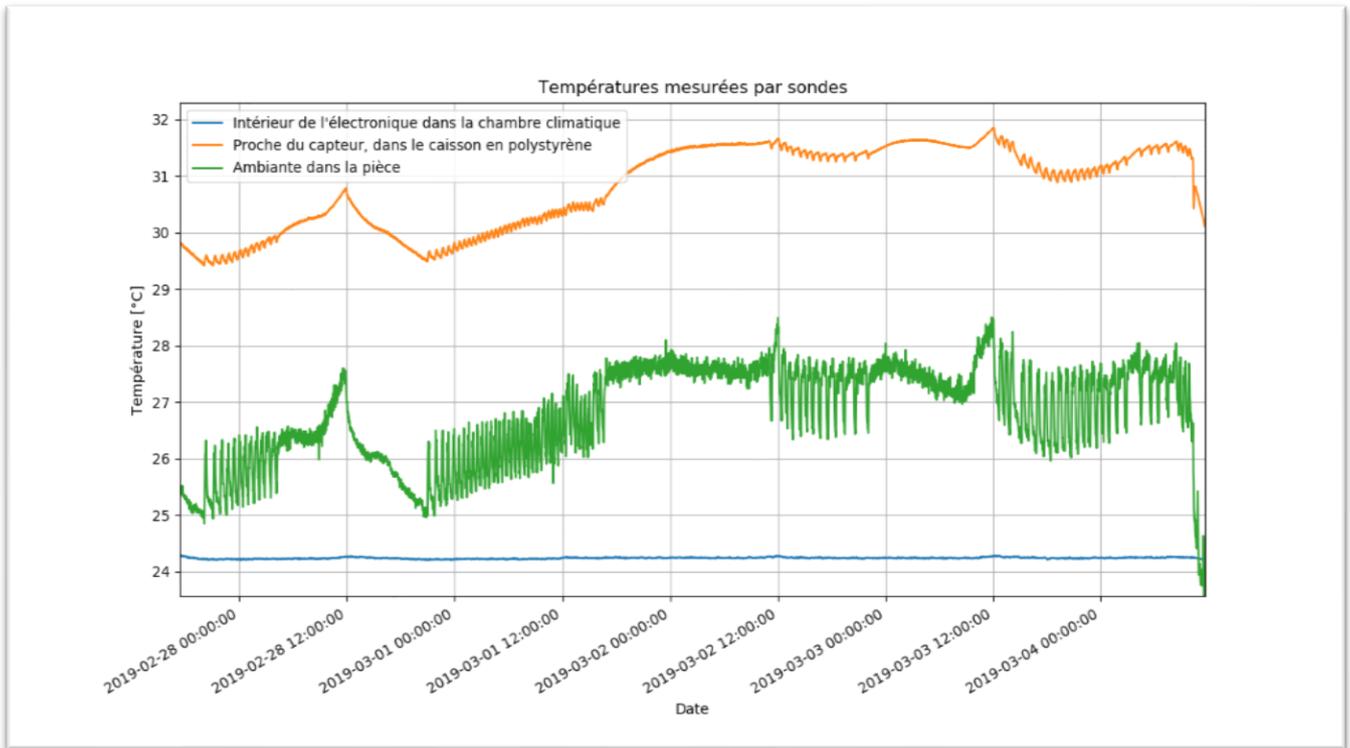


Figure 19 : Isolation et atténuation des variations rapides de température

Ce caisson en polystyrène, couplé au contrôle du chauffage et de la climatisation (et du retour des beaux jours au mois de mars) nous a permis d'obtenir une bonne stabilité de la température dans la pièce sur plusieurs jours et ce, quelle que soit la température de la chambre climatique (cf. Figure 23).

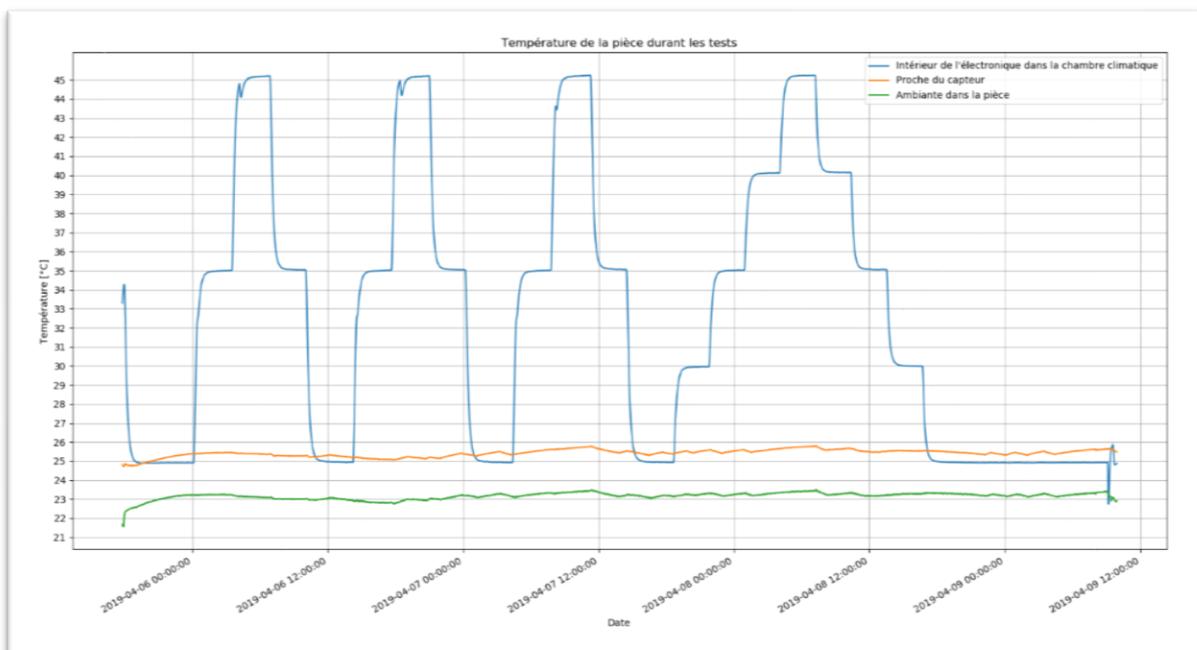


Figure 20 : Bonne stabilité de la température dans la pièce le temps de l'expérience

Mais bien que les conditions soient plus stables, elles restent variables et observables sur les résultats : lorsque l'élément étudié dans la chambre climatique est placé à 20 °C (température utilisée normalement pour effectuer les calibrations) les mesures faites par le banc de calibration devraient être identiques. Les différences observées sont directement corrélées avec les variations de température et d'humidité de la pièce.

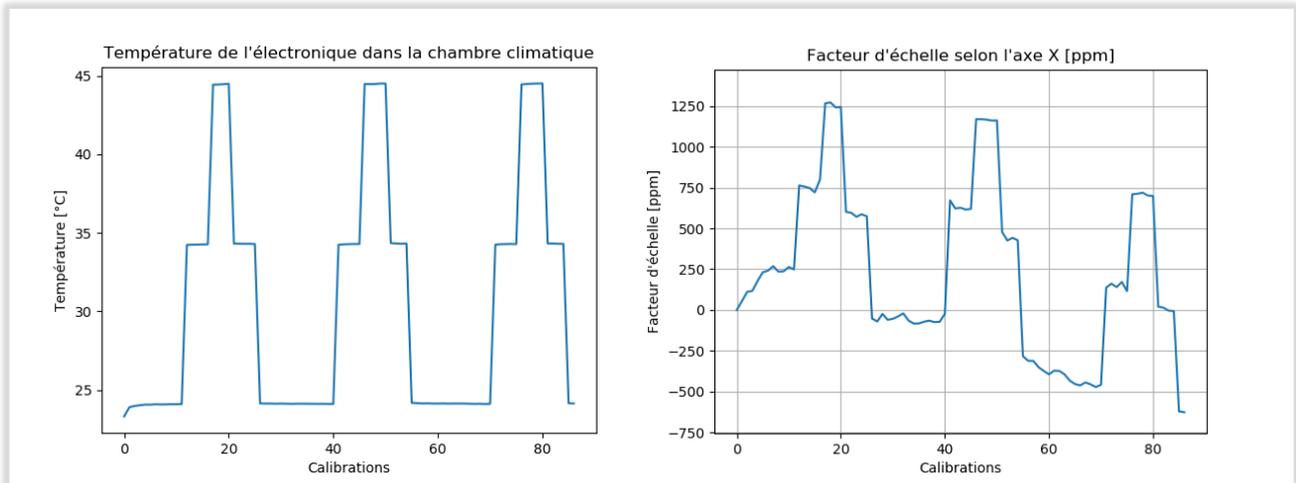


Figure 21 : Exemple de résultat sans aucune correction

Il en résulte par exemple, pour trois cycles de variation de température de la chambre climatique (contenant ici une des électroniques testées), une dérive du résultat (cf. Figure 21). Ce graphique représente les trois cycles de température effectués par la chambre climatique et l'impact sur le facteur d'échelle selon l'axe X. Ce graphique s'interprète comme suit : la température est simplement la température de la chambre à chaque calibration ; pour chaque calibration, la valeur du facteur d'échelle résulte de la comparaison de cette calibration avec la calibration initiale (la calibration 0). L'abscisse représente alors les calibrations réalisées (chaque calibration durant environs 20 minutes) et comparées avec la calibration 0. Il est alors intéressant de remarquer que les différentes calibrations effectuées à 20 °C n'ont pas un facteur d'échelle nul, ce qui s'explique par des variations de conditions dans la pièce (cf. Figure 22). Cela nous indique également que pour toute la durée de nos tests, la température et l'humidité de la pièce ne seront pas négligeables.

Cependant, cet impact est assez facilement corrigible grâce aux calibrations réalisées régulièrement à 20 °C, qui nous permettent de calculer un modèle de correction à appliquer aux autres calibrations.

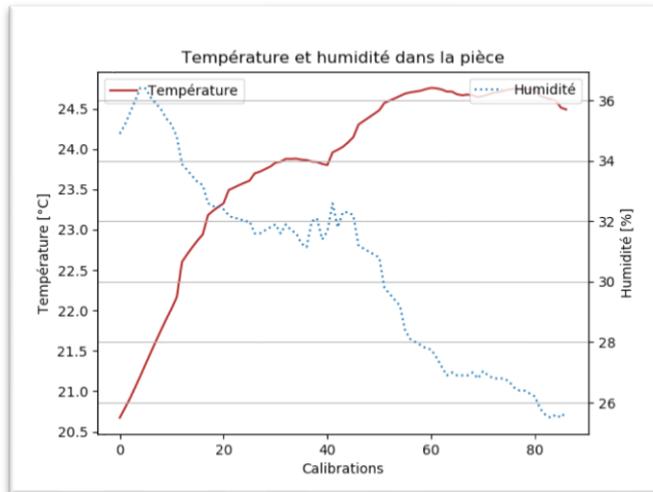


Figure 22 : Variations de la température et de l'humidité dans la pièce

La correction consiste à utiliser l'ensemble des mesures réalisées lorsque la chambre climatique est à 20 °C pour créer une nappe de valeurs (facteur d'échelle selon l'axe X par exemple) en fonction de la température et de l'humidité de la pièce. Cette nappe nous permet, connaissant la température et l'humidité de la pièce lors de chacune des calibrations à 30 °C et 40 °C, de leur appliquer une correction des conditions

présentes dans la pièce rétablissant des valeurs nulles lors des calibrations à 20 °C (cf. Figure 23).

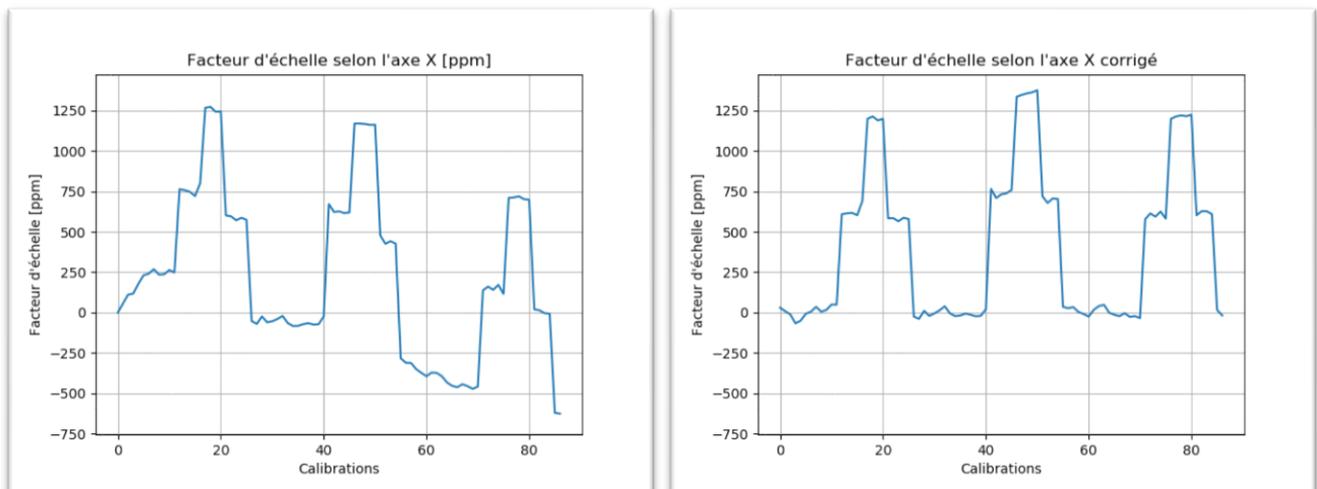


Figure 23 : Exemple de données avant (à gauche) et après (à droite) avoir été corrigées des variations de température et d'humidité de la pièce

La première tentative fut de modéliser cet impact grâce à des nappes de degré 2 calculées par moindres carrés. Cependant, ce genre de nappe rend les extrapolations aberrantes en cas de mauvaise configuration de points (cf. Figure 24) surtout lorsque les conditions s'éloignent des conditions présentes à 20 °C.

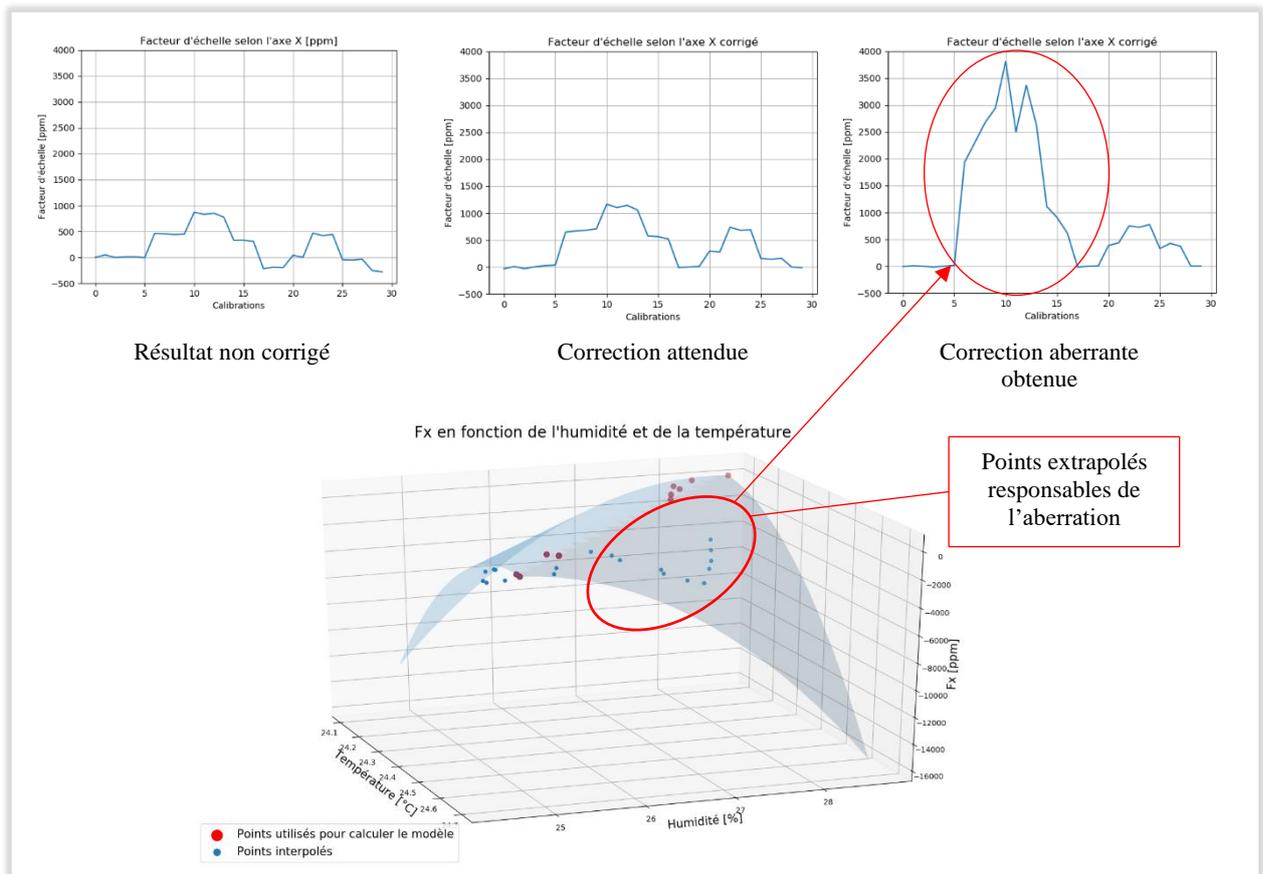


Figure 24 : Résultats aberrants dus à une extrapolation du modèle

Nous avons alors tenté de n'appliquer le modèle qu'aux calibrations ayant été réalisées dans des conditions très similaires aux conditions à 20 °C. Pour cela, nous n'avons conservé que les calibrations incluses dans l'enveloppe convexe des points ayant servi à calculer le modèle (cf. Figure 25).

Mais le nombre de calibrations conservées après cette sélection est trop faible, la température et l'humidité évoluant trop au cours des différents cycles, notamment durant les cycles les plus longs. Ainsi, en appliquant cette restriction à l'exemple précédent, toutes des calibrations faites à 30 °C et 40 °C sont oubliées (cf. Figure 25). Nous avons tout de même tenté de l'appliquer à un autre jeu de mesures ayant une configuration de points moins linéaire, mais le problème persiste et un trop grand nombre de calibrations ne sont pas traitées (cf. Figure 26).

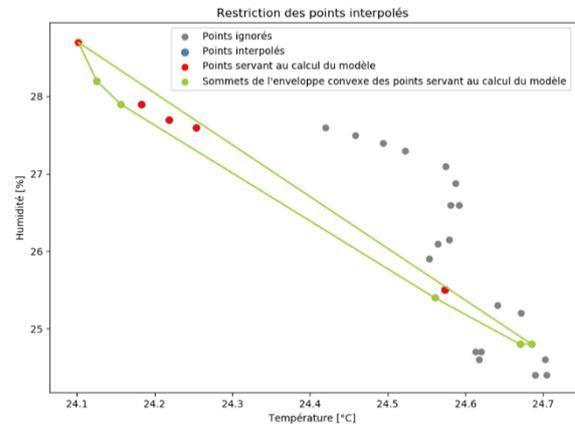


Figure 25 : Aucune calibration autre que celles faites à 20 °C n'est conservée

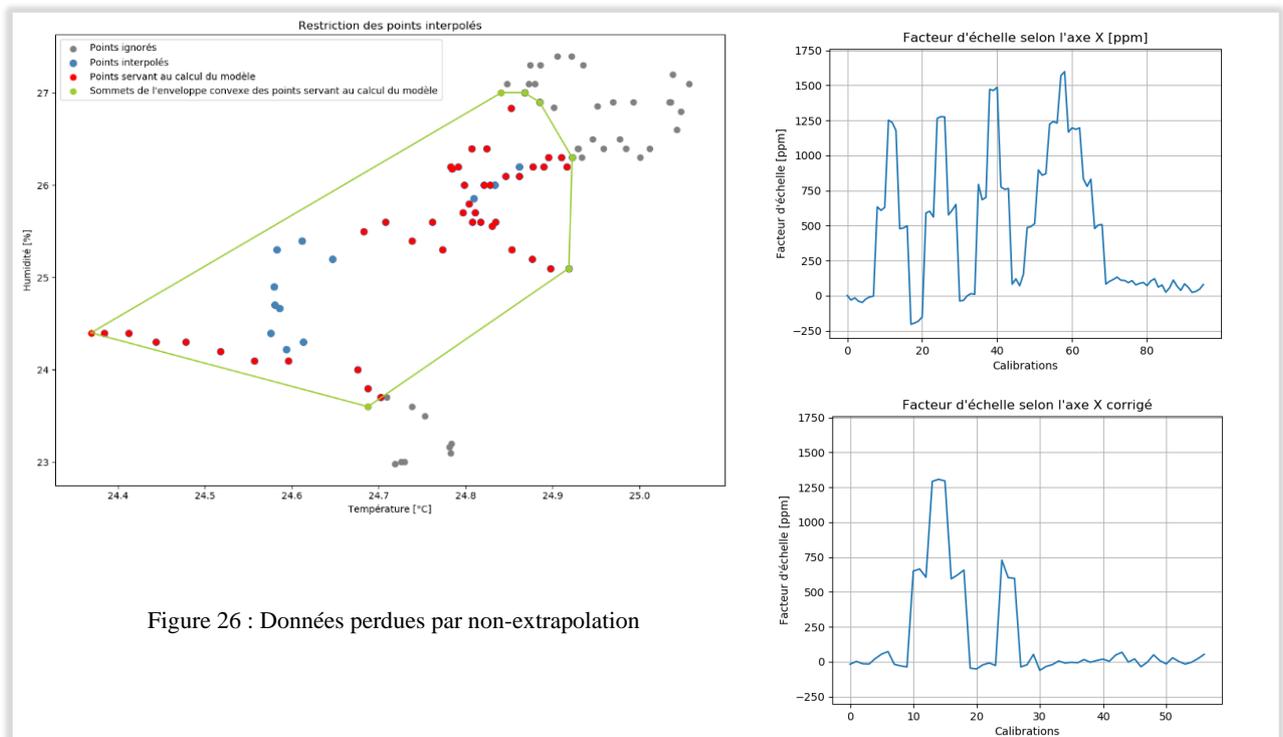


Figure 26 : Données perdues par non-extrapolation

Nous avons donc décidé de diminuer d'un degré les polynômes utilisés pour les nappes de modélisation. Ces nouveaux modèles sont des plans issus d'un calcul de moindres carrés sur les données à 20 °C durant les cycles (cf. Figure 27). Ils permettent une application plus réaliste des corrections aux calibrations étudiées et leur précision est suffisante (cf. Tableau 2). En effet, les plans limitent les aberrations : lorsque les points s'éloignent des points ayant servis à l'interpolation, leur valeur varie beaucoup moins que dans le cadre d'une modélisation par une nappe de degré 2. De plus, les résidus des moindres carrés pour les plans sont inférieurs aux précisions de détermination des paramètres des similitudes par moindres carrés (cf. Tableau 1) excepté pour la translation verticale. Cela est dû à la présence d'autres phénomènes présents influant cette translation (non pris en compte dans ce modèle, qui corrige uniquement température et humidité, les deux paramètres les plus importants).

	RMS pour les nappes de degré 1 (plans)					RMS pour les nappes de degré 2			
	fx [ppm]	fy [ppm]	tx [μm]	ty [μm]		fx [ppm]	fy [ppm]	tx [μm]	ty [μm]
Électronique									
W2D-7E1-015	37	36	0,27	0,45		24	16	0,15	0,25
W2D-7E1-016	45	52	0,55	1,06		31	33	0,4	0,86
W2D-7E1-017	20	28	0,11	0,66		9	13	0,1	0,62
Moyenne	34	39	0,31	0,72		21	21	0,22	0,58
Écart type	10	10	0,18	0,25		9	9	0,13	0,25

Tableau 2 : Récapitulatif des RMS pour les nappes

En appliquant ce type de modèle, les données sont toutes corrigées et sans aberrations.

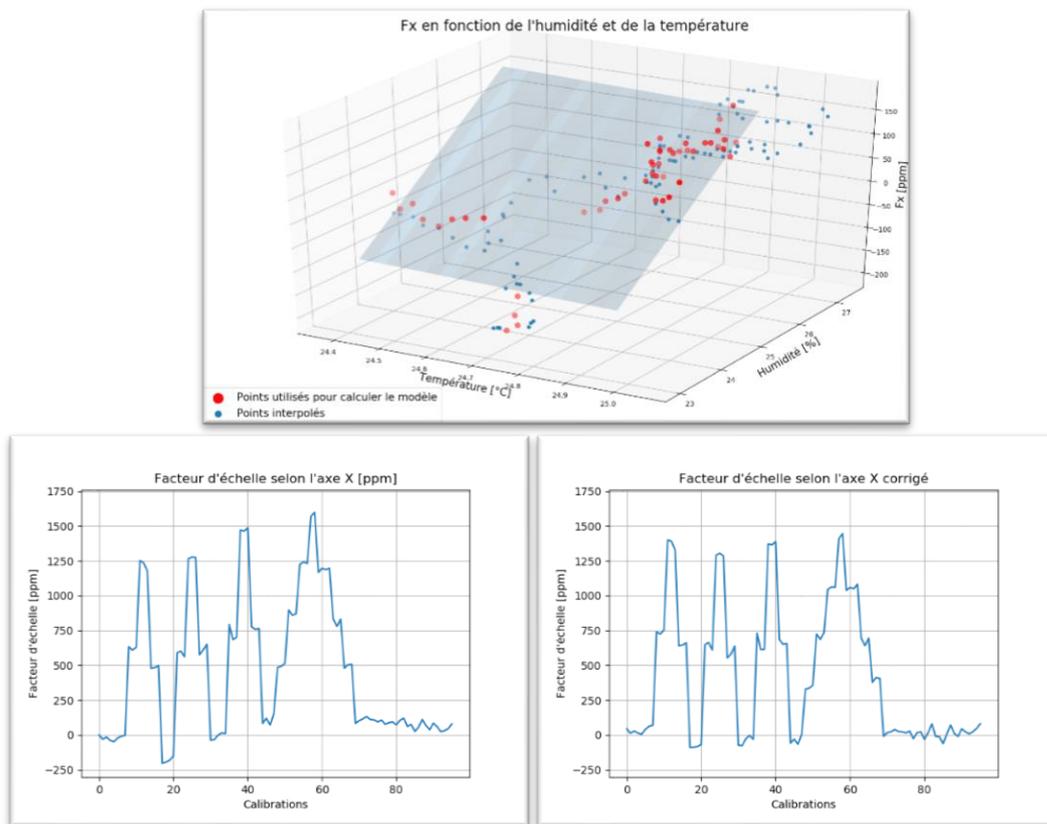


Figure 27 : Données avant et après correction des conditions présentes dans la pièce

C'est donc grâce à des plans que nous modélisons l'impact de l'humidité et de la température sur le capteur présent dans la pièce. Ces plans permettent une extrapolation des données et fournissent des corrections satisfaisantes sur tous les jeux de données en notre possession. Un contrôle visuel de chaque résultat a permis de vérifier qu'aucun de ces plans ne crée d'aberration.

III.2 Démarche théorique pour les capteurs

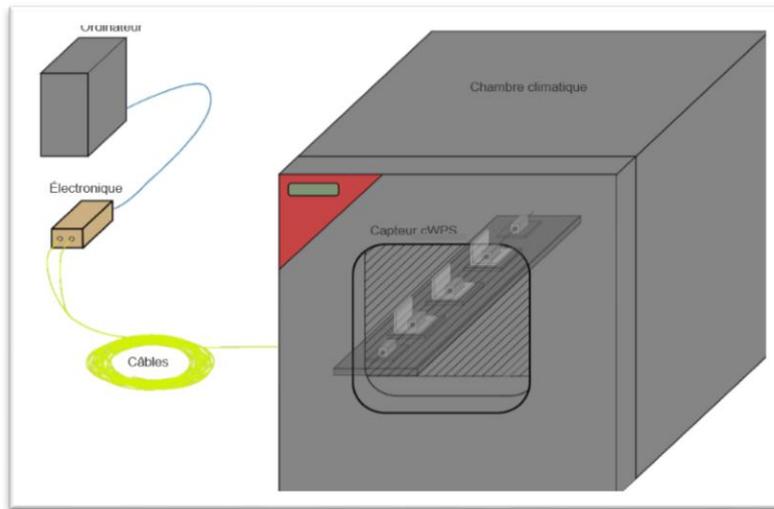


Figure 28 : Organisation pour les tests des capteurs

Afin de pouvoir étudier l'impact de la température sur les capteurs, il faut créer un nouveau banc de calibration ayant des dimensions réduites (pour pouvoir rentrer dans la chambre climatique) (cf. Figure 28). Ce nouveau banc n'étant pas mobile, il ne fournit que 12 positions de fils par capteur : chacune des trois pièces centrales est légèrement décalée radialement et verticalement par rapport aux autres et permet 4 positions de capteur (cf. Figure 29).

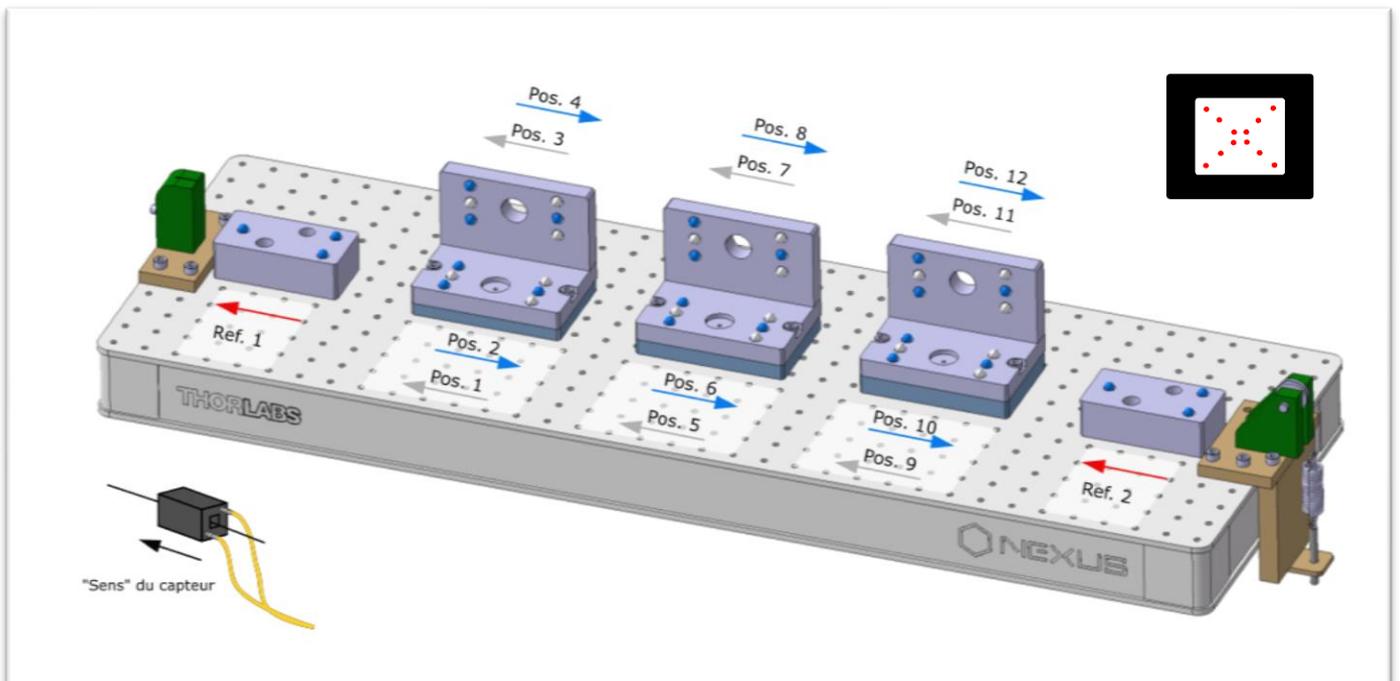


Figure 29 : Ensemble des douze positions possibles sur le banc et position approximative du fil dans chacune de ces positions (en haut à droite)

Le but est alors d'extraire le maximum d'informations de ces 12 points pour étudier l'impact de la température sur l'ensemble de la course du fil dans le capteur.

III.2.1 Tentative de modification du modèle

La première idée fut de modifier le modèle permettant le passage de volts à

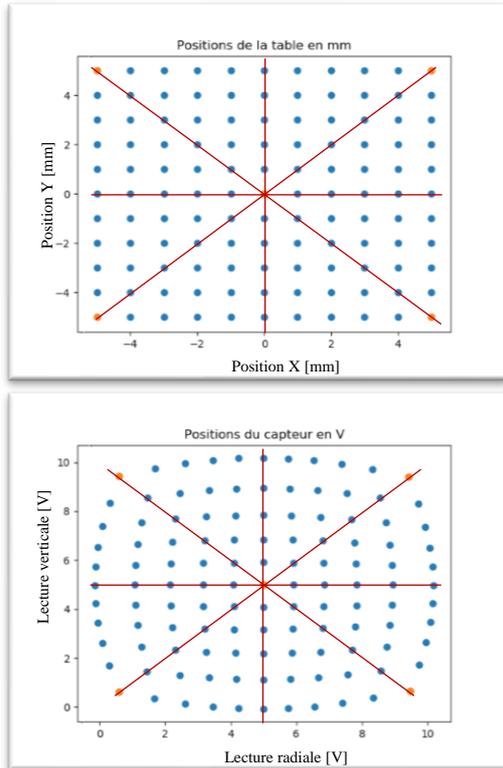


Figure 30 : Axes de symétrie présents mesures et les positions de la table

millimètres (les polynômes de degré 5) afin de diminuer le nombre d'inconnues jusqu'à permettre une calibration relative à partir de 12 points.

Le principal avantage aurait été le rapprochement possible avec les études réalisées sur les câbles et les électroniques (faites à partir de calibrations relatives).

Le caractère apparemment symétrique des lectures faites par le capteur (cf. Figure 31) laissait miroiter la possibilité de ne créer un modèle que sur une petite portion de la fenêtre lecture capteur avant de l'appliquer par des transformations simples au reste de la fenêtre. Le modèle, ne portant alors que sur une petite portion (cf. Figure 31), serait alors plus simple à déterminer et nécessiterait moins de paramètres (les transformations n'ajoutant aucune inconnue au problème). Afin de minimiser les résidus de l'application du modèle à l'ensemble de la fenêtre de lecture du capteur, les mesures faites lors de la calibration sont toutes déplacées dans la même portion servant à calculer le modèle, et ce, avec les mêmes transformations qui serviront à appliquer le modèle à l'ensemble de la fenêtre

Le modèle, ne portant alors que sur une petite portion (cf. Figure 31), serait alors plus simple à déterminer et nécessiterait moins de paramètres (les transformations n'ajoutant aucune inconnue au problème).

Afin de minimiser les résidus de l'application du modèle à l'ensemble de la fenêtre de lecture du capteur, les mesures faites lors de la calibration sont toutes déplacées dans la même portion servant à calculer le modèle, et ce, avec les mêmes transformations qui serviront à appliquer le modèle à l'ensemble de la fenêtre

Le caractère apparemment symétrique des lectures faites par le capteur (cf. Figure 31) laissait miroiter la possibilité de ne créer un modèle que sur une petite portion de la fenêtre lecture capteur avant de l'appliquer par des transformations simples au reste de la fenêtre.

Le modèle, ne portant alors que sur une

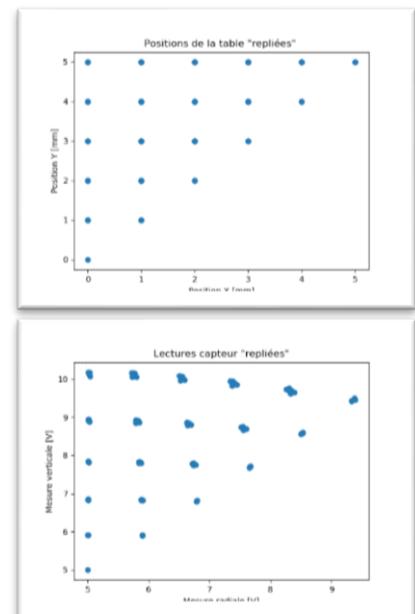


Figure 31 : Exemple de positions « repliées » selon les axes de symétrie

de lecture. Ainsi, en minimisant les résidus sur l'échantillon, on minimise les résidus sur l'ensemble de la fenêtre du capteur¹.

Cependant, les résidus issus de la comparaison entre un modèle avec peu de paramètres et le modèle à 36 paramètres se sont révélés être trop importants (de l'ordre de 38 μm) pour l'utilisation de ces modèles dans le projet.

III.2.2 Calcul d'ajustement des corrections de la température

L'étude de l'impact de la température sur les capteurs est bien plus complexe que l'étude des câbles ou des électroniques. En effet, sur les autres parties du dispositif, la température modifiait le signal de la mesure et non la mesure elle-même. Il est par exemple impossible de contrôler la mesure faite par un capteur dans la chambre climatique grâce à un autre dispositif de mesure étant donné que cet autre capteur serait aussi impacté par la température.

L'idée retenue est un calcul d'ajustement. Ce calcul d'ajustement est basé sur l'expression de la position du fil au niveau des capteurs de deux manières différentes, puis calculer le tout en bloc et en extraire les données d'impact de la température. La première expression consiste à définir les positions de fil comme des lectures capteurs auxquelles on ajoute une correction de température (élément recherché). La seconde est d'exprimer ces mêmes positions par un calcul de coordonnées sur une droite définie par ces extrémités. Les inconnues seront les positions de fil ainsi que les corrections de la température, qui seront calculées grâce à la surabondance de données (mesures réalisées par les capteurs).

Pour le test, les capteurs seront positionnés sur le banc en Invar puis leurs mesures seront enregistrées. Ensuite, les trois capteurs au centre seront changés de position avant de remesurer. On réitère l'opération jusqu'à ce que chacun des capteurs soit passé sur chacune des douze positions possibles. On appellera « séquence » une configuration de capteurs donnée : au total il y a donc 12 séquences différentes possibles.

¹Cf. Annexe 1

Pour ce qui est des calculs, commençons par l'expression des deux extrémités du fil :

Il s'agit des deux points de contact du fil avec le banc, que l'on nommera A et B avec

$A \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}$ et $B \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix}$ (avec Y_A et Y_B constants). Il s'agit des positions initiales des extrémités.

Cependant entre chaque séquence, il y a un risque de déplacement du fil (en cas de contact avec un capteur lors d'un changement de position par exemple).

On pose donc

$$A_{seq} = A + \Delta_{seq} \text{ avec } A_{seq} \begin{bmatrix} X_{A_{seq}} \\ Y_A \\ Z_{A_{seq}} \end{bmatrix} \text{ et } \Delta_{seq} \begin{bmatrix} \Delta_{X_A} \\ 0 \\ \Delta_{Z_A} \end{bmatrix}$$

$$B_{seq} = B + \Delta_{seq} \text{ avec } B_{seq} \begin{bmatrix} X_{B_{seq}} \\ Y_B \\ Z_{B_{seq}} \end{bmatrix} \text{ et } \Delta_{seq} \begin{bmatrix} \Delta_{X_B} \\ 0 \\ \Delta_{Z_B} \end{bmatrix}$$

Avec Δ_{X_A} , Δ_{X_B} , Δ_{Z_A} et Δ_{Z_B} étant déterminés par les lectures des deux références entre les différentes séquences.

Une fois cela déterminé, il est possible de calculer les positions du fil dans les capteurs grâce à une équation de droite et des mesures de distance :

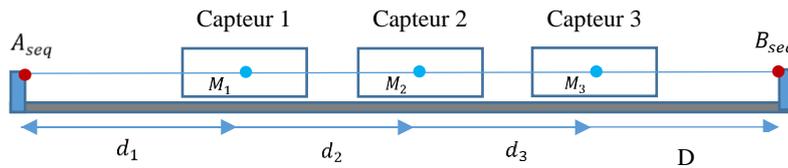


Figure 32 : Illustration de l'expression des variables

$\forall i \in \llbracket 1;3 \rrbracket, M_i \begin{bmatrix} X_{M_i} \\ Y_{M_i} \\ Z_{M_i} \end{bmatrix}$ les trois positions du fil au centre des trois capteurs étudiés.

Par interpolation des extrémité $\forall i \in \llbracket 1;3 \rrbracket, M_i = A_{seq} + (B_{seq} - A_{seq}) * \frac{d_i}{D}$ (5)

Avec d_i les distances longitudinales de A_{seq} au capteur i

$$\text{et } D = \sqrt{(X_{B_{seq}} - X_{A_{seq}})^2 + (Y_B - Y_A)^2 + (Z_{B_{seq}} - Z_{A_{seq}})^2}$$

Puis on exprime ces positions comme des lectures capteur auxquelles on ajoute une correction de la température :

$$\forall i \in \llbracket 1;3 \rrbracket, \quad M_i = T_i^{CMM} + R_i^{CMM} * [t_i^{corr} + r_i^{corr} * f_i^{corr} * C_i] \quad (6)$$

Les C_i sont les coordonnées du fil en millimètres déterminées grâce aux lectures capteur et aux deux calibrations.

Les T_i^{CMM} et R_i^{CMM} sont les translations et rotations permettant le passage du repère interface trois billes au repère Banc Invar² pour chaque interface (connues grâce aux coordonnées des billes mesurées en métrologie).

Les t_i^{corr} , r_i^{corr} et f_i^{corr} sont les termes de la fonction de correction des impacts de la température pour chaque capteur. Elles sont modélisées par des translations, une rotation et des facteurs d'échelle.

En rassemblant les deux équations exprimant M_i et en isolant les mesures et les inconnues, il vient :

$$\forall i \in \llbracket 0;4 \rrbracket, \quad C_i = f_i^{corr-1} * r_i^{corr-1} * \left[R_i^{CMM-1} * \left[\left(A_{seq} + (B_{seq} - A_{seq}) * \frac{d_i}{D} \right) - T_i^{CMM} \right] - t_i^{corr} \right] \quad (7)$$

Dans cette équation, les C_i correspondent aux observations et les t_i^{corr} , r_i^{corr} , f_i^{corr} , A_{seq} et B_{seq} sont les inconnues.

Les T_i^{CMM} et R_i^{CMM} sont des données connues.

Ce calcul de l'équation (7) sera effectué en bloc pour chaque campagne de mesures (ensembles de douze séquences) faite à une température donnée grâce à la méthode des moindres carrés. Le but final étant l'obtention des t_i^{corr} , r_i^{corr} , f_i^{corr} pour chaque capteur à chaque température.

² Cf. Annexe 3

À partir de cette équation, plusieurs hypothèses peuvent être testées, par exemple le fait que la température a le même impact sur n'importe quel capteur.

III.3 Résultats

III.3.1 Électroniques

Nous avons testé 3 électroniques de Fogale Nanotech afin d'étudier leurs différentes réactions face aux variations de température. L'objectif est d'estimer l'impact de ces variations, mais également de savoir si les différentes électroniques ont toutes les mêmes réactions vis-à-vis de ces variations. En effet, le projet CLIC requiert un grand nombre de capteurs et d'électroniques (environ 60 000) et des réponses similaires à des variations de température similaires s'avèrent indispensables afin d'éviter de calibrer chacune des électroniques individuellement dans la chambre climatique.

La procédure consiste à installer la partie électronique dans la chambre climatique puis à réaliser une série d'étalonnage d'une électronique dans la chambre climatique puis une série de calibration était réalisée. Le câble et le capteur ne sont pas changés entre les changements d'électroniques, afin de n'observer que l'influence de la température sur l'électronique. Les calibrations s'enchaînaient tandis que la chambre climatique portait l'électronique de 20 °C à 30 °C puis de 30 °C à 40 °C avant de faire le cycle inverse afin de revenir à 20 °C. Ces cycles de 20 °C à 40 °C sont alternés avec des cycles de 25 °C à 35 °C afin d'affiner notre modèle.

Ces cycles sont réitérés autant de fois que possible, et ce pour chacune des trois électroniques, de manière à étudier la répétabilité de la mesure à chaque température. Pour pouvoir faire des calibrations en continu comme ceci, le programme de contrôle du banc de calibration a été modifié, permettant ainsi les mesures la nuit et le week-end et optimisant la courte disponibilité de la chambre climatique.

Les résultats sont sous la forme de deux facteurs d'échelle et deux translations relativement aux deux axes de lecture permis par le capteur.

Un exemple d'application de ces corrections est développé en annexe³, basé sur les formules :

$$\begin{aligned} X_{\text{corrigé}} &= X_{mm} * (1 + f_X) + T_X \\ Y_{\text{corrigé}} &= Y_{mm} * (1 + f_Y) + T_Y \end{aligned} \tag{8}$$

³ Cf. Annexe 2

Avec f_x, f_y et T_x, T_y les facteurs d'échelles et les translations selon les axes X et Y.

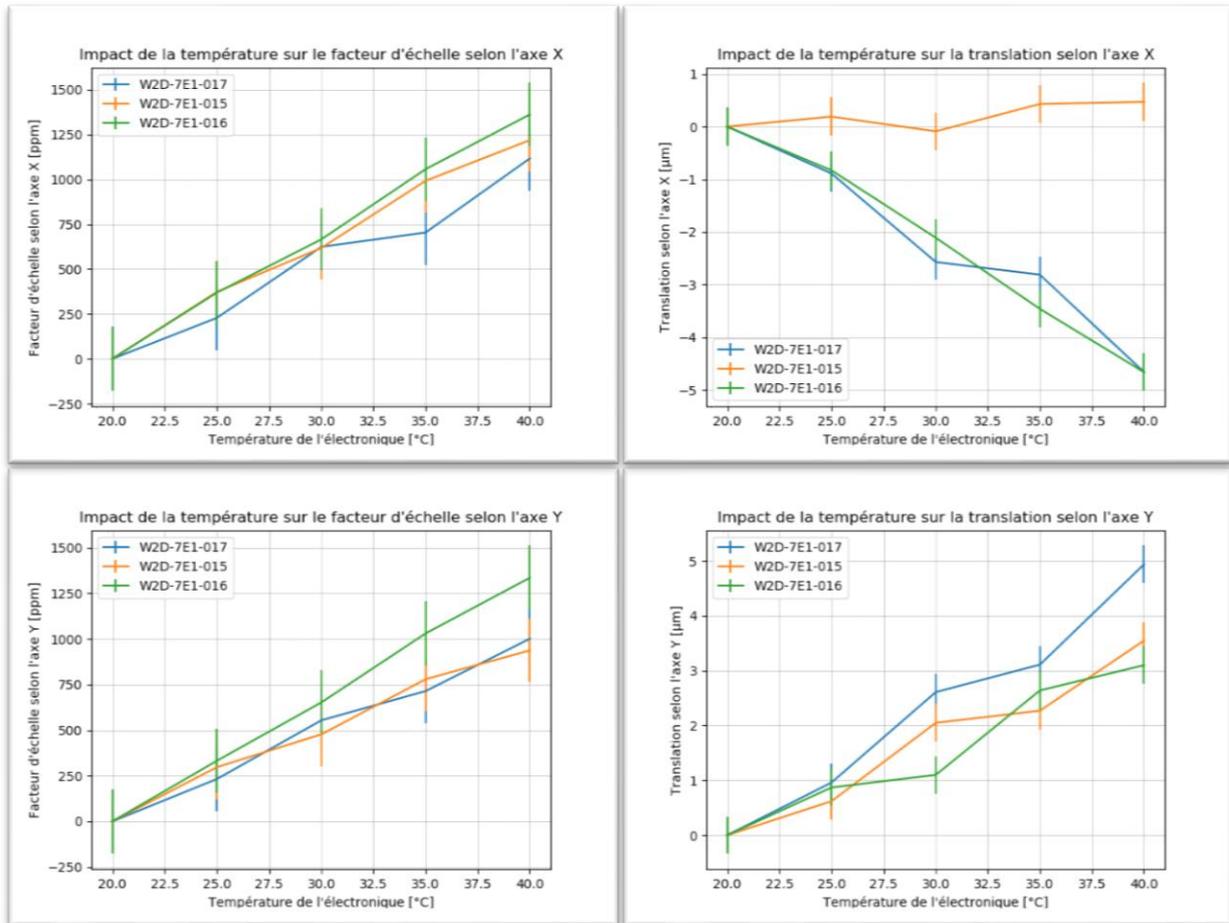


Figure 33 : Résultats des électroniques avec leurs précisions après notre campagne de tests

Les électroniques ont a priori le même comportement face à la température (cf. Figure 33). On peut cependant remarquer une différence au niveau de la translation selon l'axe X pour l'électronique W2D-7E1-015.

Une étude des composants internes à l'électronique nous a révélé la présence de résistances servant au fabricant pour la calibration des ensembles électroniques-câbles-capteur. Ces résistances permettent notamment d'obtenir une sortie 5V/5V lorsque le fil est positionné au centre du capteur. Ces résistances sont différentes pour chaque électronique et ont donc des impacts différents pour des températures différentes, ce qui pourrait expliquer la différence observée entre les électroniques et notamment la W2D-7E1-015.

Les condensateurs présents sont une autre piste pour expliquer les impacts de la température. Ces condensateurs traitent le signal revenant du capteur et ont donc de grands impacts sur les mesures. Ces condensateurs peuvent être de différentes classes selon les matériaux qui les composent et ces matériaux réagissent différemment vis-à-vis de la

température. Ainsi, certaines classes de condensateurs voient leur capacitance varier en fonction de la température. Il est important d'indiquer que ces condensateurs ne sont pas en contact direct avec l'air de la pièce (l'électronique étant totalement étanche pour pouvoir opérer sans risque en atmosphère explosive) et sont eux-mêmes fermés avec des matériaux séparant les électrodes. L'humidité de la pièce n'a donc pas d'impact sur eux.

Des tests additionnels sont en cours avec les nouvelles électroniques développées par le CERN, qui n'utilise que des condensateurs appartenant à une classe de matériaux insensibles à la température. Ces tests permettront d'estimer plus précisément l'impact de la température sur les différents composants (résistances, condensateurs...) de l'électronique dans le but d'en développer une version améliorée. Ils permettront d'estimer le degré de similitude entre les électroniques et juger légitime ou non la création d'un modèle précis de leur comportement vis-à-vis de la température.

III.3.2 Câbles

Durant ces tests, deux câbles de 30 m, deux câbles de 60 m et un câble de 100 m ont été testés soit un total de cinq câbles de manière à avoir des informations sur l'impact de la longueur du câble, mais également afin d'observer les éventuelles différences de comportement de câbles de même longueur.

Pour les tester, nous les avons placés dans la chambre climatique avant d'effectuer des cycles similaires aux cycles réalisés pour les électroniques. Nous les avons déroulés du mieux possible dans la chambre afin d'éviter les effets de bobinage qui apparaissent dans un câble sous tension et enroulé (même si le câble a été élaboré pour contrer cet effet) comme mentionné par [A. MARIN, 2013].

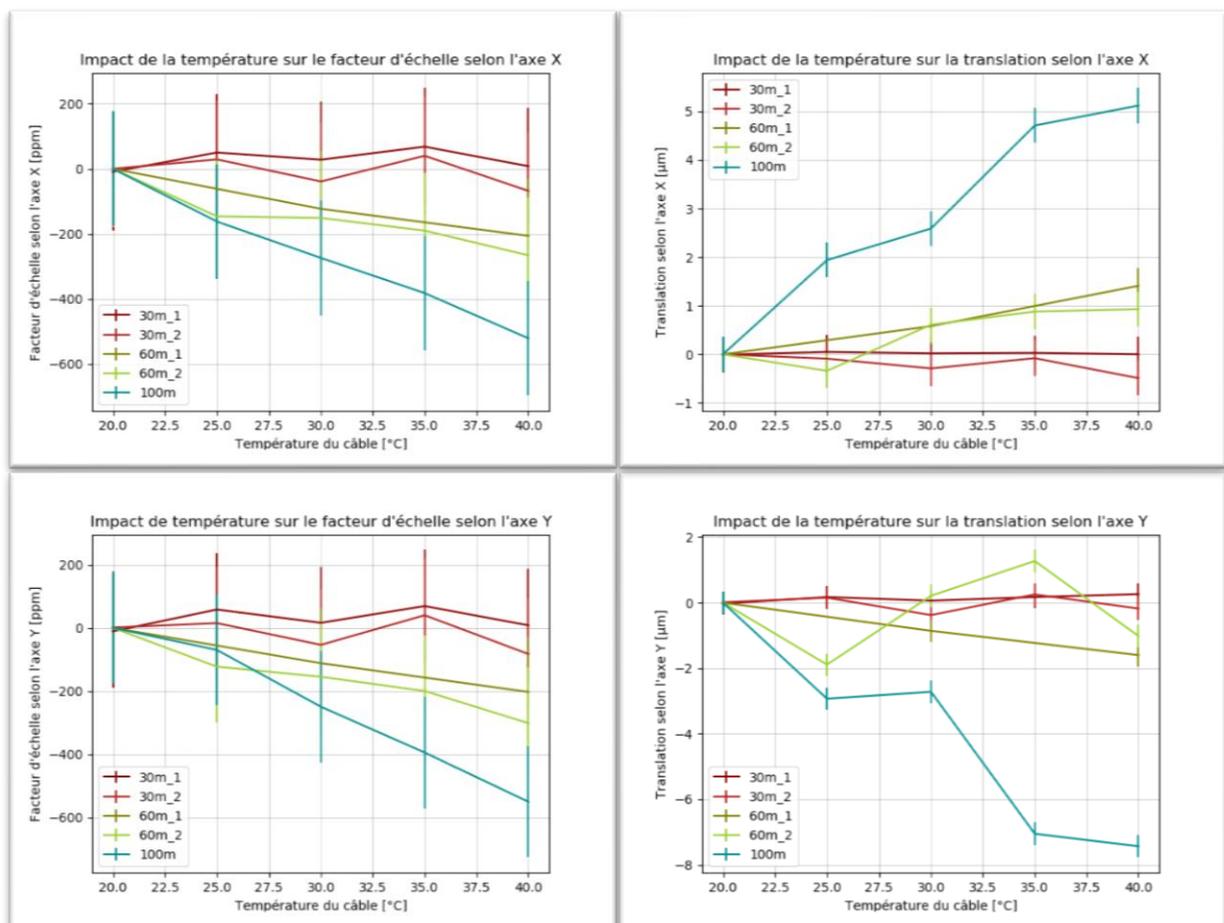


Figure 34 : Résultats des câbles et leur précision après notre campagne de tests

Les câbles ont tous un comportement semblable vis-à-vis de la température (cf. Figure 34). Ce comportement est accentué avec la longueur du câble : les câbles de 30 m subissant très peu l'impact de la température tandis que le câble de 100 m le subit fortement. Les valeurs de facteurs d'échelles sont environ deux fois moins importantes en valeur absolue que celles obtenues avec les électroniques. Les translations quant à elles sont du même ordre de grandeur.

L'hypothèse principale pour expliquer ce phénomène est la variation d'impédance au sein du câble. Les mesures étant extrêmement précises, les variations même très faibles d'impédance ont un impact sur les résultats. Cette variation d'impédance s'expliquerait par des déformations internes du câble, dues aux différentes dilatations des matériaux (cf. Figure 35). Ces déformations ont pour effet de modifier l'angle de croisement des câbles internes, réduisant alors les bénéfices octroyés par ce croisement.

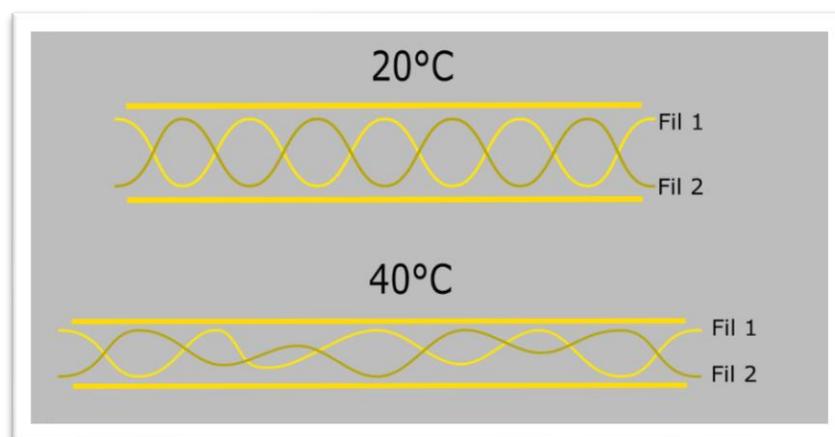


Figure 35 : Une des hypothèses pouvant expliquer l'impact de la température sur les mesures : la déformation interne des câbles

Les câbles ont des résultats plus constants que les électroniques, dus à leur simplicité de fonctionnement et à la précision de leur réalisation. La répétabilité de ces déformations avec la température devra faire l'objet de tests supplémentaires. Il faudra également étudier la sensibilité de ces câbles aux champs électromagnétiques externes à 40 °C, température où la configuration des composants internes ne semble pas optimale. Il faudra enfin réitérer les tests de bobinage des câbles aux différentes températures. En effet, le croisement interne des câbles était important pour la stabilité des mesures notamment dans les cas où les câbles étaient enroulés.

Cependant, le projet prévoit d'utiliser des câbles bien plus courts que ceux étudiés (environ 2 mètres), l'impact de la température sera alors sans doute très faible.

III.3.3 Capteurs

Durant ces tests, 5 capteurs ont été placés dans la chambre climatique sur un banc en Invar. Le but était d'observer l'impact de la température sur ces capteurs, mais également de comparer les différentes mesures de capteurs afin d'étudier leur éventuelle interchangeabilité dans le cas de fortes variations de température.

III.3.3.1 Premiers tests

III.3.3.1.1 Temps de dilatation

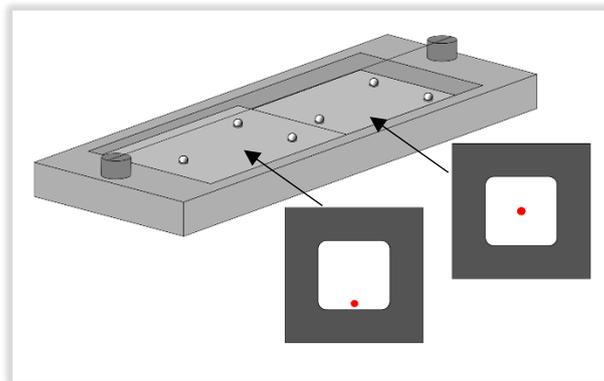


Figure 36 : Banc en aluminium à deux positions et position approximative du fil dans le capteur

Pendant la mesure du banc Invar en salle de métrologie, la chambre climatique a été utilisée pour réaliser des tests préliminaires sur les capteurs. Pour ce faire, nous avons un petit banc en aluminium muni de deux interfaces trois billes décalées verticalement (cf. Figure 36). Ainsi, lorsque deux capteurs sont installés, l'un d'eux voit le fil proche de son centre tandis que l'autre le voit excentré.

Le but était de faire des cycles de variation de température et d'observer le comportement des capteurs. Nous cherchions à voir notamment l'impact de la température sur la lecture du capteur en fonction de la position du fil (centré ou excentré).

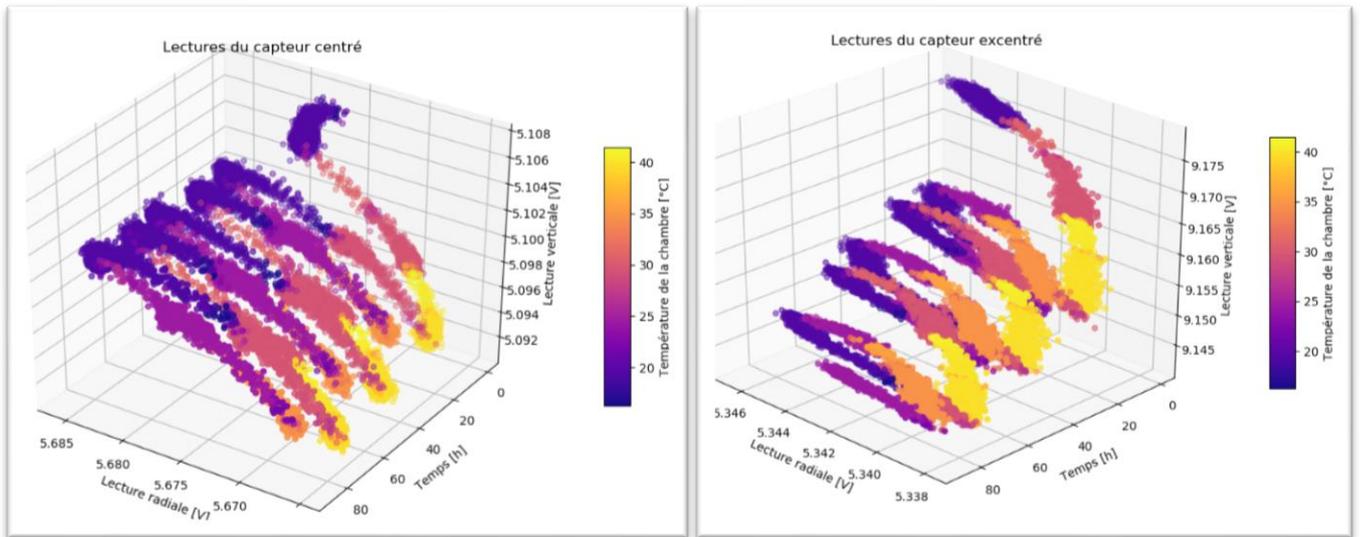


Figure 37 : Lectures radiales et verticales des capteurs au cours du temps

Les deux capteurs semblent avoir des comportements différents après les cycles de température : le capteur ayant le fil en son centre a des lectures identiques pour des températures identiques, les lectures semblent répétables. Les mesures de l'autre capteur, quant à elles, ne semblent pas répétables (cf. Figure 37).

En se concentrant sur les lectures d'un des axes du capteur en fonction du temps, on remarque que la non-répétabilité du capteur dont le fil est excentré provient du fait qu'il ne parvient pas à se stabiliser avant que la température ne change, contrairement au capteur avec le fil en son centre (cf. Figure 38). Les tests ont été effectués avec des paliers de 4 heures, durée qu'il faudrait doubler pour que les deux capteurs aient le temps de se stabiliser.

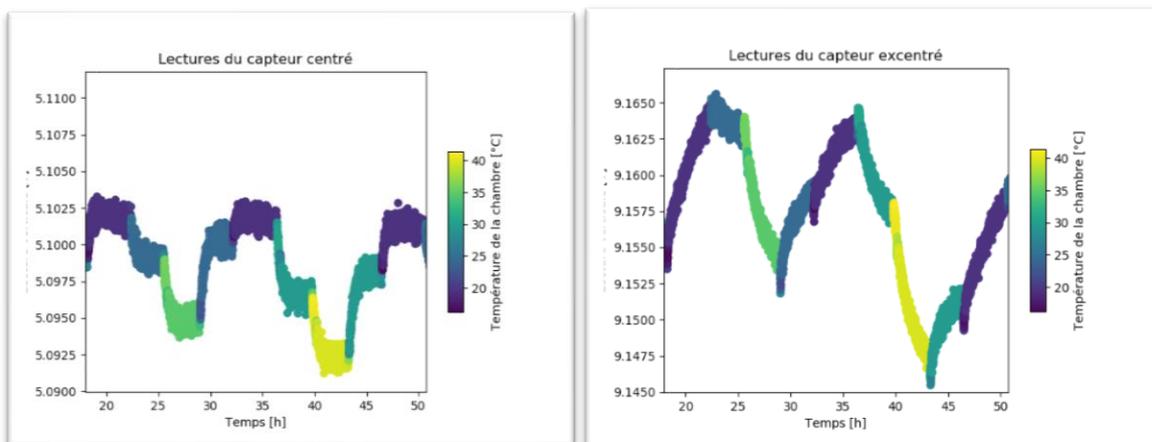


Figure 38 : Lectures verticales des capteurs au cours du temps

Ces tests ont également souligné un autre problème : la variation incontrôlée de l'humidité lors des variations de température (cf. Figure 39). L'humidité ayant un fort impact sur les mesures capacitives, il fallut la prendre en compte dans l'étude des capteurs.

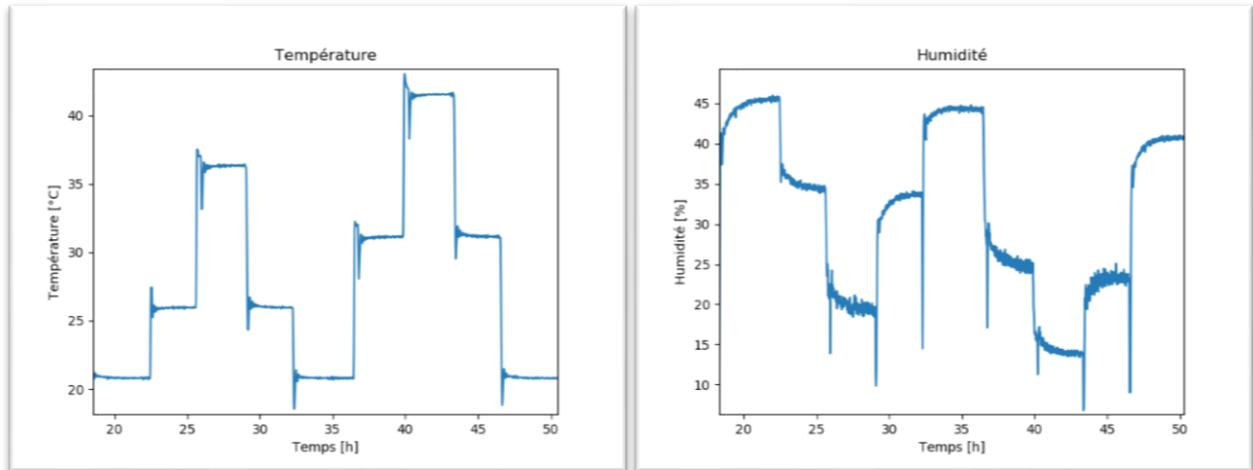


Figure 39 : Forte corrélation entre température et humidité dans la chambre climatique

III.3.3.2 Le banc en Invar

La taille de la chambre climatique étant réduite, il fallut créer un banc de calibration sur mesure permettant d'étudier la sensibilité thermique des capteurs. La plupart des pièces ont été faites en Invar, de manière à limiter le plus possible la dilatation du banc. Nous pourrions ainsi nous concentrer sur les capteurs et leur comportement vis-à-vis de la température.

Le banc fut livré en pièces détachées, il restait à les contrôler, les assembler et les mesurer. La première partie fut le collage des 42 billes en oxyde de zirconium, destinées à supporter les interfaces trait-point-plan. Pour cela, il fallait sabler chaque cône devant recevoir une bille avant de le nettoyer à l'éthanol puis à l'acétone pour finalement coller la bille et attendre le séchage. Une fois les billes solidement collées aux pièces en Invar, il fallait ôter les résidus de colle afin d'obtenir la surface de chaque bille aussi lisse que possible. Nous avons donc passé en revue les 42 billes à l'aide d'un microscope et un scalpel, retirant systématiquement chaque résidu de colle. Il ne restait alors plus qu'à mesurer la position de chacune des billes en CMM sur la Leitz Ultra 12.10.7 (précision de $0.4 + L/850$

μm) comme le mentionnent [D. GLAUDE et S. GRIFFET, 2010], toutes exprimées dans le repère dit du banc Invar⁴.

III.3.3.2.1 Vérification de la ligne droite

Ce test est principalement un contrôle du bon fonctionnement du banc et des capteurs. Il consiste à transformer les coordonnées du fil lues par chaque capteur dans le repère du banc (cf. Figure 40). Pour se faire, les positions du fil dans les capteurs sont transformées de volts en millimètres à l'aide des polynômes de calibration relative. Ces positions passent ensuite du repère capteur au repère de l'interface trois billes grâce aux données de calibration absolue. On finit enfin par transformer toutes les positions dans le repère du banc grâce aux coordonnées des billes exprimées dans ce repère (déterminées par la mesure en métrologie). Il ne reste alors qu'à vérifier l'alignement des 5 points qui correspondent aux lectures du fil effectuées par chaque capteur.

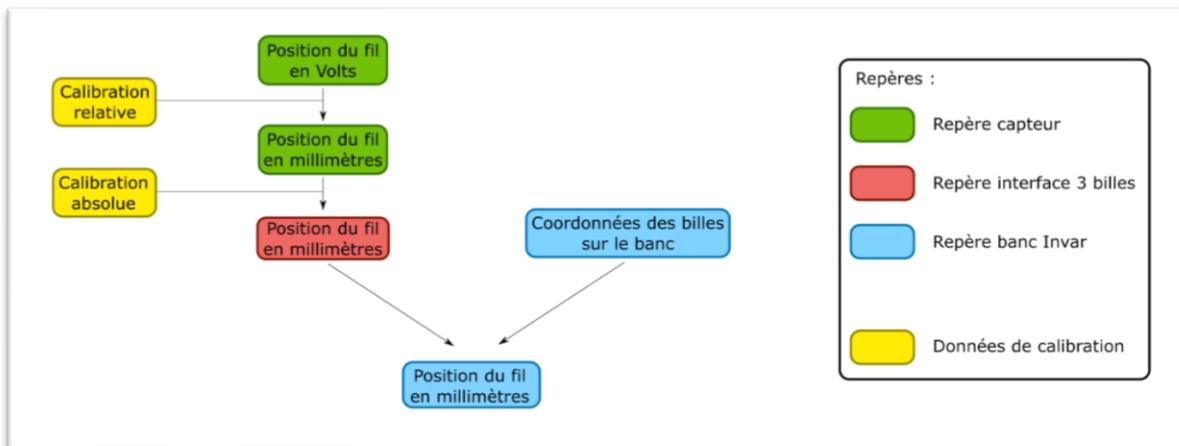


Figure 40 : Différentes étapes et différents repères intervenant dans le test de la ligne droite

⁴ Cf. Annexe 3

Coordonnées du fil par capteur [mm]			
	X (long)	Y (radial)	Z (vertical)
W2D-7E1-018	35,026	0,027	34,553
W2D-7E1-015	205,056	0,065	34,554
W2D-7E1-016	384,907	0,089	34,541
W2D-7E1-017	565,260	0,120	34,530
W2D-7E1-019	735,096	0,163	34,528
Régressions linéaires (avec prise en compte de la flèche théorique du fil)			
a		0,00019	-0,00004
b		0,021	34,558
Coordonnées radiales et verticales projetées sur les droites de régression [mm]			
W2D-7E1-018		0,028	34,557
W2D-7E1-015		0,059	34,549
W2D-7E1-016		0,093	34,541
W2D-7E1-017		0,126	34,533
W2D-7E1-019		0,158	34,526
Écarts [μm]			
W2D-7E1-018		-1	-3
W2D-7E1-015		6	5
W2D-7E1-016		-4	0
W2D-7E1-017		-6	-4
W2D-7E1-019		5	1

Tableau 3 : Récapitulatif du test de la ligne droite

Ce test permet de vérifier que les calibrations (relative et absolue) sont correctes et que les différentes pièces que comporte le banc n'ont pas été déplacées lors d'une manipulation des capteurs. Ce test a été effectué à 20 °C (cf. Tableau 3), tout comme la calibration des capteurs et la mesure en métrologie. Les capteurs ayant une justesse (empirique) de 5 μm , les résultats du test confirment les différentes calibrations et mesures effectuées jusque-là.

III.3.3.3 Problèmes rencontrés

III.3.3.3.1 Déformation de la table optique

Le banc en Invar est composé d'une base, une table optique, sur laquelle sont fixées les pièces en Invar (cf. Figure 41).

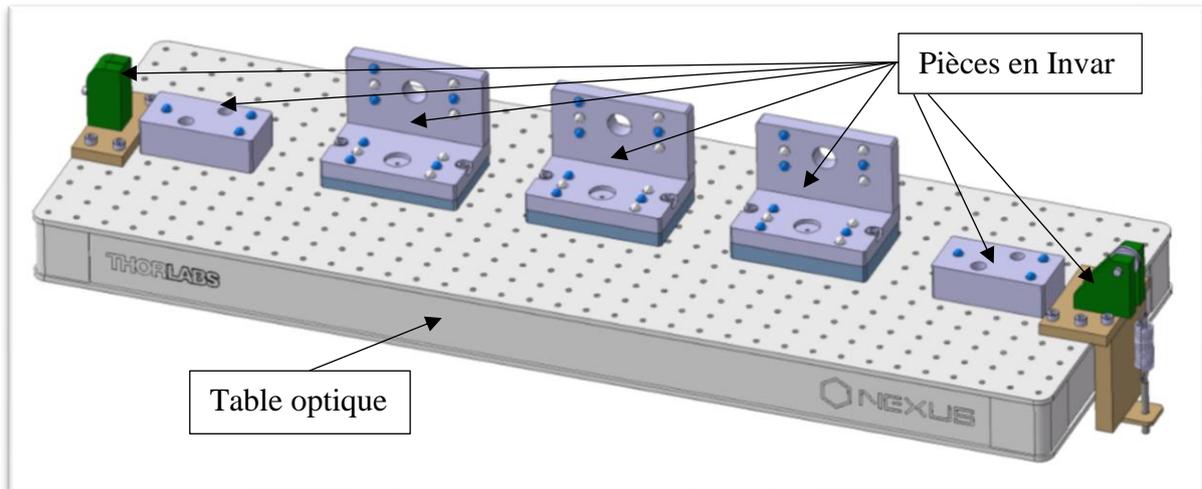


Figure 41 : Schéma annoté du banc en Invar

Ce banc a pour principal objectif d'être très peu sensible à la température de manière à pouvoir mieux observer l'impact de la température sur les capteurs. L'Invar est réputé pour son très faible coefficient de dilatation thermique, notamment dans la gamme de température de notre projet, c'est pourquoi il a été choisi comme matériau pour les différentes pièces du banc. En revanche, une base entière en Invar aurait eu un coût astronomique. Il a donc été jugé suffisant pour nos tests d'installer les pièces en Invar sur une table optique (constituée d'un maillage en nid d'abeille collé aux deux plaques d'acier par de l'époxy). Ainsi, même si la table se dilatait, le déplacement longitudinal (supposément le plus important) ne sera même pas remarqué par les capteurs (qui ne mesurent qu'en radial et vertical). Les déplacements verticaux quant à eux devraient être similaires pour les capteurs, tous positionnés sur la même table. Enfin les dilatations radiales sont aussi supposées similaires pour tous les capteurs, qui sont positionnés sur une ligne.

Une fois le banc placé dans la chambre, nous avons réalisé le test de ligne droite pour vérifier les lectures des capteurs ainsi que les différentes calibrations et les coordonnées mesurées en métrologie. Nous avons ensuite effectué les cycles de variation de température,

puis nous avons réitéré le test de ligne droite. Cette fois-ci, le test indiquait un alignement correct en radial, mais erroné en vertical (cf. Figure 42 et Figure 42).

Les écarts en vertical ont une forme caractéristique : alors que les capteurs devraient observer un fil droit, ils observent une parabole. Or le fil est bel est bien tendu et donc droit.

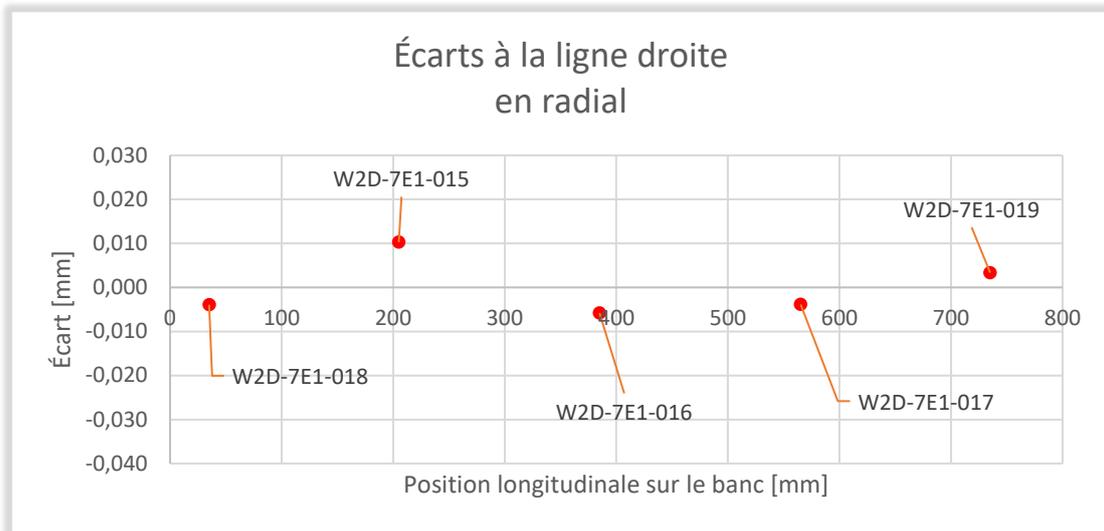


Figure 42 : Écarts en radial

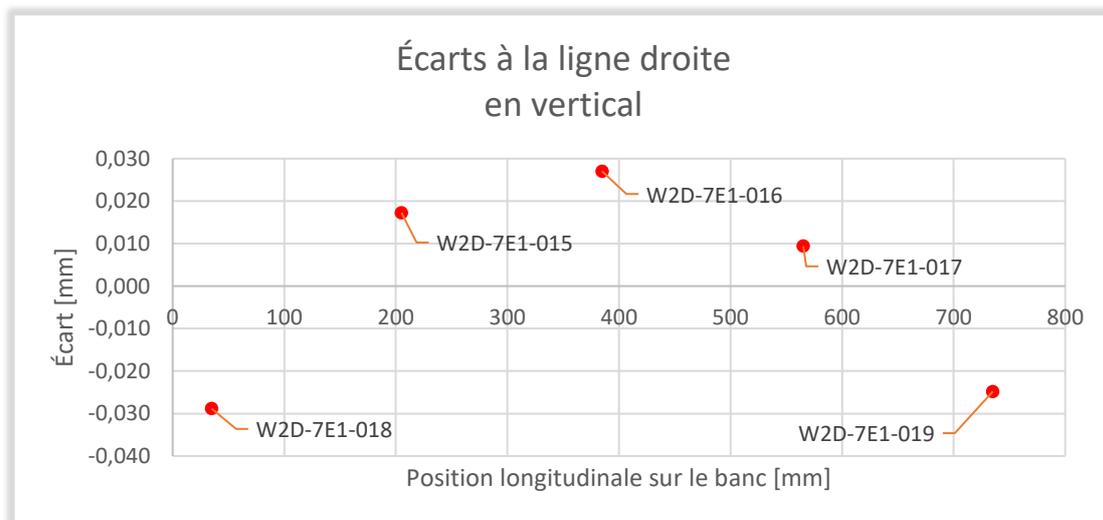


Figure 43 : Écarts en vertical

Cette parabole s'explique par la déformation de la table optique, qui s'est affaissée (cf. Figure 44). La déformation représentée sur la figure est basée sur les mesures faites sur des repères mesurés lors de la mesure en métrologie. Le fil est alors observé plus haut qu'il ne devrait l'être, surtout au centre.

Les mesures faites avec un Leica AT401 ont confirmé cette déformation grâce aux repères (fiducielles) placés sur le banc et mesurés en métrologie. Ainsi au bout de 4 semaines

d'installation et de plusieurs cycles de température, la table s'est déformée de 60 micromètres.

Une des solutions étudiées est le rajout de poutrelles vissées sur la table afin de la rigidifier. Ces poutrelles devront être si possible structurellement identiques afin d'éviter les écarts lors de la dilatation. En effet, des matériaux similaires se déforment de la même manière et il y a donc moins de chance d'avoir des écarts une fois chauffé ou refroidi.

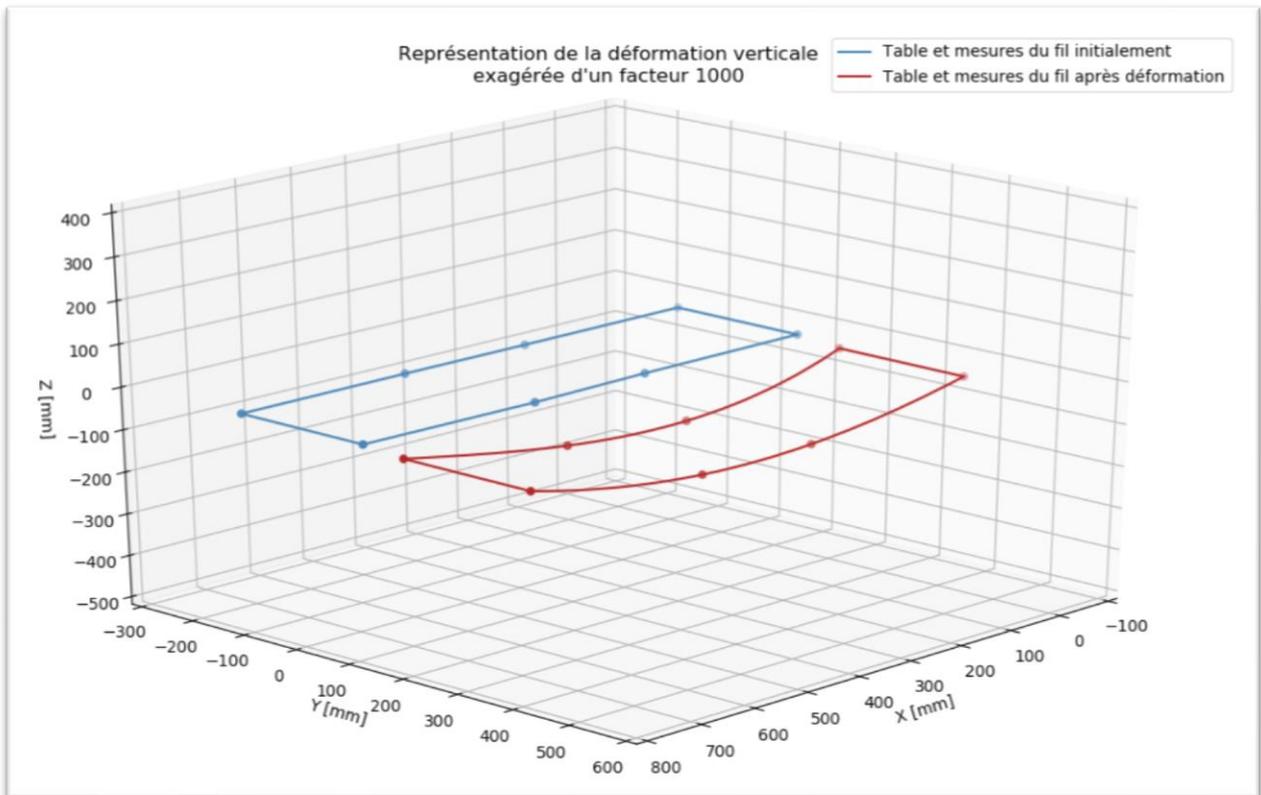


Figure 44 : Représentation de la table avant et après déformation

III.3.3.3.2 Stabilisation du capteur de référence

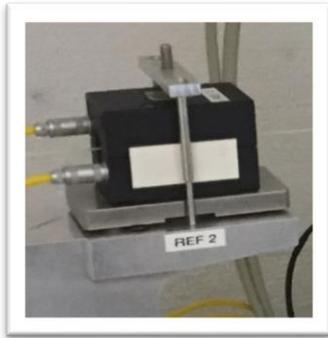


Figure 46 : Photo du porche habituellement utilisé pour maintenir les capteurs

Habituellement, sur les différents bancs d'étalonnage et sur les accélérateurs, les capteurs WPS sont posés sur les interfaces trois billes puis sont maintenus en place par un porche (cf. Figure 46). Ce porche est une structure entourant le capteur, qui le maintient par le biais d'une vis qui vient toucher le capteur. Le contact est alors un point qui ne fait que contraindre le capteur sur l'interface 3 billes. Ce dispositif ne fait que stabiliser le capteur sur son interface 3 billes et éviter qu'il ne bouge lorsqu'on déplace le fil par

exemple. Il ne vient en aucun cas serrer le capteur sur l'interface, ce qui entrainerait un mauvais contact sur l'interface 3 billes ou même sur déformation des pièces et un endommagement du capteur.

Sur le banc en Invar, un autre système est utilisé pour assurer la stabilité du capteur. Afin de pouvoir occuper les différentes positions horizontales et verticales, le capteur est maintenu en place par des aimants. Un aimant est fixé au centre de l'interface trait-point-plan et un autre est fixé au centre de l'interface trois billes (cf. Figure 45). Ainsi, aucun porche n'est requis pour maintenir le capteur. De plus le capteur reste isolé électriquement du banc.

Cependant, sur le banc en Invar, seuls les capteurs étudiés ont été munis du système de centrage aimanté, les capteurs de référence n'ayant pas besoin d'être fixés sur une interface verticale. Aucun dispositif de maintien n'avait été prévu, le poids du capteur et de l'interface devant supposément suffire à le maintenir en place (cf. Figure 47).

Il en a résulté une transmission des vibrations de la chambre climatique au capteur par le biais des câbles (le banc étant isolé des vibrations par des patins en



Figure 45 : Photos des interfaces trois billes et trait-point-plan des capteurs étudiés munis d'aimants



Figure 47 : Photo d'une interface trois billes classiques des capteurs de références sans système de maintien (banc Invar)

mousse). Le capteur n'étant pas stabilisé, les mesures sont apparues plus bruitées que celles faites par les autres capteurs (cf. Figure 48).

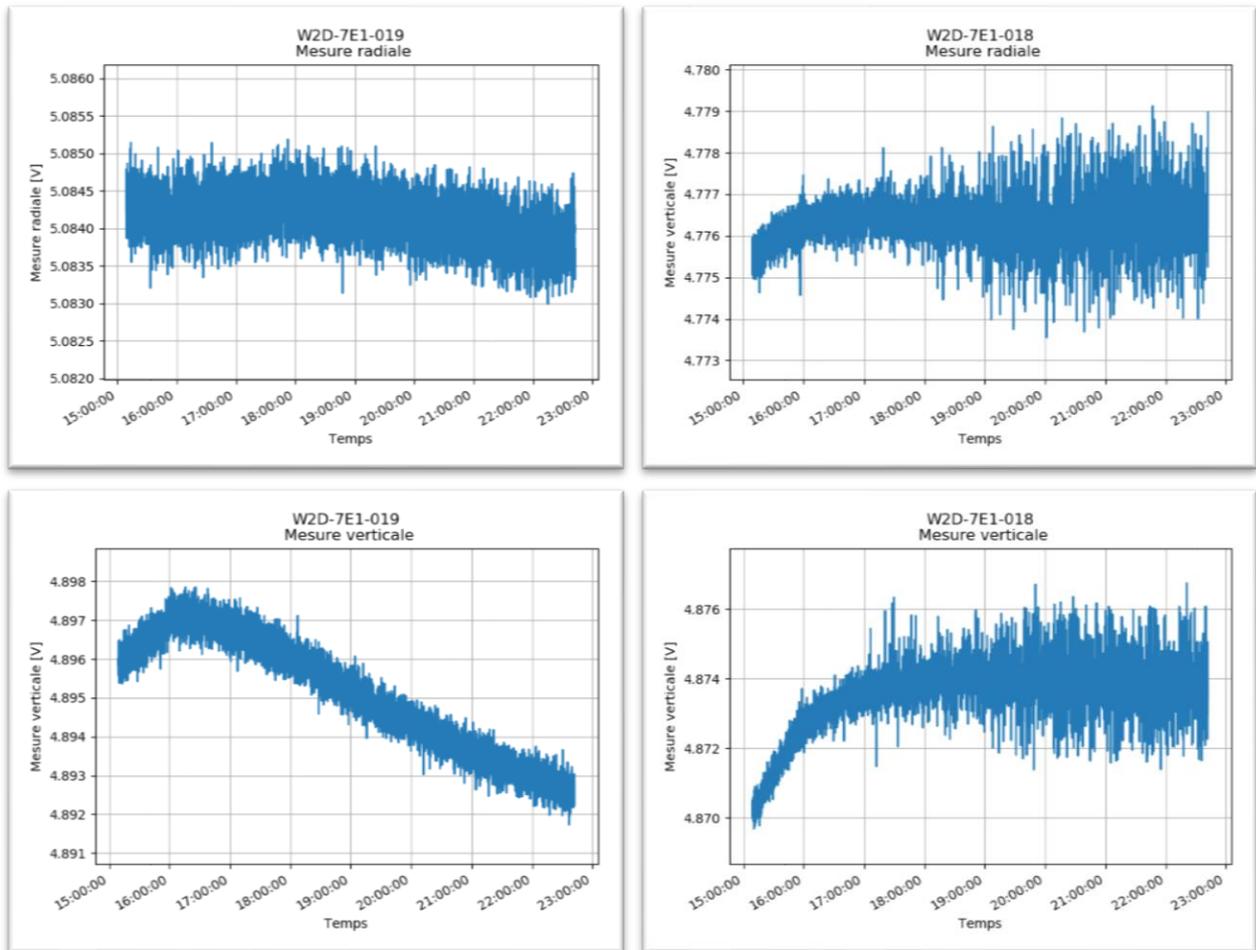


Figure 48 : Comparaison des mesures radiales et verticales d'un capteur normal (à gauche) et du capteur bruité (à droite)

Étant donné la nécessité de retourner en métrologie pour être remesuré après sa déformation, une solution étudiée consiste à démonter les deux interfaces et d'ajouter un aimant comme sur les capteurs étudiés.

IV Pistes de tests complémentaires

IV.1.1 Tests relatifs aux câbles

Il serait intéressant d'étudier plus précisément les câbles et leur sensibilité à la température. Cette étude devrait être purement électronique et ne pas faire intervenir de calibrations ou de mesures des capteurs. En nous concentrant les valeurs d'impédance, d'inductance et de résistivité du câble, nous devrions être en mesure de retrouver leur impact sur les mesures et voir comment ces paramètres varient selon la température.

IV.1.2 Tests relatifs aux électroniques

Ces tests sont prévus et vont permettre une étude approfondie de la sensibilité des différents composants des électroniques. Ces tests seront faits sur les électroniques développées par le CERN vouées, à terme, à remplacer les électroniques de l'entreprise Fogale dans les accélérateurs. Étant donné que ces électroniques sont développées en interne, les composants et leurs sensibilités (à la température, mais aussi aux radiations) sont connus ou tout du moins testables, et ce, de manière plus précise. On pourra faire notamment des tests en modifiant différentes valeurs de résistances internes avant de refaire des cycles de température afin d'affirmer ou d'infirmer l'impact de celles-ci sur la mesure.

Il serait également intéressant, une fois les câbles et électroniques testés en profondeur, de les placer ensemble dans la chambre climatique, afin de voir s'il y a ou non un phénomène d'amplification réciproque des écarts liés à la température.

IV.1.3 Tests relatifs aux capteurs

Les tests relatifs aux capteurs se décomposent en tests sur le fil et notamment sa sensibilité à l'humidité, et en tests sur les capteurs eux-mêmes, aussi bien les modèles fournis par Fogales que les modèles développés au CERN.

IV.1.3.1 Impact de l'humidité sur le fil

L'impact de l'humidité du fil en carbone-kevlar est très important, car il peut en résulter plusieurs choses. En premier lieu, l'humidité aura pour effet de modifier la forme même du fil (étant un fil tressé, les bruns de kevlar se chargent en humidité alors que les bruns de carbone beaucoup moins). La section du fil s'éloignera alors d'une section circulaire et aura sans doute des impacts sur les mesures.

Le deuxième effet sera une augmentation de la charge linéique du fil, impactant fortement la flèche. Des données sur le temps de chargement et de décharge du fil en humidité pourraient également être très intéressantes (tests à réaliser sur le long terme). Sans doute d'autres effets feront leur apparition.

IV.1.3.2 Impact de l'humidité est de la température sur les capteurs

Des tests complétant l'étude actuelle seront nécessaires pour pouvoir conclure quant à la faisabilité d'utiliser ce type de capteurs pour l'alignement des modules du CLIC. Des tests en chambre climatique avec contrôle de l'humidité semblent nécessaires. Cela permettrait de faire des modèles plus complets prenant en compte le couple humidité-température qui sont intimement liés comme nous avons pu le voir. Ces tests seront complétés par les tests des nouveaux capteurs en développement au CERN. Capteurs qui eux aussi pourraient, à terme, remplacer sur le terrain les capteurs de Fogale.

Conclusion

Ce travail de fin d'études a permis d'approfondir notre connaissance du dispositif de mesure WPS. L'objectif était d'étudier l'impact de la température sur l'ensemble des composants du dispositif : les capteurs, mais aussi les câbles et les électroniques. Cette étude devait permettre de conclure quant à leur possible utilisation dans le cadre du projet CLIC et de, si possible, créer un modèle de correction de cette température.

Après avoir étudié en profondeur le dispositif et les calibrations de ce dispositif, nous avons été en mesure d'observer les impacts de la température sur les électroniques et les câbles. Ces impacts sont non négligeables dans le cadre du projet CLIC, mais modélisables grâce à deux facteurs d'échelle et deux translations.

Les électroniques actuellement utilisées ne semblent pas convenir au projet CLIC étant donné le comportement différent de l'une d'entre elles. En effet, le projet nécessite presque 60 000 capteurs et donc autant d'électroniques. Un comportement similaire vis-à-vis de la température est un critère nécessaire que les électroniques fournies par l'entreprise Fogale Nanotech ne semblent pas respecter. Cependant, nous n'avons à disposition que trois électroniques et il serait intéressant d'en tester plusieurs autres afin de confirmer cette différence notable ou de montrer que cet écart n'est qu'une anomalie. Car sinon, les translations n'excèdent jamais 5 μm et les facteurs d'échelle 1500 ppm pour des variations de 20 °C. Les tests des électroniques créées au CERN sont primordiaux pour comprendre l'impact de la température sur les différents composants et ainsi créer des électroniques convenant pour le projet.

Pour ce qui est de l'utilisation dans le cadre du projet CLIC, les câbles semblent convenir : ils ont tous un comportement similaire et l'impact de la température augmente avec la longueur du câble. Pour une variation de 20 °C, les translations vont de 0 à 7 μm au maximum pour des longueurs de câble de 30 m à 100 m. Les facteurs d'échelle vont de 0 à 600 ppm. Ces impacts sont ainsi facilement corrigés, mais une compréhension plus poussée des phénomènes physiques expliquant de tels impacts pourrait être bénéfique pour de futurs développements de câbles toujours plus précis.

Les capteurs, quant à eux, n'ont pas fini de nous révéler tous leurs secrets. Nous avons découvert leur forte sensibilité à l'humidité, que nous avons prise en compte tout au long du projet. Nous savons également que la température a un impact non négligeable, mais nous n'avons pas été en mesure de l'observer correctement. La chambre climatique avec contrôle de l'humidité devrait palier à ce léger contretemps et compléter notre connaissance de ces capteurs. Dans le même temps, les nouveaux capteurs seront également testés. Pour l'instant, il est impossible de conclure quant à l'utilisation de ces capteurs dans le cadre du projet CLIC. De nombreux tests restent à faire.

Ce travail de fin d'études au CERN m'a permis d'expérimenter un séjour dans le monde de la recherche. C'est un domaine complètement différent que ce qui nous est habituellement présenté, où il n'existe que partiellement des procédures et où il faut sans cesse faire preuve d'adaptation et d'ingéniosité dans un cadre où se côtoient industrie lourde et précisions extrêmes. J'ai été en mesure d'appliquer un bon nombre de connaissances acquises lors de mon cursus, que j'ai eu la chance d'enrichir grâce aux nombreux experts présents tout au long du projet, et ce dans un bon nombre de domaines. Cette expérience marquante aura renforcé mon admiration pour la physique et le monde de la recherche.

Bibliographie

¹ H. Mainaud Durand, J. Pfingstner, and V. Rude, “Micrometric Propagation of Error Using Overlapping Stretched Wires for the CLIC Pre-Alignment”, in *Proc. 8th Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'17)*, Copenhagen, Denmark, May 2017, paper TUPIK098, pp. 1935-1938, ISBN: 978-3-95450-182-3, <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2017-TUPIK098>, <http://jacow.org/ipac2017/papers/tupik098.pdf>, 2017.

²20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn Benevento, Italy, September 15-17, 2014

³ BECKER F. ,2003, Définition d'un réseau de référence métrologique pour le positionnement d'un grand accélérateur linéaire. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

⁴ RUDE V. 2018. Rapport cWPS versus CMM. EDMS document 1891580, CERN

⁵ TOUZÉ Thomas, Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC, Science de l'information géographique, Genève : Université de Paris-Est, 2010, 190 p.

⁶ MARIN A. 2013, WPS torsadage CERN des câbles Mulrad et nouveaux câbles Mulrad. EDMS document 1310710, CERN.

⁷ HERTY A. Micrometer precision calibration methods for alignment sensors in particle accelerators, Master of Philosophy thesis, school of Architecture, Design and the Built Environment, Nottingham Trent University, 2009, 184 p.

⁸ RUDE, V. 2013, Procédure : Banc de linéarité cWPS, EDMS document 1529688, CERN.

⁹ HORN Roger A., JOHNSON Charles R,1985 , Matrix Analysis, Cambridge University Press, 662.p

¹⁰ PRESS W.H. ; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A.; and Vetterling, W.T. “LU Decomposition and Its Applications.” §2.3 in *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of scientific Computing*, 2nd ed. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1992 , p. 1193

¹¹ Philippe Ciarlet, Introduction à l'analyse matricielle et à l'optimisation, éd. Masson, coll. Math. Appl. Pour la Maîtrise, 1985 (rééd, 2001)

¹² TOUZÉ T. Proposition d'une méthode d'alignement de l'accélérateur linéaire CLIC, Thèse de doctorat en science de l'information géographique, Marne-la-Vallée : Université de Paris-Est, 2011, 190 p.

¹³ MARIN A. 2013, WPS torsadage CERN des câbles Mulrad et nouveaux câbles Mulrad. EDMS document 1310710, CERN.

¹⁴ GLAUDE, D. et GRIFFET, S. 2010. Contrôle du banc de microtriangulation. EDMS document 1102726, CERN

Table des annexes

Annexe 1 Tentative de changement de modèle.....	63
Annexe 2 Exemple d'application de modèle pour corriger les impacts de la température	67
Annexe 3 Définition du repère du banc Invar	69

Annexe 1 Tentative de changement de modèle

I. Première partie : le repliement

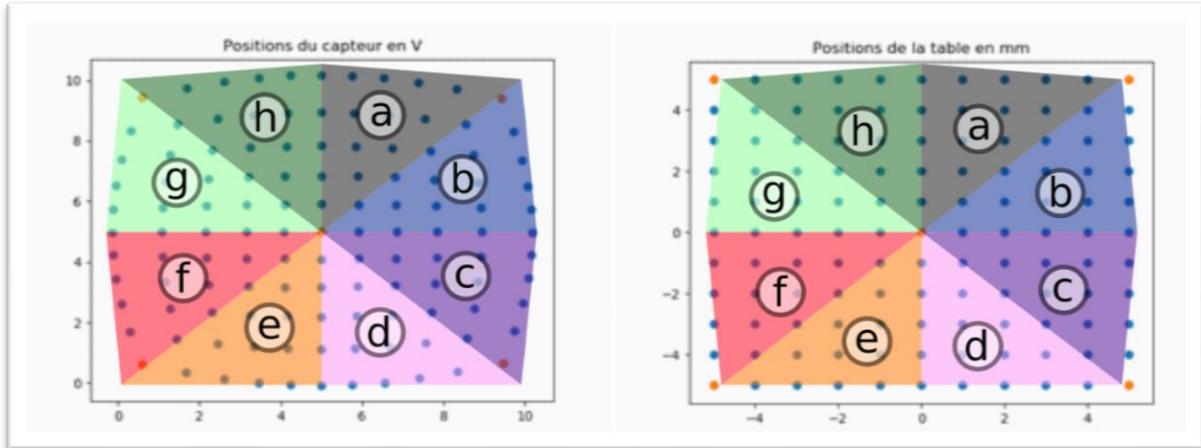


Figure 49 : Séparation des dessins en régions selon les axes de symétrie

$$\textcircled{a} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 5 \\ Y \geq 5, \text{ on ne fait rien} \\ Y > X \end{cases}$$

$$\textcircled{a} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 0 \\ Y \geq 0 \text{ on se fait rien} \\ Y > X \end{cases}$$

$$\textcircled{b} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 5 \\ Y \geq 5 \text{ alors } \begin{cases} X = Y \\ Y = X \end{cases} \\ X \geq Y \end{cases}$$

$$\textcircled{b} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 0 \\ Y \geq 0 \text{ alors } \begin{cases} X = Y \\ Y = X \end{cases} \\ X \geq Y \end{cases}$$

$$\textcircled{c} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 5 \\ Y < 5 \\ X \geq 5 + (5 - Y) \end{cases} \text{ alors } \begin{cases} X = 5 + (5 - Y) \\ Y = X \end{cases}$$

$$\textcircled{c} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 0 \\ Y < 0 \\ X \geq -Y \end{cases} \text{ alors } \begin{cases} X = -Y \\ Y = X \end{cases}$$

$$\textcircled{d} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 5 \\ Y < 5 \\ X < 5 + (5 - Y) \end{cases} \text{ alors } \begin{cases} X = X \\ Y = 5 + (5 - Y) \end{cases}$$

$$\textcircled{d} \quad \text{Si } \begin{cases} X \geq 0 \\ Y < 0 \\ X < -Y \end{cases} \text{ alors } \begin{cases} X = X \\ Y = -Y \end{cases}$$

$$\textcircled{e} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 5 \\ Y < 5 \text{ alors } \begin{cases} X = 5 + (5 - X) \\ Y = 5 + (5 - Y) \end{cases} \\ X \geq Y \end{cases}$$

$$\textcircled{e} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 0 \\ Y < 0 \text{ alors } \begin{cases} X = -X \\ Y = -Y \end{cases} \\ X \geq Y \end{cases}$$

$$\textcircled{f} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 5 \\ Y \geq 5 \text{ alors } \begin{cases} X = 5 + (5 - X) \\ Y = Y \end{cases} \\ Y \geq 5 + (5 - X) \end{cases}$$

$$\textcircled{f} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 0 \\ Y \geq 0 \text{ alors } \begin{cases} X = -Y \\ Y = -X \end{cases} \\ Y > X \end{cases}$$

$$\textcircled{g} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 5 \\ Y \geq 5 \text{ alors } \begin{cases} X = Y \\ Y = 5 + (5 - X) \end{cases} \\ Y < 5 + (5 - X) \end{cases}$$

$$\textcircled{g} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 0 \\ Y \geq 0 \text{ alors } \begin{cases} X = Y \\ Y = -X \end{cases} \\ Y < -X \end{cases}$$

$$\textcircled{h} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 5 \\ Y < 5 \text{ alors } \begin{cases} X = 5 + (5 - Y) \\ Y = 5 + (5 - X) \end{cases} \\ Y > X \end{cases}$$

$$\textcircled{h} \quad \text{Si } \begin{cases} X < 0 \\ Y < 0 \text{ alors } \begin{cases} X = -X \\ Y = Y \end{cases} \\ Y > -X \end{cases}$$

Le but de ce repliement est de ramener tous les points observés dans une même zone et chercher une interpolation plus simple pour ces points. Ce repliement semble possible étant donné la répartition apparemment symétrique des points sur le dessin.

Pour les replier, on utilise un ensemble de conditions et de formules reliées à leur position dans le dessin. Ainsi, on replie progressivement chacun des points.

Une fois repliées selon les différentes zones (cf. Figure 49) il suffit de trouver un modèle permettant le passage des mesures en Volt en lectures en millimètres sur une portion de figure (cf. Figure 50), plus simple et intuitif que sur l'entièreté de la figure.

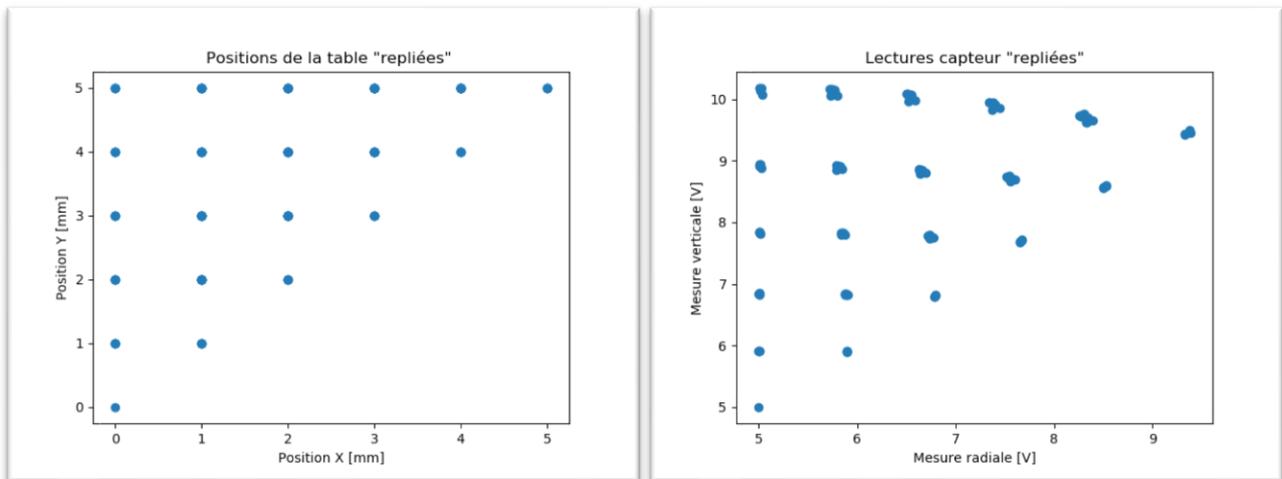


Figure 50 : Positions de la table et mesures du capteur une fois « repliés »

II. Calcul du modèle et résultats

Dans le cadre de ce projet, deux modèles ont été testés : un modèle à 3 paramètres et un modèle à 9 paramètres.

Le modèle à 3 paramètres est défini ainsi :

$$X_{[mm]} = a_x * X_{[volt]}^2 + b_x * X_{[volt]} + c_x$$

$$Y_{[mm]} = a_y * Y_{[volt]}^2 + b_y * Y_{[volt]} + c_y$$

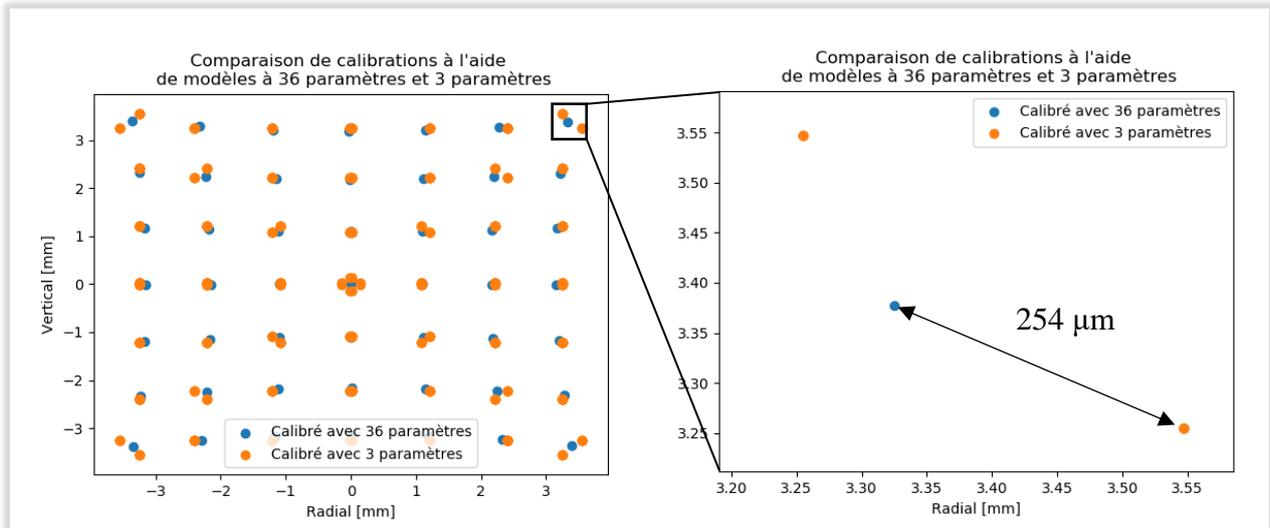


Figure 51 : Écart entre la modélisation à trois paramètres et la modélisation à 36 paramètres

Les résidus résultants de l'application de ce modèle se sont avérés bien trop importants pour notre projet (cf. Figure 51). Il fallait affiner le modèle.

Le modèle à 9 paramètres : l'idée était d'avoir un modèle assez précis tout en ayant strictement moins de 12 inconnues afin de pouvoir l'appliquer au banc de calibration en Invar, tout en conservant une certaine redondance.

$$X_{[mm]} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 a_{ij} \cdot X_{[volt]}^i \cdot Y_{[volt]}^j$$

$$Y_{[mm]} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_{ij} \cdot X_{[volt]}^i \cdot Y_{[volt]}^j$$

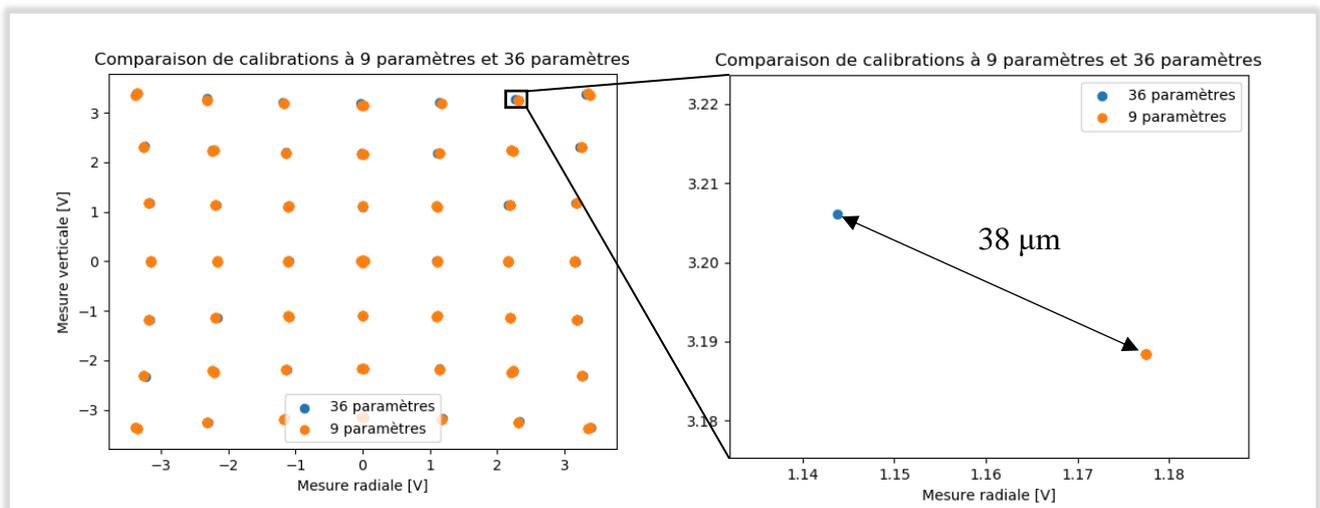


Figure 52 : Comparaison entre le modèle à 9 paramètres et le modèle à 36 paramètres

Ce modèle, bien que plus précis, l'est trop peu pour notre projet (cf. Figure 52).

D'autres tentatives de repliement ont été réalisées, en n'utilisant que deux axes de symétrie sur 4 (cf. Figure 53). Mais ces tentatives se sont également avérées trop peu précises pour notre projet. Il serait intéressant d'essayer d'affiner encore le modèle en 2 repliant les points selon des axes de symétrie flottants de manière à minimiser les écarts entre les points repliés.

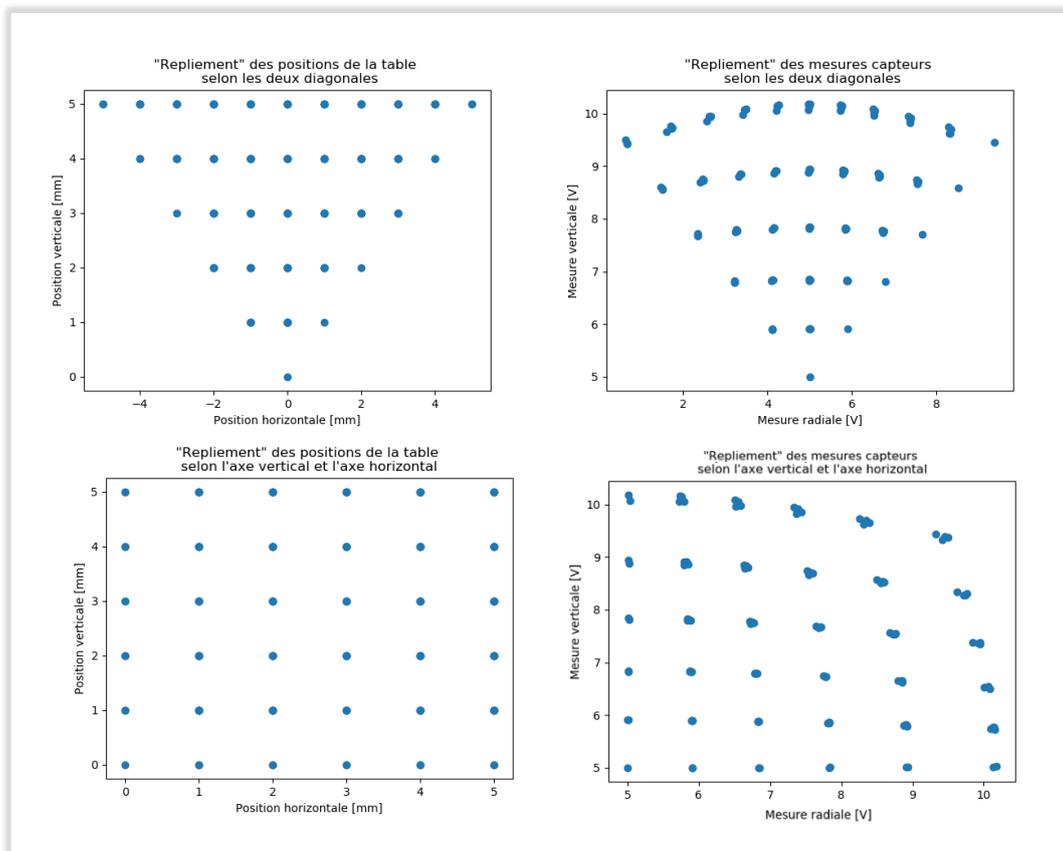


Figure 53 : Différentes tentatives de repliement : en haut selon les diagonales; en bas selon les axes verticaux et horizontaux

Annexe 2

Exemple d'application de modèle pour corriger les impacts de la température

Exemple d'application des résultats à l'électronique W2D-7E1-016 à 40 °C (le reste du dispositif de mesure étant à 20 °C) (cf. Figure 54).

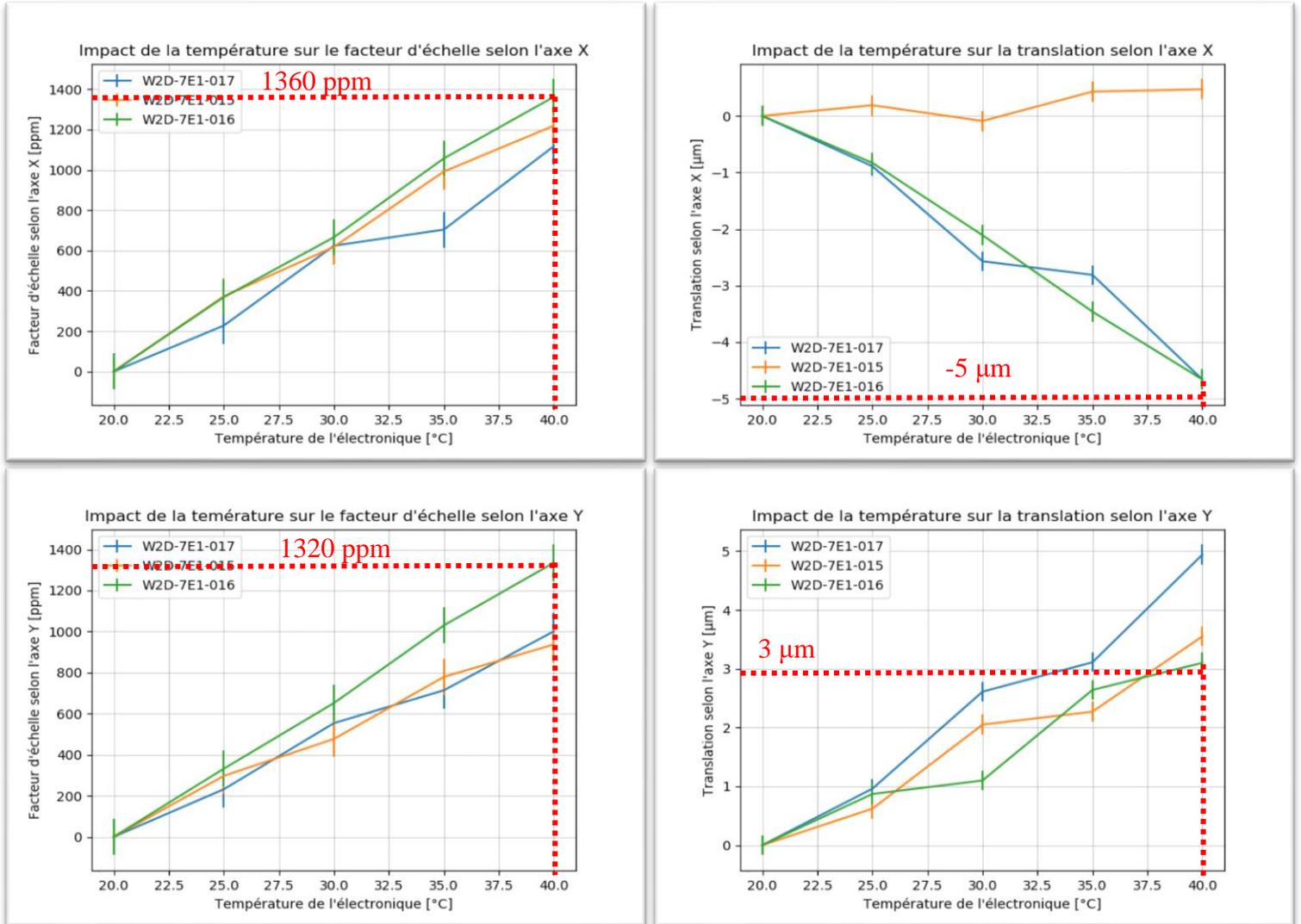


Figure 54 : Résultats des électroniques avec leur précisions après notre campagne de tests

Pour appliquer les résultats, il faut lire la correction à appliquer en fonction de la température de l'élément chauffé. On obtient alors 4 valeurs de correction à appliquer aux mesures grâce à la formule suivante :

$$X_{\text{corrigé}} = X_{\text{mm}} * (1 + f_X) + T_X$$

$$Y_{\text{corrigé}} = Y_{\text{mm}} * (1 + f_Y) + T_Y$$

Avec f_X , f_Y et T_X , T_Y les facteurs d'échelles et les translations selon les axes X et Y.

Ce qui donne pour une lecture capteur de 7V/8V par exemple (cf. Tableau 4 et Figure 55) :

Tableau 4 : Récapitulatif de l'application du modèle aux mesures

X_{mm}	3,482	Y_{mm}	2,999	mm
f_x	0,00136	f_y	0,00132	
T_x	-0,005	T_y	0,003	mm
$X_{\text{corrigé}}$	3,482	$Y_{\text{corrigé}}$	3,006	mm

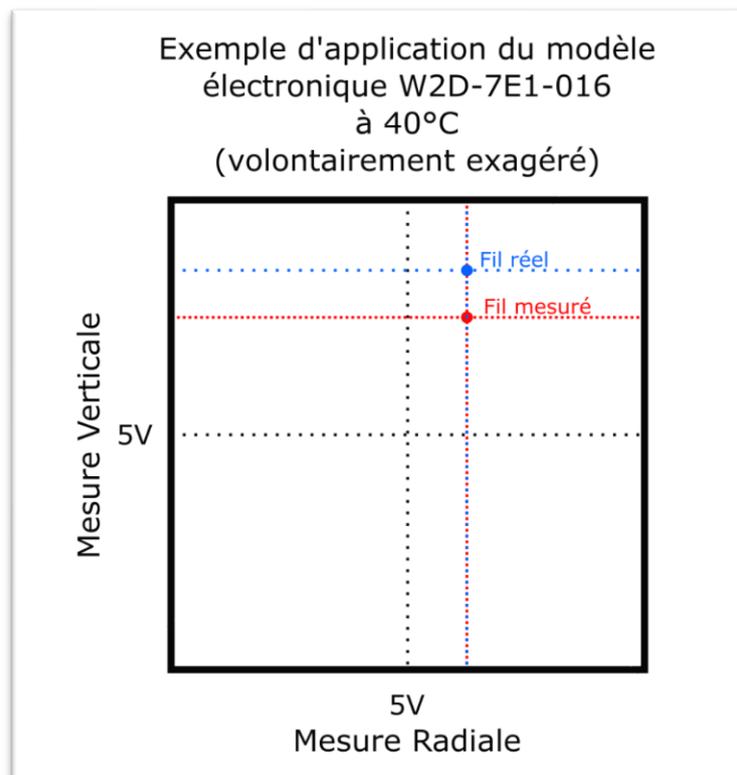


Figure 55 : Schéma de la position réelle du fil par rapport à la mesure

Annexe 3 Définition du repère du banc Invar

Le repère du banc en Invar fut défini avant la mesure des billes en métrologie. Sa création permet d'exprimer les billes dans un repère général précisément défini. Il servira à vérifier régulièrement les positions des billes et les éventuelles déformations. Pour les mesures en métrologie et un suivi régulier, huit supports à sphères (fiducielles) sont répartis sur le banc.

L'origine du repère était définie comme étant le centre de la bille de référence 1, située seule à une des extrémités (cf. Figure 56).

L'axe X relie l'origine du repère avec le milieu du segment formé par les deux billes de la référence 2 à l'autre extrémité du banc.

L'axe Z est le vecteur orthogonal au plan formé par les trois billes ayant servi à la détermination de l'axe X.

L'axe Y est le produit vectoriel des axes X et Z.

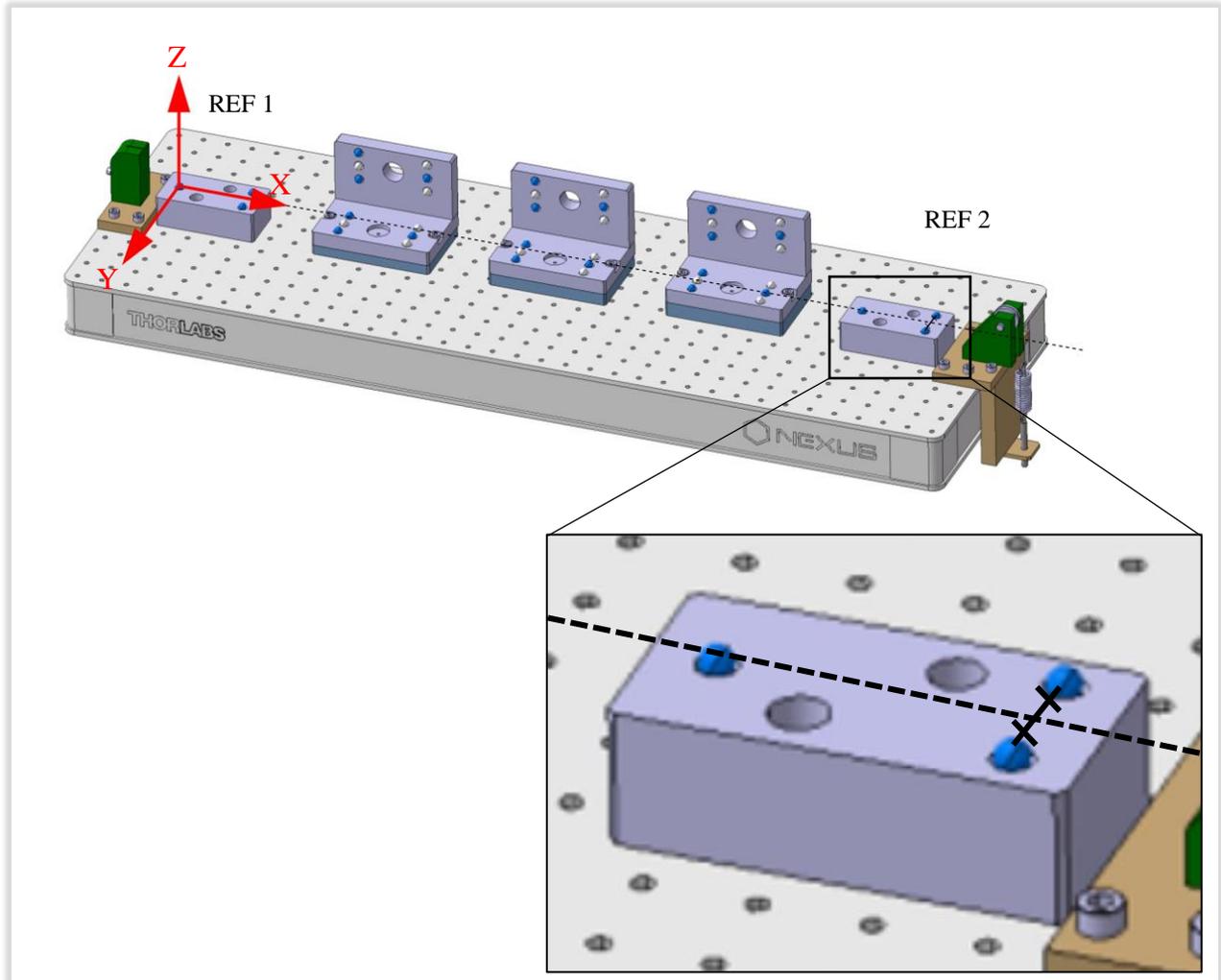


Figure 56 : Construction du repère du banc Invar

Position	X	Y	Z	Diamètre	Sphéricité
REF1_C1	69,9777	15,0810	-0,0532	8,0012	0,0006
REF1_C2	0,0000	0,0000	0,0000	8,0002	0,0005
REF1_C3	70,0164	-14,9173	-0,0537	8,0005	0,0003
REF2_C1	770,1102	14,9998	0,0000	8,0007	0,0008
REF2_C2	700,1090	0,0165	-0,0274	8,0012	0,0008
REF2_C3	770,1024	-14,9999	0,0000	8,0007	0,0011
POS1_C1	240,0581	12,3513	-3,2678	8,0005	0,0005
POS1_C2	170,0843	-2,7555	-3,2911	8,0007	0,0008
POS1_C3	240,1022	-17,6447	-3,2258	8,0004	0,0003
POS2_C1	170,1106	-17,7553	-3,2725	8,0006	0,0004
POS2_C2	240,0825	-2,6480	-3,2476	8,0006	0,0003
POS2_C3	170,0614	12,2413	-3,3072	8,0003	0,0007
POS3_C1	240,0065	31,7080	46,0214	8,0006	0,0006
POS3_C2	170,0223	31,5144	30,9842	8,0006	0,0006
POS3_C3	240,0242	31,6887	16,0220	8,0003	0,0006
POS4_C1	170,0273	31,5110	15,9864	8,0008	0,0006
POS4_C2	240,0167	31,6988	31,0226	8,0005	0,0007
POS4_C3	170,0165	31,5216	45,9859	8,0012	0,0009
POS5_C1	419,9024	14,8157	-0,7619	8,0004	0,0004
POS5_C2	349,9134	-0,2237	-0,7810	8,0007	0,0009
POS5_C3	419,9170	-15,1844	-0,7745	8,0006	0,0010
POS6_C1	349,9245	-15,2244	-0,7875	8,0007	0,0005
POS6_C2	419,9116	-0,1836	-0,7691	8,0013	0,0006
POS6_C3	349,9032	14,7752	-0,7695	8,0008	0,0009
POS7_C1	419,6574	34,2349	48,5816	8,0019	0,0009
POS7_C2	349,6756	34,1510	33,5406	8,0014	0,0003
POS7_C3	419,6787	34,2305	18,5827	8,0008	0,0006
POS8_C1	349,6839	34,1487	18,5399	8,0010	0,0003
POS8_C2	419,6698	34,2320	33,5809	8,0012	0,0009
POS8_C3	349,6659	34,1553	48,5419	8,0000	0,0009
POS9_C1	600,2445	17,3590	1,7765	8,0013	0,0003
POS9_C2	530,2599	2,3200	1,7658	8,0007	0,0007
POS9_C3	600,2616	-12,6379	1,7586	8,0006	0,0006
POS10_C1	530,2735	-12,6757	1,7601	8,0005	0,0003
POS10_C2	600,2565	2,3611	1,7688	8,0014	0,0003
POS10_C3	530,2502	17,3182	1,7762	8,0006	0,0004
POS11_C1	600,3243	36,8343	51,1447	8,0014	0,0009
POS11_C2	530,3441	36,9385	36,1065	8,0005	0,0006
POS11_C3	600,3453	36,8389	21,1459	8,0003	0,0008
POS12_C1	530,3513	36,9392	21,1066	8,0003	0,0005
POS12_C2	600,3349	36,8380	36,1454	8,0017	0,0010
POS12_C3	530,3377	36,9366	51,1066	8,0009	0,0004

Tableau 5 : Coordonnées des 42 billes présentes sur le banc Invar mesurées en métrologie

Fiducielles	X	Y	Z
P1	-28,7055	-112,693	-7,0856
P2	271,9921	-112,733	-7,1034
P3	496,919	-113,982	-7,1428
P4	795,5476	-113,332	-7,1326
P5	-25,6325	112,7728	-7,0704
P6	275,5876	114,0876	-7,1446
P7	488,9132	119,5136	-7,099
P8	798,0145	115,4381	-7,1552

Tableau 6 : Coordonnées de 8 fiducielles du banc Invar mesurées en métrologie

Liste des figures

Figure 1 : Complexe d'accélérateurs du CERN (source : http://cds.cern.ch/record/2636343)	9
Figure 2 : Photo d'une maquette de quatre modules du CLIC	10
Figure 3 : Photos des deux types de capteurs WPS (fermés et ouverts) : à gauche le modèle de Fogale Nanotech, à droite le prototype du CERN	12
Figure 4 : Schéma du principe de fonctionnement du capteur capacitif	13
Figure 5 : Photo du système de centrage : en haut, l'interface trois billes ; en bas l'interface trait-point-plan.....	14
Figure 6 : Schéma du repère de l'interface trois billes.....	14
Figure 7 : Schéma des câbles torsadés utilisés avec les capteurs WPS.....	15
Figure 8 : Photos de deux électroniques : en haut l'électronique de Fogale Nanotech ; en bas le prototype développé par le CERN.....	16
Figure 9 : Schéma des différents repères intervenant dans les calibrations	17
Figure 10 : Schéma du banc de calibration relative	18
Figure 11 : Schéma du fonctionnement de la table à déplacement	19
Figure 12 : positions de la table en millimètres et mesures des capteurs correspondantes en volts.	19
Figure 13 : Schéma du banc de calibration absolue	21
Figure 14 : Schéma de l'organisation des tests des électroniques et des câbles	23
Figure 15 : Calcul des polynômes dans des conditions différentes.....	24
Figure 16 : Comparaison des polynômes grâce à une simulation de mesure	25
Figure 17 : Comparaison des polynômes grâce à des similitudes 2D	26
Figure 18 : Photo du caisson en polystyrène construit autour du banc de calibration mobile	27
Figure 19 : Isolation et atténuation des variations rapides de température	28
Figure 20 : Bonne stabilité de la température dans la pièce le temps de l'expérience	28
Figure 21 : Exemple de résultat sans aucune correction	29
Figure 22 : Variations de la température et de l'humidité dans la pièce	30
Figure 23 : Exemple de données avant (à gauche) et après (à droite) avoir été corrigées des variations de température et d'humidité de la pièce	30
Figure 24 : Résultats aberrants dus à une extrapolation du modèle	31
Figure 25 : Aucune calibration autre que celles faites à 20 °C n'est conservée.....	32
Figure 26 : Données perdues par non-extrapolation	32
Figure 27 : Données avant et après correction des conditions présentes dans la pièce	34
Figure 28 : Organisation pour les tests des capteurs	35
Figure 29 : Ensemble des douze positions possibles sur le banc et position approximative du fil dans chacune de ces positions (en haut à droite)	35
Figure 30 : Axes de symétrie présents mesures et les positions de la table	36
Figure 31 : Exemple de positions « repliées » selon les axes de symétrie.....	36
Figure 32 : Illustration de l'expression des variables	38
Figure 33 : Résultats des électroniques avec leurs précisions après notre campagne de tests	42
Figure 34 : Résultats des câbles et leur précision après notre campagne de tests	44
Figure 35 : Une des hypothèses pouvant expliquer l'impact de la température sur les mesures : la déformation interne des câbles	45
Figure 36 : Banc en aluminium à deux positions et position approximative du fil dans le capteur.	46
Figure 37 : Lectures radiales et verticales des capteurs au cours du temps	47
Figure 38 : Lectures verticales des capteurs au cours du temps.....	47
Figure 39 : Forte corrélation entre température et humidité dans la chambre climatique.....	48
Figure 40 : Différentes étapes et différents repères intervenant dans le test de la ligne droite	49
Figure 41 : Schéma annoté du banc en Invar	51
Figure 42 : Écarts en radial	52
Figure 43 : Écarts en vertical.....	52
Figure 44 : Représentation de la table avant et après déformation.....	53

Figure 45 : Photos des interfaces trois billes et trait-point-plan des capteurs étudiés munis d'aimants	54
Figure 46 : Photo du porche habituellement utilisé pour maintenir les capteurs	54
Figure 47 : Photo d'une interface trois billes classiques des capteurs de références sans système de maintien (banc Invar)	54
Figure 48 : Comparaison des mesures radiales et verticales d'un capteur normal (à gauche) et du capteur bruité (à droite)	55
Figure 49 : Séparation des dessins en régions selon les axes de symétrie	63
Figure 50 : Positions de la table et mesures du capteur une fois « repliés ».....	64
Figure 51 : Écarts entre la modélisation à trois paramètres et la modélisation à 36 paramètres	65
Figure 52 : Comparaison entre le modèle à 9 paramètres et le modèle à 36 paramètres	65
Figure 53 : Différentes tentatives de repliement : en haut selon les diagonales; en bas selon les axes verticaux et horizontaux	66
Figure 54 : Résultats des électroniques avec leur précisions après notre campagne de tests.....	67
Figure 55 : Schéma de la position réelle du fil par rapport à la mesure	68
Figure 56 : Construction du repère du banc Invar.....	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Précision des paramètres des similitudes déterminés par moindres carrés	27
Tableau 2 : Récapitulatif des RMS pour les nappes	33
Tableau 3 : Récapitulatif du test de la ligne droite	50
Tableau 4 : Récapitulatif de l'application du modèle aux mesures	68
Tableau 5 : Coordonnées des 42 billes présentes sur le banc Invar mesurées en métrologie	70
Tableau 6 : Coordonnées de 8 fiducielles du banc Invar mesurées en métrologie	71

Etude des effets de la température sur les dispositifs de mesure WPS (Wire Positioning System).

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Le Mans 2019

RESUME

Le CERN utilise des dispositifs de mesure WPS pour aligner différents éléments dans les accélérateurs. Un projet d'accélérateur linéaire de 200 m (le projet CLIC) requiert un alignement d'une dizaine de micromètres sur l'entièreté de l'accélérateur, et ce, en ayant des variations de température de 20 °C entre le pré alignement et le passage du faisceau.

Ce mémoire propose d'étudier l'impact de telles variations de température sur les dispositifs de mesure WPS actuels afin de savoir s'ils peuvent (ou non) convenir à un tel projet.

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

SUMMARY

CERN is using WPS to align different parts of the accelerators. The CLIC project is a 200m linear accelerator which needs to be entirely aligned at around ten micrometers with a temperature variation of 20°C between pre-alignment and operating the beam.

This report aims to study the impact of temperature on the current WPS and see if they can be used in that project.

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