



**HAL**  
open science

# Utilisation des capteurs connectés (IoT) dans un système d'auscultation

Martial Mercier

► **To cite this version:**

Martial Mercier. Utilisation des capteurs connectés (IoT) dans un système d'auscultation. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04412291

**HAL Id: dumas-04412291**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04412291>**

Submitted on 23 Jan 2024

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

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

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

---

**MEMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

**SPECIALITE : Géomètre et Topographe**

**par**

**Martial MERCIER**

---

Utilisation des capteurs connectés (IoT) dans un système d'auscultation

**Soutenu le 06 septembre 2023**

---

**JURY**

Monsieur Laurent MOREL	Président du jury
Madame Maïlys BUCHER	Maître de stage
Monsieur Charles SANTELLI	Maître de stage
Monsieur Stéphane DURAND	Maître de stage
Monsieur José CALI	Enseignant référent

# Remerciements

Je tiens premièrement à remercier toutes les personnes qui, de près comme de loin, ont contribué à la réussite de ce Travail de Fin d'Études (TFE) représentant l'aboutissement de mon projet professionnel : devenir Ingénieur-Géomètre.

J'exprime ma profonde gratitude à l'ensemble de mes maîtres de stage, Mme Maïlys BUCHER (société SOTEC PLANS), M. Charles SANTELLI (société SOTEC PLANS) et M. Stéphane DURAND (enseignant chercheur ESGT-GéF) ainsi qu'à mon professeur référent, M. José CALI (enseignant chercheur ESGT-GéF) pour leur encadrement, leurs conseils avisés et la relecture de ce mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Stéphane DURAND pour son accueil au sein du laboratoire Géomatique et Foncier (GéF) et son aide précieuse tant sur les orientations prises par le sujet de TFE que dans la conception des dispositifs de mesure.

Je souhaite également remercier Mme Maïlys BUCHER et tous les collaborateurs de la société SOTEC PLANS pour leur accueil et leur disponibilité durant ce stage.

J'adresse mes remerciements à tous les autres stagiaires (GéF) de la salle T0 pour l'ambiance chaleureuse et pour l'aide qu'ils m'ont apportée lors des manipulations en salle de métrologie.

Enfin, j'aimerais remercier chaque personne ayant participé à la relecture de ce dossier et m'ayant soutenu tout au long de ma scolarité.

## Liste des abréviations

**Ademe** : pour "Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie".

**CCD** : "Charge Couple Device" pour dispositif à couplage de charge. Élément de photographie numérique.

**ESGT** : École Supérieure d'ingénieurs Géomètres et Topographes (Le Mans).

**IoT** : "Internet of Things". Relatif à l'internet des objets (**Oracle**).

**Lora** : "Long Range" pour grande portée. "Technologie de communication radio bas débit, longue portée, dans la bande de fréquences libres" (**Tactis**).

**LPWAN** : "Low-Power Wide Area Network" signifie réseau étendu à faible puissance. Réseaux de communication dédiés aux objets connectés de type cellulaire ou non.

**MEMs** : "Micro Electro Mechanic system" pour système Micro Électro Mécanique. Capteur à l'électronique et aux composants miniaturisés (**Juillard, 2020**).

**NB-IoT** : "NarrowBand Internet of Things" signifie bande étroite de l'internet des objets. Réseau à couverture étendue qui utilise des réseaux mobiles existants.

**PPM** : Partie Par Million ( $1 \times 10^{-6}$ ). Appliqué ici pour qualifier des mm/km.

**SHM** : "Structural Health Monitoring" pour surveillance de la santé structurelle. Relatif à la surveillance de la pérennité structurelle d'un ouvrage.

**Wi-Fi** : "Wireless Fidelity" pour fidélité sans fil. Protocole de communication sans fil.

## Glossaire

**Capacité électrique** : quantité de charge électrique stockée dans le système d'électrode.

**Étalonnage in situ d'inclinaison** : protocole qui vise à corriger des inclinaisons brutes sans coefficient d'étalonnage établi par le constructeur. Les coefficients de corrections sont calculés par l'utilisateur sur sa propre donnée d'acquisition mais ne sont pas identiques quels que soient le mouvement du capteur ou la variation de température.

**Gap-closing** : principe illustrant l'attraction entre deux électrodes au sein d'une électronique MEMs (Juillard, 2020).

**Low cost** : anglicisme signifiant bas coût.

**Monitoring** : anglicisme du mot « surveillance ». Terme qui caractérise une surveillance d'ouvrages d'art.

**Pipeline** : anglicisme du mot « canalisation ». Souvent associé aux conduites sous pression de type gazoduc.

**Transducteur capacitif passif** : convertisseur d'énergie ayant besoin d'une alimentation extérieure. Mesure des grandeurs physiques (déplacement, pression, etc.) pour les convertir en capacité électrique à partir d'un système d'électrodes. Largement utilisé pour les capteurs MEMs (JFP).

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>2</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>3</b>
<b>GLOSSAIRE</b> .....	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>I CONTEXTE DE L'ETUDE ET APPLICATIONS COURANTES DE SOLUTIONS GEOTECHNIQUES DANS UNE STRATEGIE IOT DE SUIVI D'OUVRAGES.</b> .....	<b>9</b>
I.1 DEFINITION DES CAPTEURS CONNECTES AU SEIN D'UNE STRATEGIE IOT.....	9
<i>I.1.1 Brève introduction sur les capteurs connectés</i> .....	9
<i>I.1.2 Concevoir une stratégie IoT</i> .....	9
I.2 EXIGENCES DU SUIVI D'OUVRAGES ET BESOINS DE L'ETUDE.....	11
<i>I.2.1 Applications courantes des capteurs connectés en auscultation d'ouvrages</i> .....	11
<i>I.2.2 Contexte de l'étude : suivi de la reconstruction d'une cathédrale</i> .....	12
<i>I.2.3 Calculer des grandeurs dérivées pour la surveillance de l'ouvrage</i> .....	13
<b>II L'INCLINOMETRE POUR LE MONITORING D'INSTRUMENTATION</b> .....	<b>15</b>
II.1 PRINCIPE ET CARACTERISTIQUES D'UN INCLINOMETRE.....	15
II.2 PERFORMANCES ET LIMITES D'UN INCLINOMETRE .....	16
<i>II.2.1 Erreurs inhérentes à l'inclinomètre et compensation thermique des mesures</i> .....	16
<i>II.2.2 Mettre à l'épreuve les inclinomètres en laboratoire</i> .....	19
<b>III SURVEILLANCE D'OUVRAGES D'ART PAR DISTANCOMETRE LASER</b> .....	<b>24</b>
III.1 FONCTIONNEMENT ET BESOINS RELATIFS AU CAPTEUR.....	24
III.2 CONTROLER LE DISTANCOMETRE DU CAPTEUR EN LABORATOIRE .....	25
<i>III.2.1 Erreurs d'un capteur de distance WISEN</i> .....	25
<i>III.2.2 Qualifier les performances réelles des distancemètres</i> .....	25
<b>III.2.2.1 Étalonner les distancemètres laser</b> .....	26
<b>III.2.2.2 Quantifier la répétabilité des mesures de distance WISEN</b> .....	29
<b>III.2.2.3 Évaluer l'impact des paramètres météorologiques sur les distances WISEN</b> .....	30
<b>IV DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES AUTOUR DE LA COMBINAISON DES MESURES D'INCLINAISON ET DE DISTANCE AU SEIN D'UN RESEAU TOPOMETRIQUE DE SURVEILLANCE</b> .....	<b>34</b>
IV.1 PERSPECTIVES D'ELARGISSEMENT DES TESTS DEJA REALISES .....	34
IV.2 OUVERTURE SUR LA COMBINAISON DES MESURES D'INCLINAISON ET DE DISTANCE .....	35

<b>IV.3 DISCUSSION AUTOUR DE L'INTEGRATION DES OBSERVATIONS DES CAPTEURS AU SEIN D'UN RESEAU TOPOMETRIQUE EN VUE D'UN AJUSTEMENT DE RESEAU.....</b>	<b>37</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>39</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>41</b>
<b>TABLE DES ANNEXES .....</b>	<b>47</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>56</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>57</b>

# Introduction

La notion d'"Internet of Things" (IoT) est fondée sur un système de gestion de l'information par l'intermédiaire d'objets connectés à internet. Initiée dans les années 1990, la stratégie visant à utiliser le "déplacement de petits paquets de données vers un grand ensemble de nœuds" pour améliorer des processus industriels se voit attribuer le terme "Internet des Objets" en 1999 par Kevin ASHTON (Oracle).

Aujourd'hui, une stratégie IoT sert de lien entre des capteurs particulièrement intelligents (acquisition de mesures, réception et gestion des données, etc...), une passerelle de communication et un organe de gestion des données (visualisation, logiciels, système d'alerte, etc...). À destination des professionnels comme du grand public, ces capteurs suscitent de nos jours un véritable intérêt comme en témoigne les 14,4 milliards d'appareils connectés recensés à l'échelle mondiale dans une étude d'IoT Analytics<sup>1</sup> pour l'année 2022 ou encore l'estimation de 244 millions de capteurs connectés dénombrés en France selon une étude datant de janvier 2022 de l'Ademe (JDN). Déployée dans des domaines variés comme le médical, l'industrie, la gestion des infrastructures, l'agriculture, l'automobile ou encore l'aéronautique, les démarches liées à l'IoT ne semblent en être qu'à leurs prémises notamment avec l'essor de l'intelligence artificielle (Startechup).

L'attention portée à cette technologie réside tout particulièrement dans sa capacité à optimiser et faciliter des processus existants en proposant une solution "clé en main" à la fois pratique dans sa forme (boîtier portable, compact et discret avec des composants miniaturisés et une interface de visualisation des données), autonome dans son fonctionnement (rationalisation de la consommation d'énergie, communication des données, etc...), intelligente (détection de défaillances et système d'alerte), robuste (adaptée à l'environnement d'affectation), fiable dans sa mesure, bas coût et adaptée pour des besoins en temps réel (Yang et al., 2008).

---

<sup>1</sup> Société basée en Allemagne, spécialiste des études de marché



Toutefois, la solution IoT pour l'auscultation d'ouvrages laisse parfois peu d'espace au développement interne du processus par les clients et peut soulever des questions de propriété et de sécurité de la donnée : transit des données sur les serveurs des fournisseurs de la solution, interface pas toujours très interactive et difficilement reproductible, etc.

Dans le domaine de l'inspection d'ouvrages d'art, les tachéomètres robotisés à demeure sont largement utilisés pour le suivi des déformations. Pourtant, la variété de capteurs géotechniques connectés (fissuromètre, extensomètre, inclinomètre, etc...) pourrait représenter, dans certains cas, une alternative aux méthodes traditionnelles grâce à leur aspect bas coût et leur électronique intelligente. Par conséquent, il est nécessaire de questionner les performances et les limites d'une telle solution face aux lacunes de certaines documentations techniques d'instrument et aux exigences qu'impose une surveillance d'ouvrage (complexité de l'objet, précision, etc...).

Dès lors, dans quelles mesures une solution géotechnique connectée composée d'inclinomètres et de distancemètres peut-elle satisfaire les besoins d'un suivi d'ouvrages d'art aux contraintes fortes ?

Il est proposé d'aborder cette problématique autour d'une mise en contexte de l'étude autour d'exemples courants d'applications d'inclinomètre et de distancemètre pour la surveillance d'ouvrages par le biais d'une stratégie IoT (I). Il vient ensuite une approche technique de l'inclinomètre (II) et du distancemètre (III) pour envisager leur principe de fonctionnement, leur intérêt ainsi que leur limite pour une mission d'auscultation d'ouvrages d'art. Pour finir, nous proposons des perspectives de combinaison et d'ajustement des mesures d'inclinaison et de distance au sein d'un réseau spécifique (IV).

# I Contexte de l'étude et applications courantes de solutions géotechniques dans une stratégie IoT de suivi d'ouvrages.

## I.1 Définition des capteurs connectés au sein d'une stratégie IoT

### I.1.1 Brève introduction sur les capteurs connectés

L'innovation technologique a permis de démocratiser l'usage d'appareils précis et intelligents. Les capteurs connectés en sont un bon exemple. Ils permettent, entre autres, de gérer des données en acquérant des mesures, en les transmettant ou encore de réaliser une action suite à la réception des données. Les capteurs géotechniques connectés utilisés en auscultation d'ouvrages disposent de ces trois compétences et se différencient par la nature des données qu'ils relèvent. Nous pouvons ainsi retrouver des fissuromètres (écartement d'une fissure), des extensomètres, des piézomètres, des inclinomètres, des distancemètres, etc.

Cette étude porte sur l'utilisation d'une solution géotechnique connectée composée d'inclinomètres trois axes couplés à des distancemètres *WISEN 6F08*. Le capteur dispose également d'une sonde de température interne au boîtier. La documentation technique de l'instrumentation met en avant **une précision des mesures de distance de 1 mm sur une plage de 0,05 à 100 m** (résolution de 0,1 mm) ainsi qu'**une précision des inclinaisons (pour chaque axe X, Y et Z) de l'ordre de 0,01° sur une plage de [-90° ; 90°]** (**WISEN**). Les principes de fonctionnement de chaque élément du capteur seront développés ultérieurement.

### I.1.2 Concevoir une stratégie IoT

En surveillance d'ouvrages d'art, un réseau IoT (figure 1) s'articule autour de 3 organes que sont le nœud d'acquisition (capteurs et données brutes), le nœud de transmission (réseau

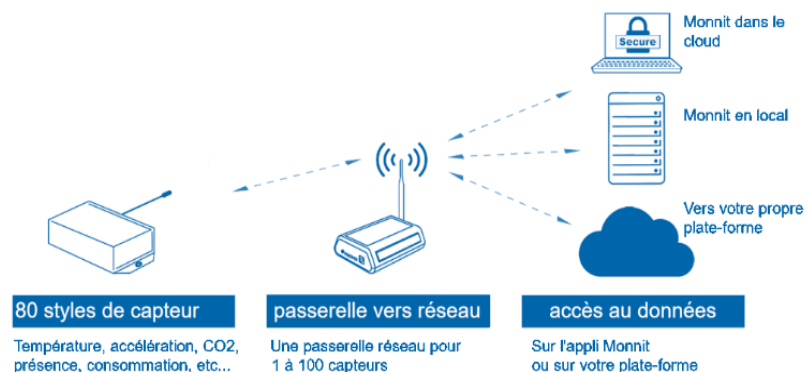


Figure 1 : Schéma d'un réseau IoT, site web *Monnit* consulté le 17/02/23.

de communication) et le nœud de stockage et de visualisation des données par le biais d'interfaces ou de logiciels (*Digora*).

Les capteurs *WISEN* proposent plusieurs solutions de communication entre les capteurs et l'antenne. Tout d'abord, la topologie en étoile (dite "*star*") permet à chaque capteur l'envoi direct de ces données à la passerelle réseau ("*gateway*"). Dans cette configuration, la transmission des données est optimale du point de vue de la rapidité d'envoi mais restreint le déploiement des capteurs autour de la passerelle et à une utilisation sur des chantiers à géométrie peu complexe, étroite et plutôt en zone rurale. La seconde configuration par topologie maillée ("*mesh*"), plus robuste, envisage l'envoi des données entre les capteurs eux-mêmes avant qu'elles ne soient transférées à la passerelle. Cela suppose une meilleure adaptabilité sur des sites urbains plus complexes ou pour des suivis de linéaires (tunnels) bien que la transmission des données, plus lente, limite la fréquence des mesures à un seuil minimal. Par ailleurs, [Li Y. et al. \(2021\)](#) ont élaboré un indicateur de placement optimal des capteurs dans le cadre d'une surveillance de tunnel de métro via une topologie maillée. Il en ressort une double exigence concernant la connectivité et la couverture réseau pour satisfaire une stratégie IoT et un positionnement des capteurs efficace pour le suivi d'ouvrages d'art.

Au niveau du nœud de communication, plusieurs réseaux de communication peuvent être considérés selon la taille, la forme et la localisation du site de surveillance (figure 2). Par exemple, une communication **Wi-Fi** longue portée ou l'emploi d'une mini-passerelle (ondes radio) pourraient être applicables pour un chantier proche (quelques dizaines de mètres) du nœud de stockage des données (voir [II.2.2](#)).

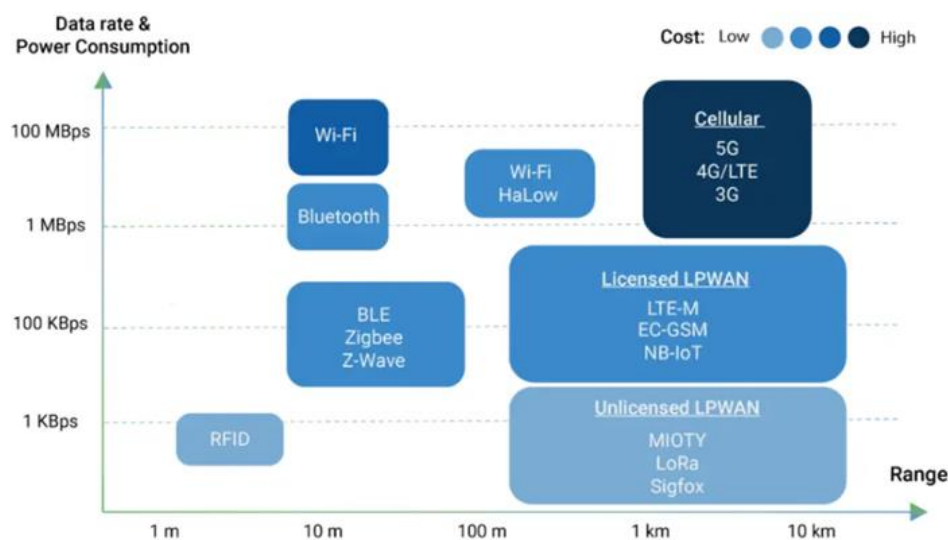


Figure 2 : Spécificités des réseaux de communication, *site web Mokolola* consulté le 17/02/23.

En pratique, avec les solutions présentes sur le marché, les données sont préalablement envoyées sur les serveurs des fournisseurs de solution (*WISEN* étant

implanté en Chine) avant d'être utilisables et visualisables par le client via des interfaces graphiques. Dans ce cas, ce sont les réseaux **LPWAN** qui sont privilégiés grâce à leur faible coût de fonctionnement d'appareil et donc à leur faible consommation d'énergie, leur débit de transmission ou encore leur utilisation à longue portée. Cette organisation se décline en réseaux aux attributs spécifiques de type cellulaire ou non cellulaire. Pour les stratégies IoT utilisant les réseaux LPWAN en auscultation d'ouvrages, le réseau cellulaire **NB-IoT**, au travers des opérateurs Orange et SFR en France, est largement utilisé avec le réseau non cellulaire **Lora**.

## **I.2 Exigences du suivi d'ouvrages et besoins de l'étude**

### **I.2.1 Applications courantes des capteurs connectés en auscultation d'ouvrages**

La littérature fait mention des précisions usuelles demandées dans le domaine de la surveillance d'ouvrages d'art autour de  $10^{-4}$  radians soit **environ  $[-0,01^\circ ; 0,01^\circ]$  pour les inclinaisons et  $[-3 \text{ mm} ; 3 \text{ mm}]$  pour les distances**. Par conséquent, au vu des caractéristiques techniques des capteurs *WISEN*, leur utilisation est cohérente avec ce type de mission.

Concernant l'inclinomètre, nous retrouvons une variété d'exemples d'utilisation des capteurs du domaine ferroviaire au glissement de terrain. Des inclinomètres ont été utilisés dans un tunnel et un métro pour le suivi de convergences et de déplacements latéraux de profils (**Geplus**). La principale difficulté est la communication contrainte des données ce qui peut impliquer un calcul de placement optimal des capteurs dans ce genre d'environnement (**Li et al., 2021**). Pour l'industrie minière, **Jaskowski W. et al. (2018)** ont utilisé des inclinomètres pour étudier la déviation de l'axe vertical d'un chevalement soulevant l'impact important que peuvent avoir certains facteurs extérieurs sur la mesure (déplacement des engins, météo). Pour les barrages, l'inclinomètre a permis le suivi structurel des fondations et abords du barrage (**CSB, 2006**). Il est parfois question de repenser la gestion des données pour l'intégration d'autres capteurs comme des piézomètres ou des extensomètres (**Multiconsult, 2021**). **Li S. et al. (2017)** ont également employé des inclinomètres pour suivre la flexion et le tassement d'un **pipeline**. Pour les ponts, **Kalantari M. (2022)** a étudié la déviation à long terme de l'axe d'un point ferroviaire soulignant l'influence du nombre de points test sur les erreurs. **Faulkner K. et al. (2020)** ont aussi montré l'apport d'un gyroscope dans les mesures inclinométriques pour des mesures mieux corrélées avec une meilleure résolution dans le cadre d'un suivi de la déviation de

l'axe d'un pont. Pour la surveillance structurelle des bâtiments, [Kim Y. et al. \(2013\)](#) ont démontré une différence négligeable en précision de  $0,003^\circ$  entre un inclinomètre connecté et un inclinomètre filaire. Par ailleurs, un capteur low cost a été conçu par [Komarizadehasl S. et al. \(2022\)](#) et testé dans le domaine du SHM. [Wierzbicki S. et al. \(2022\)](#) ont utilisé un inclinomètre couplé à un distancemètre pour suivre le déplacement vertical et la déviation des fermes d'un bâtiment industriel en mettant en lumière l'impact que peut avoir le mouvement de la structure sur la mesure du capteur. De plus, le test de température ( $>65^\circ\text{C}$ ) réalisé par [Islamy M.R.F. et al. \(2016\)](#) a permis de valider l'usage des capteurs connectés pour la volcanologie. Finalement, les inclinomètres sont même utilisés pour étudier un glissement de sol afin de contrôler la stabilité du terrain ou encore suivre le remblai avec une précision de  $0,03^\circ$  ([Stark et al., 2008](#)).

Par rapport aux emplois de distancemètres, nous retrouvons des utilisations en industrie minière pour suivre de déplacement vertical des chambres avec des contraintes rocheuses évidentes ([Kalab et al., 2010](#)). Pour la métrologie industrielle, [Richir P. et al. \(2017\)](#) ont employé deux distancemètres laser pour positionner un convoyeur cylindrique avec une précision de 1 mm. De même, [Oshima Y. \(2009\)](#) a eu recours au distancemètre (mesures obliques) pour suivre des déplacements et des déviations dans un contexte de glissement terrain. Enfin, [Sandene T. et al. \(2022\)](#) ont mis au point un système de trois distancemètres avec une précision d'un millimètre pour suivre, par profil, des déplacements et convergences de tunnel.

### **I.2.2 Contexte de l'étude : suivi de la reconstruction d'une cathédrale**

Ce travail a porté sur un cas pratique dont l'objectif est le suivi d'un chantier de reconstruction d'une cathédrale. L'entreprise a privilégié le déploiement d'une vingtaine de capteurs *WISEN 6F08 OmniTilt+Distance* pour prévenir les contraintes multiples inhérentes au site et au cahier des charges : discrétion de l'appareillage, très faible visibilité de l'extérieur vers l'intérieur de même qu'à l'intérieur de l'édifice (forte présence d'échafaudages), préservation du site qui pourrait être dégradé par les systèmes de fixation de l'instrumentation (cible naturelle, fixation à rotule), la présence de rares points supposés fixes à l'intérieur de l'ouvrage ou encore les aléas de chantier (obstruction de faisceau, endommagement involontaire, etc.). Les capteurs connectés représentent ici une alternative à la surveillance par station totale robotisée grâce à leur compacité, leur plage de mesure polyvalente (à la fois étroite pour les distances à courte portée et étendue pour les

inclinaisons), leur autonomie (sur batterie), la facilité de communication qu'ils permettent (IoT), et leur aspect **low cost**.

### I.2.3 Calculer des grandeurs dérivées pour la surveillance de l'ouvrage

La surveillance de la cathédrale porte sur le suivi de grandeurs dérivées de **mesures relatives** (distances et inclinaisons) et notamment des déplacements et des convergences. La figure 3 offre un panorama des grandeurs étudiées notamment par le biais de mesures de distances pour les déplacements et les tassements ainsi que par les inclinaisons pour le calcul des convergences. Comme chaque capteur permet des observations d'inclinaisons suivant trois axes et d'une distance, le suivi porte sur des grandeurs dérivées relatives à différents éléments architecturaux comme l'écartement de colonnes, le tassement de l'oculus (ouverture ronde de la coupole de la cathédrale), le déplacement de points situés sur les surfaces concaves de l'oculus ou du cœur de la cathédrale ou encore la convergence d'une de ses voûtes (figure 3).

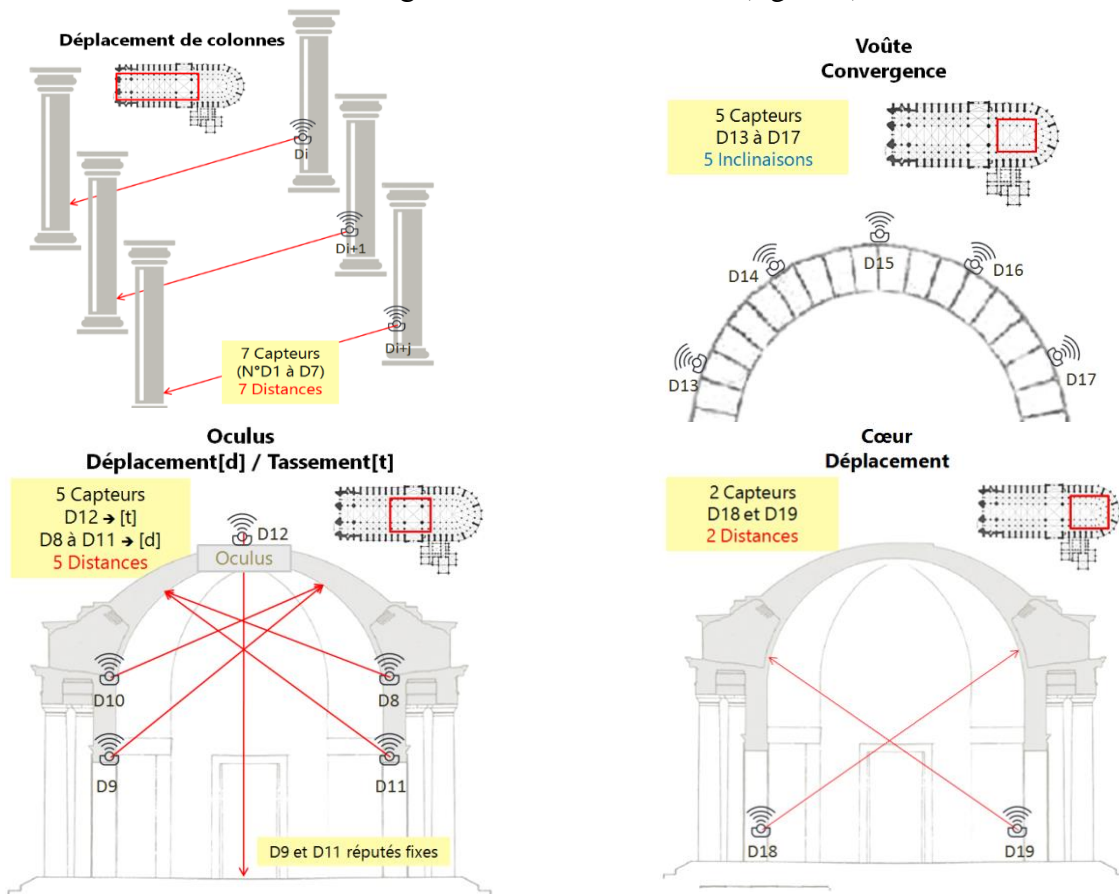


Figure 3 : Schématisation de l'installation des capteurs et des grandeurs étudiées sur la cathédrale (Illustrations de *123RF* [Colonne], *Techno-Science* [Cathédrale vue d'étage], *Lycée Gatti de Gamond* [Voûte], *Veneziano et al., (2013)* [Coupe transversale cathédrale]).

Les mesures de chaque capteur sont des valeurs dérivables à paramétrer sur l'interface de visualisation **WISEN** via des capteurs virtuels ou des modèles de

convergence. Les formules associées étant confidentielles, nous avons décidé d'élaborer notre propre calcul de convergence en première approximation pour comparer les résultats des deux méthodes. Le tableau 1 est tiré du suivi de la voûte de la cathédrale à la date du 10/06/2023. Les convergences sont obtenues entre deux sommets géométriques dont un est supposé fixe. Le critère de fixité est avancé par les sachants : architecte, ingénieur structure, etc.

Convergence (mm)	Calcul personnel	Calcul WISEN
Pt01-Pt02	0,0	-1,1
Pt01-Pt03	-0,2	0,5
Pt01-Pt04	-1,3	-1,4
Pt01-Pt05	1,8	3,7

Tableau 1 : Convergences calculées par la méthode manuelle et par calcul WISEN à la date 10/06/2023.

Au regard des quatre convergences étudiées (tableau 1), nous pouvons constater que les convergences issues du calcul manuel<sup>2</sup> sont sous évaluées (de 1 à 2 mm pour Pt01 et Pt05) par rapport au calcul WISEN. En effet, si ce dernier

tient compte de l'ensemble des inclinomètres pour chaque sommet (transmission d'angles), la méthode manuelle ne prend en considération que les deux inclinomètres qui encadrent le sommet géométrique étudié ce qui pourrait expliquer cette sous-évaluation. Finalement, les résultats de la méthode manuelle offrent une bonne indication de l'évolution des convergences en première approximation bien qu'elle nécessiterait un développement pour atteindre une meilleure fiabilité.

---

<sup>2</sup> Annexe 1



## II L'inclinomètre pour le monitoring d'instrumentation

### II.1 Principe et caractéristiques d'un inclinomètre

L'étude vise ici des inclinomètres connectés dernière génération *WISEN* de type **MEMs** régis par la norme **ISO/IEC 17025:2005** (anciennement NF P94-156 à l'échelle nationale). Cette technologie miniaturisée mesurant des inclinaisons suivant un axe de référence est en fait composée d'un système accélérométrique (**Posital**). L'application physique de ce **transducteur capacitif passif** fait appel à diverses notions d'électrostatique, de mécanique ou encore de thermique (**Juillard, 2020**). Intrinsèquement parlant, un bloc avec des électrodes mobiles est soutenu par un système de ressorts autour d'électrodes fixes. Lors d'un mouvement du capteur (figure 4) par rapport à une position de référence (que l'on peut supposer par exemple à l'horizontale), le bloc d'électrodes mobiles se déplace le long d'un axe et entraîne une variation de **capacité électrique** entre les électrodes mobiles et fixes (phénomène de **gap-closing**). Cette variation de capacité électrique est ensuite traduite en une information via une tension pour déduire une inclinaison à partir de ce "signal utile" (**Juillard, 2020**).

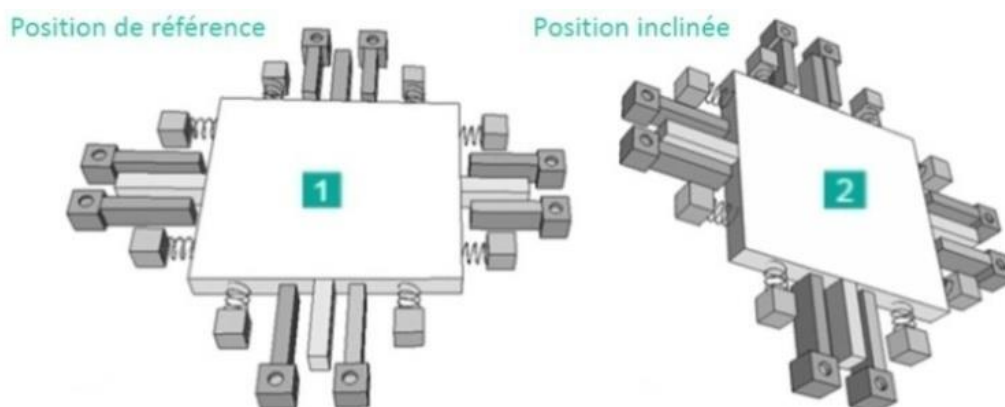


Figure 4 : Capture d'écran du principe de fonctionnement d'un inclinomètre MEMs, *Posital*.

D'autres types d'inclinomètres, bien que plus traditionnels, existent sur le marché ou sont élaborés en interne par des entreprises ou laboratoires comme l'inclinomètre hydrostatique longue base du CERN (**Boerez, 2008**). Le tableau 2 fait l'objet d'une classification d'inclinomètres autour de trois critères évalués du moins satisfaisant (---) au plus satisfaisant (+++). Le critère précision est estimé à partir des précisions fournies dans les notices techniques des instruments, le critère prix est examiné à partir de devis formulés par des fournisseurs d'inclinomètres et le critère de praticité est apprécié selon l'aspect compact et mobile des boîtiers ainsi que par la facilité d'obtention des données de sortie



des instruments. L'étude bibliographique des caractéristiques propres à chaque type d'inclinomètre<sup>3</sup> et le tableau 2 qui la résume révèlent que les capteurs à silicium (MEMs) représentent le meilleur compromis  $[(Précision.Praticité) / Prix]$  au regard des exigences d'une surveillance d'ouvrages.

Inclinomètre	Précision (selon le modèle)	Indice de praticité	Prix
"Blum" ou pendule horizontal	++	+/-	+/-
Hydrostatique (longue base)	+++	--	+/-
Pendule simple	--	+/-	+/-
"Servo" (pendule asservi)	+	+	+
Silicium (MEMs)	+	++	++

Tableau 2 : Récapitulatif du rapport  $[(Précision.Praticité) / Prix]$  des différents types d'inclinomètres réalisés à partir de l'annexe 1 ("+" étant un aspect satisfaisant et "-" un indice moins satisfaisant).

Mis à part son type, l'inclinomètre est aussi défini par un nombre d'axe de référence : un, deux ou encore trois-axes. L'apport des mesures suivant plusieurs axes perpendiculaires permet des observations plus complètes par exemple pour suivre l'inclinaison d'une surface dans le cas d'un inclinomètre biaxial (Erol, 2010). Le troisième axe (Z) d'un inclinomètre trois axes est relativement peu utilisé à l'heure actuelle.

## II.2 Performances et limites d'un inclinomètre

### II.2.1 Erreurs inhérentes à l'inclinomètre et compensation thermique des mesures

Une étude de l'état de l'art sur les capteurs d'inclinaison de type MEMs a permis d'identifier les erreurs affectant les mesures inclinométriques. Premièrement, tout comme chaque appareil de mesure, les inclinaisons des capteurs sont impactées par des erreurs systématiques liées à la non perfectibilité des instruments ainsi que d'autres erreurs dites accidentelles (Simeoni et al., 2003). Par exemple, parmi les systématismes d'un inclinomètre à pendule asservi, Mikkelsen P.E. et al. (2003) ont retenu que le décalage du zéro de l'appareil (décalage de biais) était l'erreur systématique la plus importante, que l'erreur de sensibilité des axes était la plus difficile à détecter et que l'erreur de rotation

<sup>3</sup> Annexe 2

correspond à la déviation du boîtier par rapport à l'axe d'inclinaison (cas d'un inclinomètre à pendule asservi). D'autres systématismes ont été mis en avant comme la non perpendicularité des composants du capteur (Simeoni et al., 2011) ou encore le caractère non linéaire de certains systématismes (Bannikov et al., 2022). Pour le cas des inclinomètres MEMs, il est à noter que d'après Juillard J. (2020), un avantage de ce type de capteur est d'être peu sensible à l'auto-échauffement comparé à des appareils analogiques. Par ailleurs, un capteur MEMs peut être perturbé du fait de sa propre électronique c'est-à-dire son bruit interne (de l'ordre de  $0,0005^\circ$  pour les capteurs WISEN) ou encore par un bruit extérieur comme la météo, le passage des engins ou même le vent (Jaskowski et al., 2018). Finalement, pour les inclinomètres MEMs, c'est la température qui est le facteur d'influence prédominant induisant l'erreur systématique et dont nous chercherons à quantifier l'impact par la suite.

Dans la littérature, il est question d'étudier la correction thermique des capteurs MEMs. Par exemple, Liu G. et al. (2015), dans leur méthode d'optimisation de correction de température d'un accéléromètre MEMs, ont montré que la température avait un impact sur la fréquence de résonance du capteur mais surtout sur la valeur de sortie du capteur (sous forme de capacité électrique) avec des déformations internes des composants de l'ordre du centième de  $\mu\text{m}$  pour les ressorts et du dixième de  $\mu\text{m}$  pour le bloc mobile ce qui entraîne une déviation estimée de l'axe de référence de 15%. Par ailleurs, Ruzza G. et al. (2018) ont avancé que l'axe Z d'un inclinomètre triaxial était moins affecté par la température que les autres axes pour une application sur un accéléromètre *low cost*.

De ce fait, différentes formules de compensation thermique des inclinaisons existent mais restent spécifiques au type de capteur utilisé. D'après les indications fournies par le constructeur, pour le cas d'inclinomètres MEMs, la démarche de compensation thermique s'exprime d'une part par un indicateur de corrélation entre les mesures de température et les mesures relatives d'inclinaison selon un axe (variation à une mesure initiale) qui permet de valider l'usage d'une compensation ( $\geq 60\%$ ); ce qui nécessite que la température soit le seul facteur d'influence sur la période choisie et que les variations de températures soient notables (environ  $10^\circ\text{C}$  au moins). D'autre part, pour chaque axe du capteur, nous modélisons la courbe qui, pour les températures (en abscisses), associent les mesures relatives d'inclinaison (en ordonnées) pour extraire un polynôme correctif cubique

de la forme  $f(x) = a.x^3 + b.x^2 + c.x + d$  (WISEN) et ainsi neutraliser les inclinaisons de l'effet de la température (notée ici T) :

$$Incli_{corr} = Incli_{brute} - (a.T^3 + b.T^2 + c.T + d) \quad [1].$$

Pourtant, il ne s'agit là que d'une compensation ou d'un étalonnage "in situ" de l'appareil élaboré directement sur les données d'acquisition. En bref, la correction sera différente pour un même capteur selon la durée de la période de référence choisie par l'utilisateur, les variations de température associées (saison froide ou chaude) ou encore si un éventuel mouvement extérieur est combiné ou corrélé avec la température. Si la littérature considère des étalonnages classiques d'inclinomètres (Ruzza et al. [2018], Woschitz et al. [2007] ou encore Yu et al. [2009]) difficilement reproductibles (figure 5)

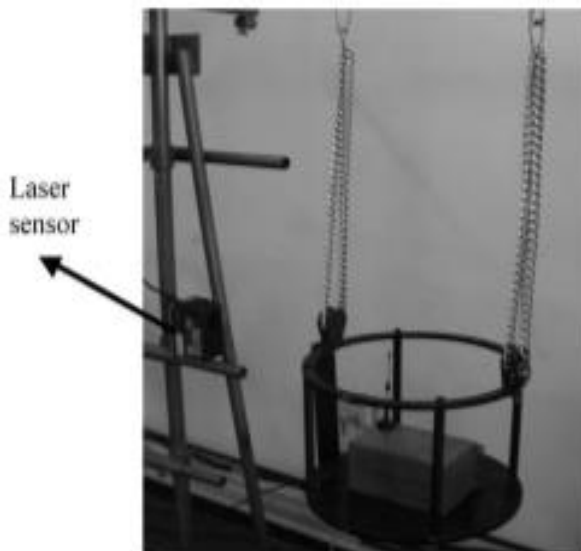


Figure 5 : Système d'étalonnage par laser, Yu et al. (2009).

pour lesquels nous pourrions appliquer des coefficients d'étalonnage sur les inclinaisons quelle que soit la température et quel que soit le mouvement du capteur (hors dérive thermique), nous ne retrouvons que peu d'exemples qui font référence à l'étalonnage d'inclinomètres MEMs en IoT, notamment pour les capteurs nouvelle génération WISEN. Une solution pour réaliser un étalonnage classique aurait pu être d'utiliser une table d'optique (supposée exempte de mouvement) en positionnant le capteur

suivant différentes inclinaisons et en faisant varier la température pour obtenir des corrections d'inclinaison en fonction de la température (comme pour la correction atmosphérique des distances mesurées par tachéomètre). De ce fait, cela pose différentes limites à l'utilisation de ces capteurs en auscultation d'ouvrages. Effectivement, les capteurs géotechniques de type inclinomètre ont vocation à être installés au plus proche de l'objet surveillé afin de suivre ses déformations, ce dernier étant particulièrement enclin aux mouvements. Or, considérant l'étalonnage in situ proposé par le constructeur qui désapprouve le choix d'une période de référence affectée d'un mouvement dissocié de la température, cette consigne est difficilement exploitable sur des données d'acquisition pour

lesquelles la variation importante des mesures (induite par la température) est couplée à un mouvement qui apparaît dès l'installation du capteur.

## II.2.2 Mettre à l'épreuve les inclinomètres en laboratoire

Les recherches bibliographiques menées sur la compensation thermique des inclinomètres mettent en avant des processus de correction qui ne sont pas toujours adaptés aux inclinomètres MEMs. L'idée est donc de réaliser des tests pour caractériser la précision, la répétabilité et l'influence de la température sur des inclinomètres MEMs.

L'expérience A (figure 6) a pour objectif d'étudier l'impact réel de la dérive en

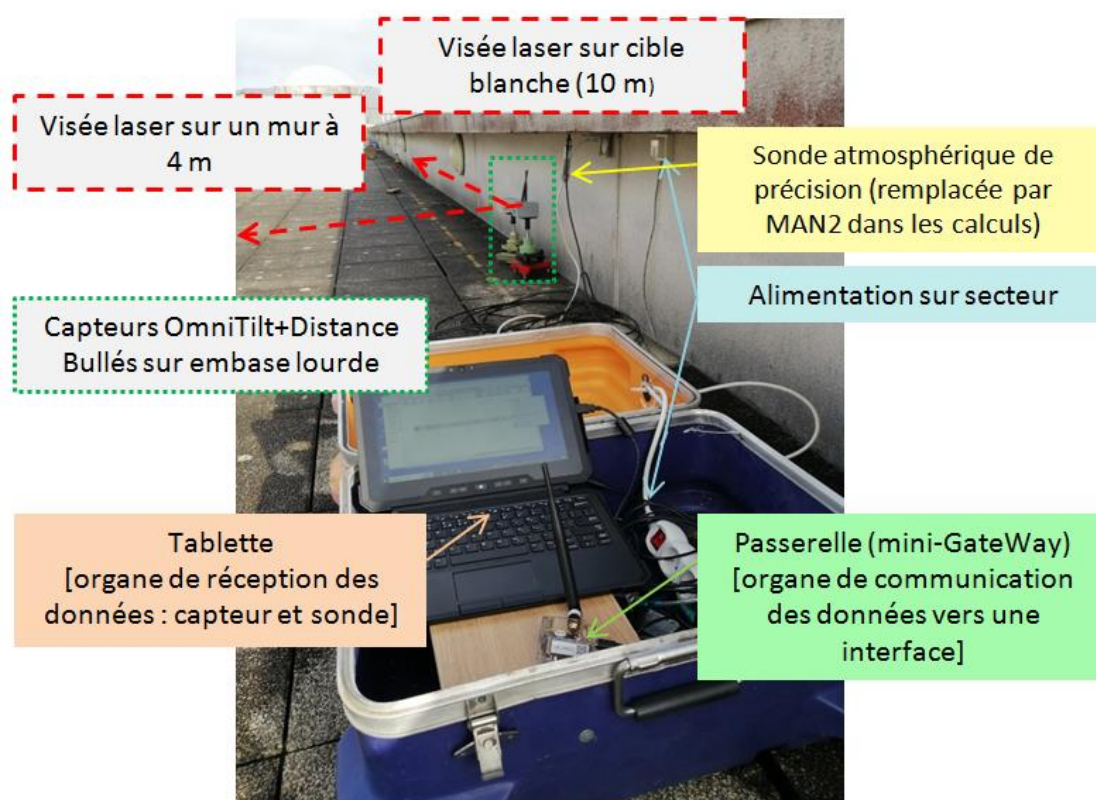


Figure 6 : Installation de l'expérience A sur la terrasse de l'ESGT, illustration personnelle annotée.

température des mesures d'inclinaisons de deux capteurs triaxiaux *OmniTilt+Distance WISEN 6F08* disposant de thermomètres internes à leur boîtier. Deux capteurs ont acquis des mesures en parallèle pour vérifier l'aspect reproductible de l'expérience. L'acquisition est rendue autonome grâce à la transmission radio des données des capteurs vers une passerelle locale (*Mini-GateWay*) qui les communique à son tour à l'organe de réception (tablette durcie) par voie USB sous forme d'un fichier texte avec une période d'acquisition de 10 minutes. Les deux capteurs (n°147 et 153) sont calés et positionnés à proximité d'une

sonde de température (*PTU300 VAISALA*) sur un espace peu enclin aux mouvements (terrasse de l'ESGT) et à l'abri de la pluie et du vent pour une durée de 4 jours. L'installation est alimentée par secteur et isolée de l'humidité grâce à une valise (figure 6). Par ailleurs, les données de la sonde météorologique MAN2 située à proximité immédiate de l'installation ont été utilisées.

L'étude a vocation à questionner la nécessité d'une correction thermique par le biais de données atmosphériques extérieures (sonde MAN2) ou de températures internes au boîtier. Il est important de noter que la divergence entre les deux données de température sur cette période de 4 jours a pu atteindre plusieurs dizaines de degrés Celsius avec l'inertie thermique du capteur (jusqu'à 18°C pour l'exemple).

La figure 7 met en lumière, pour chaque axe des inclinomètres (X, Y et Z), les écarts entre des inclinaisons corrigées par la température interne (boîtier) et des inclinaisons brutes. Le processus de correction des inclinaisons utilisé dans cette partie est celui développé à la section II.2.1 à l'aide de la formule [1]. Nous pouvons remarquer une différence importante des variations d'amplitude des inclinaisons particulièrement la journée (entre 10 h et 22 h) entre des inclinaisons corrigées par la température interne et des inclinaisons brutes de l'ordre de 0,050° pour X, jusqu'à 0,180° pour Y et 0,100° pour Z. Cela permet de supposer l'introduction d'une erreur non négligeable dans la prise d'inclinaisons en lien avec la température journalière. L'idée de garder des mesures brutes (écarts inférieurs à 0,050° pour chaque axe la nuit après 22 h) sur la période nocturne pourrait être envisagée mais entraînerait un manque de donnée de suivi la journée.

Le calcul des coefficients de corrélation des paramètres météorologiques par rapport au type de mesure (tableau 3) confirme que les mesures inclinométriques sont largement corrélées à la température avec des coefficients supérieurs à 60% (en valeur absolue). Une exception concernant l'axe X du capteur 153 (tableau 3) est à noter avec un coefficient de l'ordre de 23% (c'est pourquoi il n'est pas traité dans la figure 7). La pratique a montré que le choix de la période (durée et variation de température) est déterminante pour un obtenir bon coefficient de corrélation donc étendre la durée d'acquisition est un bon moyen pour remplir cet objectif.

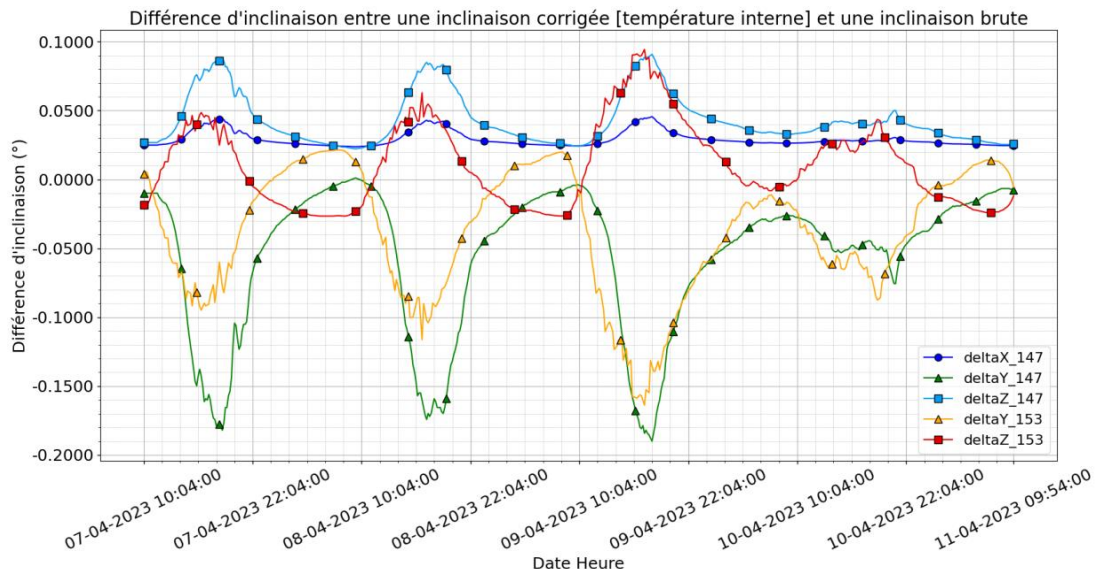


Figure 7 : Ecart des inclinaisons brutes à des données corrigées (température interne).

Paramètre	Capteur 147				Capteur 153				
	Distance (4m)	X	Y	Z	Distance (10m)	Distance (33m)	X	Y	Z
Pression	-0,026	-0,037	-0,035	0,02	0,013	-0,329	-0,398	-0,101	0,06
Humid.	-0,001	0,502	-0,721	0,685	-0,04	-0,825	0,342	-0,727	0,754
Temp. Interne	-0,014	-0,724	0,981	-0,941	0,045	0,811	-0,227	0,987	-0,983
Temp. MAN2	0,007	-0,53	0,744	-0,713	0,006	0,803	-0,277	0,764	-0,788

Tableau 3 : Corrélations de la distance et des inclinaisons selon trois axes (X, Y et Z) par rapport aux paramètres météo.

Concernant le choix de la donnée servant à la correction des inclinaisons (température extérieure ou interne au boîtier), la figure 8 souligne une différence non négligeable entre les deux types de correction au travers des courbes d'écart, pour chaque axe (X, Y et Z) de la correction, des inclinaisons corrigées par des températures externes au capteur (MAN2) avec des inclinaisons corrigées par les températures internes au capteur. Effectivement, cette différence d'amplitude de variation est de l'ordre de  $0,100^\circ$  pour Y,  $0,011^\circ$  pour X et  $0,062^\circ$  pour Z en journée (entre 10h et 22h). La nuit, ces écarts sont réduits autour de  $0,010^\circ$  pour Y,  $0,011^\circ$  pour X et  $0,062^\circ$  pour Z. Cela laisse donc supposer qu'une correction est plus adaptée qu'une autre.

La figure 8 met également en avant une variabilité entre capteurs au travers de l'amplitude de variation des courbes de l'ordre de  $0,025^\circ$  pour Z et de  $0,070^\circ$  pour Y ce qui laisse penser que les axes n'ont pas été affectés de la même manière par la température (différence liée à l'installation et à la configuration par rapport à la source thermique).



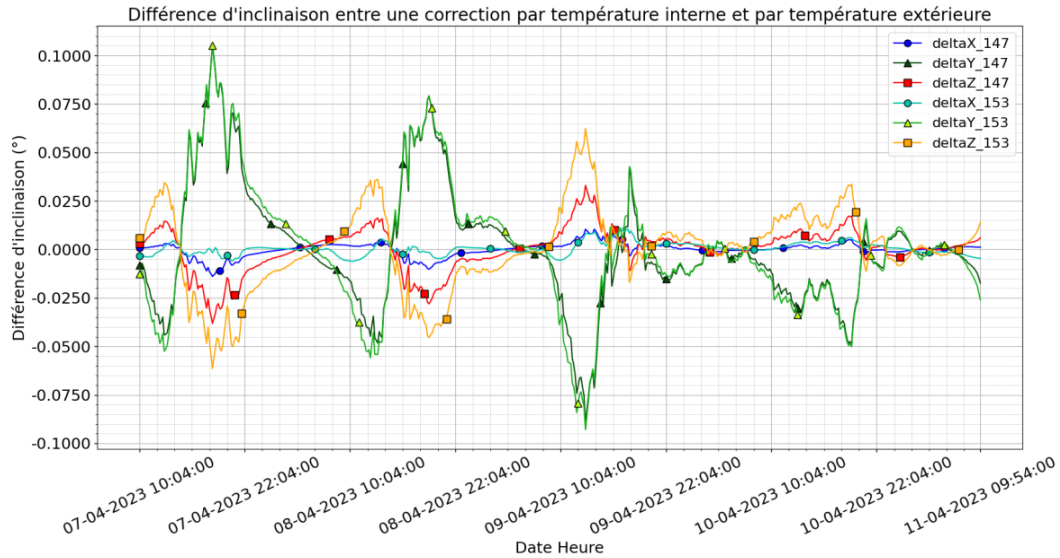


Figure 8 : Différence d'inclinaisons entre des données corrigées par des températures MAN2 ou des températures internes au boîtier.

Enfin, nous constatons une corrélation plus importante avec les températures internes qu'avec celles de MAN2 (tableau 3). De plus, la figure 9 vient consolider l'idée que la correction des inclinaisons avec des températures extérieures d'un capteur plus juste (MAN2) est moins efficace que le thermomètre interne au boîtier (moins juste mais plus proche de l'électronique) : l'amplitude des variations des inclinaisons corrigées via les données MAN2 reste assez importante (autour de  $0,100^\circ$ ) comparée aux inclinaisons corrigées par le thermomètre *WISEN* pour le cas de l'axe Y du capteur 147 (autour de  $0,050^\circ$ ).

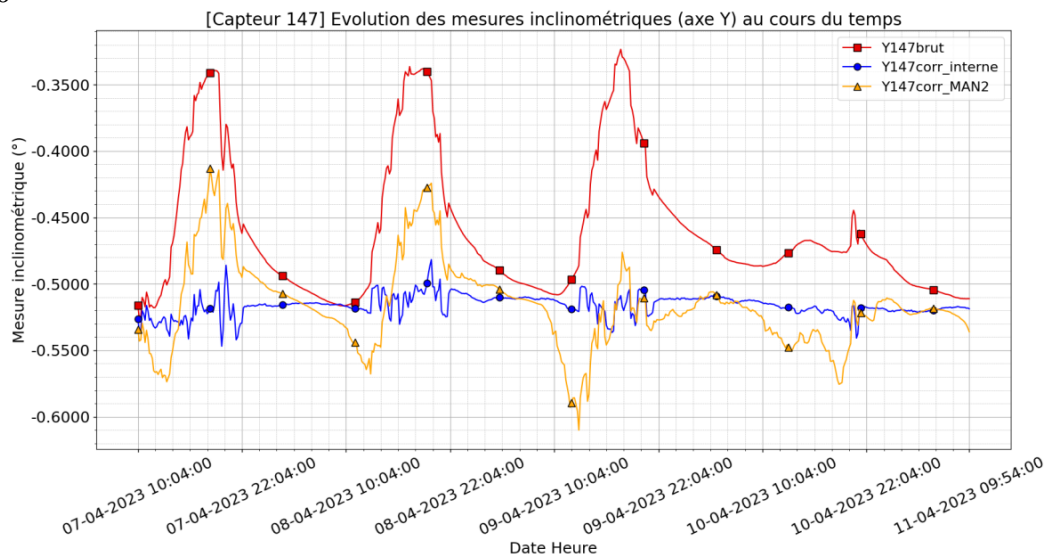


Figure 9 : Comparaison des données d'inclinaisons corrigées aux données brutes pour l'axe Y du capteur 147.

Pour savoir si la correction des inclinaisons (température interne) est efficace dans la réduction de la dérive thermique de l'appareil, la figure 9 permet une comparaison qualitative des inclinaisons brutes avec les inclinaisons corrigées pour l'axe Y. Il en ressort

que la correction des inclinaisons d'après des températures internes permet une réduction de l'amplitude de variations des inclinaisons du même ordre de grandeur que la perturbation introduite notamment la journée (soit  $0,300^\circ$  pour l'axe Y du capteur 147). Cela permet de conclure sur la faculté du processus correctif à éliminer la dérive thermique des inclinaisons des capteurs malgré les limites de cet étalonnage in situ soulevées dans la partie **II.2.1**. La figure 9 soulève toutefois certains résidus non tolérables la journée autour de  $0,500^\circ$  qui pourraient relever non pas de la correction appliquée mais de la dilatation thermique des matériaux (non prise en compte).

Finalement, même si la littérature fait mention de nombreux tests sous chambre thermique prônant une dérive stable de la température (température contrôlée), l'expérience A permet d'en tirer des conclusions équivalentes sur la période d'acquisition envisagée au regard de la sensibilité thermique sommaire pour chaque axe avancée par le constructeur de l'ordre de  $0,001^\circ/\text{C}$  pour X et de  $0,003$  à  $0,005^\circ/\text{C}$  pour Y et Z.

\*\*\*

En conclusion, l'inclinomètre est particulièrement sensible à la dérive thermique qui affecte les mesures d'inclinaison la journée de  $0,030$  à  $0,250^\circ$  selon les axes d'inclinaisons pour des variations de température extérieure du capteur comprises entre  $8$  et  $33^\circ\text{C}$  (sur cette période particulière de 4 jours). Pour respecter les exigences de précision des chantiers habituels de surveillance d'ouvrages autour de  $0,010^\circ$ , il est nécessaire de corriger ces mesures par un étalonnage. Si l'étalonnage in situ proposé par le fournisseur offre la possibilité d'éliminer le systématisme introduit par la température grâce aux données de température interne au boîtier, il présente certaines limites dans le choix de la période de référence. Les étalonnages dits "classiques" d'inclinomètre en laboratoire restent assez complexes à reproduire au laboratoire GéF. Une piste de manipulation est avancée et sera développée dans la partie **IV.1** pour envisager un étalonnage d'inclinomètre permettant de corriger les mesures d'inclinaison quel que soit le mouvement extérieur que peut subir le capteur.



### III Surveillance d'ouvrages d'art par distancemètre laser

#### III.1 Fonctionnement et besoins relatifs au capteur

Les capteurs *WISEN 6F08* sont composés, en plus de l'inclinomètre, d'un distancemètre laser. Vraisemblablement, le principe de mesure des distances par déphasage sur une onde modulée est utilisé (absence d'information claire), comme pour les distancemètres électroniques des stations totales modernes.

Il existe d'autres types de distancemètres qui fonctionnent selon des principes distincts<sup>4</sup> comme la mesure de temps de vol ( $Distance = Vitesse_{\text{onde}} \cdot Temps_{\text{retour}}$ ) ou encore la mesure de triangulation : une impulsion laser est émise puis réfléchiée vers un capteur **CCD** qui déduit une distance depuis la position du point laser (**Micro-Epsilon**). Il apparaît dans le tableau 4, une classification des types de distancemètres selon un rapport  $[(Précision \cdot Portée)/Prix]$ . La précision et la portée sont évaluées à partir des caractéristiques techniques d'appareils trouvés sur le marché et le coût selon leurs prix officiels. Chaque critère est évalué par une note allant, selon leur aspect satisfaisant ou non, de «---» à «+++». Ainsi, les distancemètres à mesure de phase incarnent le meilleur compromis en termes de précision, de portée et de prix tout en prenant en compte les besoins usuels en auscultation d'ouvrages ; c'est-à-dire des mesures de distances d'une précision comprise entre -3 et 3 mm et pour des portées parfois importantes de plusieurs dizaines à centaines de mètres.

Type de distancemètre	Précision (selon modèle)	Portée (selon modèle)	Coût
Déphasage	++	+++	+
Temps de vol (LiDAR)	-	+	+++
Triangulation	+++	--	++
Acoustique	-	-	+

Tableau 4 : Rapport  $[(Précision \cdot Portée)/Prix]$  de différents distancemètres du marché. ("-" étant un critère moins satisfaisant et "+" un critère plus satisfaisant).

---

<sup>4</sup> Annexe 3

Ce capteur nécessite un signal retour suffisamment fort pour une mesure fiable. En extérieur, pour des distances importantes et selon les conditions de luminosité, il pourra être convenu de préférer des mesures de nuit, d'utiliser des cibles réfléchissantes (au-delà de 20 m de portée) ou encore des supports oranges (**Acuity Laser**) pour pallier ce problème. Par ailleurs, il faut également rester vigilant à la taille du spot laser et à une éventuelle divergence du faisceau (**Acuity Laser**) qui peuvent entraîner une mauvaise interprétation des mesures (pas d'accrochage de cible prévu pour ces capteurs contrairement à la plupart des tachéomètres).

## **III.2 Contrôler le distancemètre du capteur en laboratoire**

### **III.2.1 Erreurs d'un capteur de distance *WISEN***

Tout comme l'inclinomètre, les mesures du capteur de distance sont entachées d'erreurs aléatoires et d'erreurs systématiques (**Simeoni et al., 2003**). Parmi ces dernières sont recensées l'erreur cyclique (erreur périodique fonction de la distance mesurée), l'erreur proportionnelle (selon la distance mesurée), l'erreur constante du système {centre du capteur-centre de phase} ou encore le décalage du zéro du distancemètre (**EST-FBS**). Par ailleurs, il est important de noter que d'autres phénomènes comme la courbure de la Terre ou la réfraction atmosphérique du faisceau introduisent un systématisme dans les mesures de distance selon leur portée (**EST-FBS**). Il conviendra donc d'évaluer grâce aux expériences menées, l'ordre de grandeur de chacun de ces systématismes.

En bref, nous pouvons avancer que le bilan des erreurs proposées est équivalent à celui des stations totales. Par conséquent, si le capteur de distance est affecté par un facteur d'influence comme la température, il conviendrait de le prendre en compte, comme pour des tachéomètres, par des formules de type Barrel & Sears. Cependant, les services *WISEN* mettent en avant des mesures de distance n'ayant pas besoin d'être corrigées (corrélation faible aux températures), nous ne disposons donc pas de formule de compensation à appliquer.

### **III.2.2 Qualifier les performances réelles des distancemètres**

Si la documentation technique indique une précision sur les mesures de distance de 1 mm sur une portée de 100 m, il convient d'en contrôler la précision effective en s'inspirant des protocoles associés à la norme **ISO 16331-1** relative aux performances des

distancemètres laser. Ainsi, une série de tests ont été menés concernant la variabilité des cibles naturelles que ce soit en matière de couleur de cible, de rugosité ou encore d'inclinaison par rapport au faisceau incident. Dans ce mémoire, il a été fait le choix de ne pas développer ces derniers considérant leur intérêt secondaire dans la qualification des performances des capteurs bien qu'ils pourraient être comparés à l'expérience de mesures de distance sans réflecteur via tachéomètre menée par **Vuillemez A.** (2007). D'après les besoins principaux formulés par l'entreprise et le temps passé à l'élaboration des expériences, il a été préféré d'axer ce mémoire autour de la détermination des erreurs systématiques des capteurs de distance (étalonnage) ainsi que de leur dérive thermique.

### **III.2.2.1 Étalonner les distancemètres laser**

Cette étape d'étalonnage de distancemètre a pu être mise en œuvre au sein de la salle de métrologie de l'**ESGT** par l'intermédiaire d'un banc d'étalonnage composé d'un rail de 50 m et d'un chariot interférométrique mobile avec la cible du système {capteur-cible} à étalonner et le prisme interférométrique. Cela permettra de quantifier notamment la constante d'addition, l'erreur proportionnelle et l'erreur cyclique des capteurs de distance.

Le choix d'un support de cible blanc (cible cartonnée) semble être un bon compromis quant à sa facilité d'installation et son retour laser sur les 50 m du banc. Outre l'étape de montage et d'alignement du capteur au banc<sup>5</sup>, la méthode d'étalonnage consiste en l'acquisition simultanée des distances du capteur et des distances de l'interféromètre (considérées comme étalon) pour chaque position du chariot ainsi que le relevé des paramètres météo de chaque élément (capteur, interféromètre, chariot). Ainsi, le capteur étalonné mesure des distances sur une plage de 6 cm à 50 m avec un pas du chariot d'environ 30 cm (pour estimer l'erreur cyclique) dans le sens allant du capteur à l'interféromètre.

---

<sup>5</sup> Annexe 4

La méconnaissance des caractéristiques du capteur laser nous amène à formuler différentes hypothèses pour qualifier sa précision. Effectivement, le zéro du distancemètre et la distance de rattachement (distance entre le zéro du distancemètre et le centre de la cible) sont inconnus. Par ailleurs, nous considérons ici que le principe de mesure des capteurs (déphasage d'une onde modulée) est similaire à celui d'un distancemètre de tachéomètre. De ce postulat, nous adaptons l'équation interférométrique relative au tachéomètre aux capteurs WISEN selon le protocole d'étalonnage utilisé (déplacement du charriot depuis le capteur vers l'interféromètre) pour déterminer les erreurs systématiques :

$$D^{capt} = D^{interf} + E - C - f \cdot D^{capt} - a_1 \cdot \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot D^{capt}\right) - b_1 \cdot \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \cdot D^{capt}\right) \quad [2]$$

► Avec les observations :  $D^{capt}$  et  $D^{interf}$  les distances mesurées respectivement par le capteur et par l'interféromètre ;  $E$  la distance de rattachement {zéro du capteur-centre de la cible} calculée par laser tracker (environ 616 mm) et  $\lambda$  la longueur d'onde de modulation du capteur.

► Avec les **inconnues** :  $C$ , la constante d'addition du système {cible-origine du capteur} ;  $f$ , le facteur d'échelle ;  $a_1$  et  $b_1$ , les composantes de l'erreur cyclique.

Une indication du constructeur sur la longueur d'onde de modulation des capteurs de 0,94 m nous a été apportée ce qui permet de quantifier la période de leur erreur cyclique autour de 0,47 m. Ainsi, le pas de mesure utilisé (environ 30 cm) n'aurait pas servi à estimer la longueur d'onde de modulation du capteur à partir d'une analyse spectrale.

De même, la distance de rattachement est estimée par l'intermédiaire d'une mesure au laser tracker entre un point de la carcasse extérieure du capteur et le centre de la cible. En conséquence, il est clair que cette approximation introduit un biais dans le calcul de la constante d'addition du fait de l'épaisseur de la carcasse du boîtier et du zéro effectif du distancemètre. Néanmoins, nous faisons le choix d'associer l'origine des distances à ce point de la carcasse extérieure du boîtier dans le but de reproduire aisément l'étalonnage d'un même type de capteur. Cet aspect reproductible de l'expérience associé à la connaissance de cette « nouvelle origine » du capteur permettra d'envisager plus facilement les distances mesurées dans un éventuel réseau d'observations (IV.3). Il est à noter que selon le capteur étalonné, la distance de rattachement estimée au laser tracker a pu varier de 0,5 à 1,0 mm ce qui peut questionner un défaut de perpendicularité des composants entre les capteurs ou encore la pérennité du dispositif de fixation utilisé.

En ce qui concerne la prise en compte des paramètres météorologiques (pression, température, humidité) pour les distances mesurées, seules les distances interférométriques ont pu être corrigées des paramètres météorologiques ne disposant pas de formule de type Barrel & Sears applicable pour les distances du capteur.

Paramètre	147	153
<b>PARAMETRES CALCULÉS</b>		
C (mm)	4,94	6,43
f (ppm)	-2,0	-2,4
a <sub>1</sub> (mm)	0,02	-0,01
b <sub>1</sub> (mm)	0,02	0,01
<b>PRÉCISIONS ASSOCIÉES</b>		
C (mm)	0,16	0,16
f (ppm)	0,6	0,5
a <sub>1</sub> (mm)	0,10	0,10
b <sub>1</sub> (mm)	0,10	0,10
<b>INTERVALLES DE CONFIANCE (95%)</b>		
C (mm)	[4,60 ; 5,25]	[6,13 ; 6,75]
f (ppm)	[1,0 ; 3,1]	[1,5 ; 3,5]
a <sub>1</sub> (mm)	[-0,25 ; 0,20]	[-0,22 ; 0,20]
b <sub>1</sub> (mm)	[-0,20 ; 0,24]	[-0,21 ; 0,22]

Tableau 5 : Paramètres calculés par moindres carrés.

À partir de la formule [2], un traitement par la méthode des moindres carrés est appliqué pour déterminer les paramètres des erreurs systématiques. Pour cet étalonnage, trois séries de mesures ont été menées pour chaque capteur testé afin de garantir la reproductibilité de l'expérience. Les différences entre séries étant négligeables (de l'ordre de 0,01 mm ou de 0,5 ppm selon le paramètre), nous donnons dans le tableau 5 une moyenne des paramètres pour chaque capteur étalonné (n°147 et 153). Le calcul a fait l'objet d'une validation individuelle des résidus normés (seuil de confiance de 95%) autour de l'intervalle d'acceptation [-1,96 ; 1,96]. Le

faible écart entre les paramètres des deux capteurs étalonnés souligne une faible variabilité entre eux. Ainsi, nous pouvons avancer en moyenne une erreur proportionnelle des capteurs *WISEN* autour de 2,2 ppm avec une précision de 0,5 ppm et un intervalle de confiance à 95% de [1,2 ppm ; 3,3 ppm] ; une erreur cyclique composée d'une amplitude de cosinus de 0,01 mm et d'une amplitude de sinus de 0,01 mm avec une précision de 0,10 mm et un intervalle de confiance à 95% de [-0,22 ; 0,21] ainsi qu'une constante d'addition de 5,68 mm avec une précision de 0,16 mm et un intervalle de confiance à 95% de [5,36 ; 6,00]. Nous rappelons ici que la constante d'addition fait l'objet d'une prise en compte du zéro du distancemètre sur un point particulier de la carcasse extérieure du boîtier (le zéro théorique étant à environ 5 mm derrière le point relevé) et que la différence de l'ordre d'un millimètre des constantes d'addition des deux capteurs est induite par l'écart autour du millimètre de leur distance de rattachement estimée par laser tracker questionnant le

centrage du dispositif ou la variation de perpendicularité des composants électroniques entre les capteurs.

D'après les écarts des distances mesurées par les capteurs avec les distances interférométriques sur la plage [0,6 m ; 50,0 m], la correction moyenne à apporter sur les distances serait de +0,6 mm pour ce type de capteur et l'écart maximal est de -1,5 mm. Afin de prévoir la correction à apporter selon une distance donnée, nous extrayons des courbes d'étalonnage calculées par la formule [2] une droite de régression linéaire pour chaque capteur. De manière à pouvoir étendre cette correction à d'autres capteurs de la même série, nous proposons de retenir la moyenne des coefficients de régression obtenus pour chaque capteur. Il vient alors, avec  $c$  la correction à apporter et  $x$  la distance envisagée :

$$c(x) : -(-2,2 \cdot 10^5 \cdot x - 0,0071) \quad [3]$$

Par exemple, à 100 m (portée maximale des instruments), on peut s'attendre à une correction à appliquer de +2,3 mm. Donc, la précision annoncée par le constructeur est à nuancer du fait des corrections à apporter aux appareils.

### III.2.2.2 Quantifier la répétabilité des mesures de distance WISEN

Dans le but de caractériser la répétabilité des capteurs, nous avons, selon le même dispositif que pour l'étalonnage (chariot et cible blanche), acquis des mesures de distances sur le banc d'étalonnage avec un pas d'environ 1 m pour des portées de 6 cm à 50 m. Ainsi, avec un pas d'un mètre, nous avons répété dix fois la mesure de distance. La figure 10 permet ainsi d'obtenir la courbe, pour chacun des capteurs, qui associe l'écart-type des 10 mesures répétées en fonction des distances mesurées par les capteurs. Nous remarquons

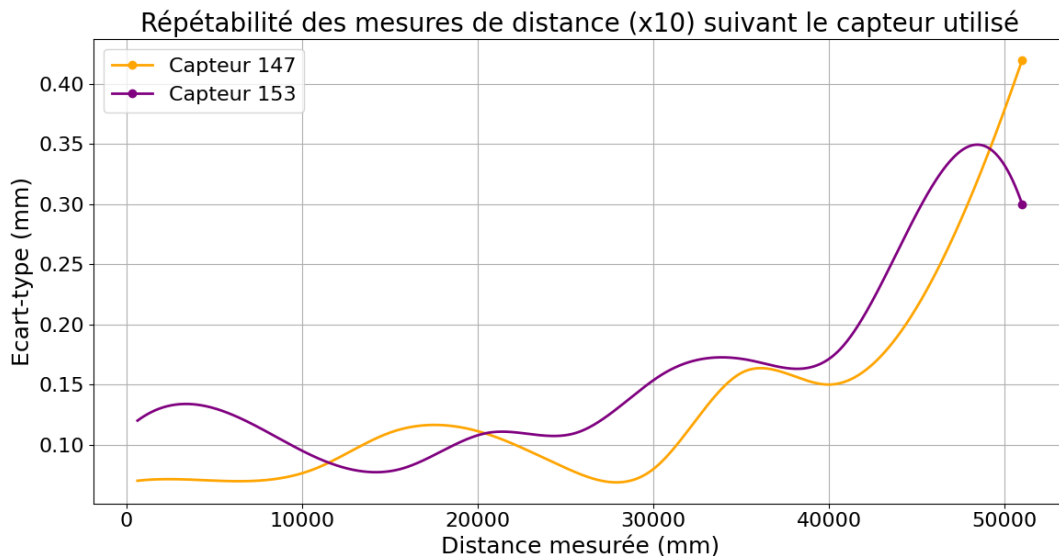


Figure 10 : Indicateur de répétabilité : écart type des 10 mesures répétées en fonction de la distance mesurée.

que la répétabilité est moins satisfaisante pour des valeurs de distance plus élevées d'un facteur 3 à 4 selon le capteur envisagé. Toutefois, considérant l'ordre de grandeur de l'indicateur de répétabilité du centième au dixième de millimètre sur la plage de test de 50 m, la répétabilité des capteurs reste satisfaisante au vu de la résolution de 0,1 mm indiquée dans les spécifications techniques des appareils.

### III.2.2.3 Évaluer l'impact des paramètres météorologiques sur les distances *WISEN*

Afin d'étudier l'influence de la température sur le capteur de distance *WISEN*, deux expériences ont été mises en place. La première est simultanée à l'expérience A (II.2.2) avec une visée de 4 m du capteur 147 (mur) et une visée de 10 m du capteur 143 (cible blanche). Il s'agit d'un cas terrain typique rencontré par l'entreprise considérant les distances envisagées et le type d'objet ciblé lors de la surveillance d'ouvrages. L'expérience B suit le même protocole avec le capteur 153 visant le mur à une plus grande portée : 33 m.

La figure 11 quantifie la variation des mesures de distance au cours du temps (par rapport à la valeur moyenne de distance sur la période envisagée) pour chaque expérience. Nous pouvons observer un motif périodique récurrent sur la période journalière (entre 6h et 22h) qui suit le changement de température. En termes d'amplitude de variation des

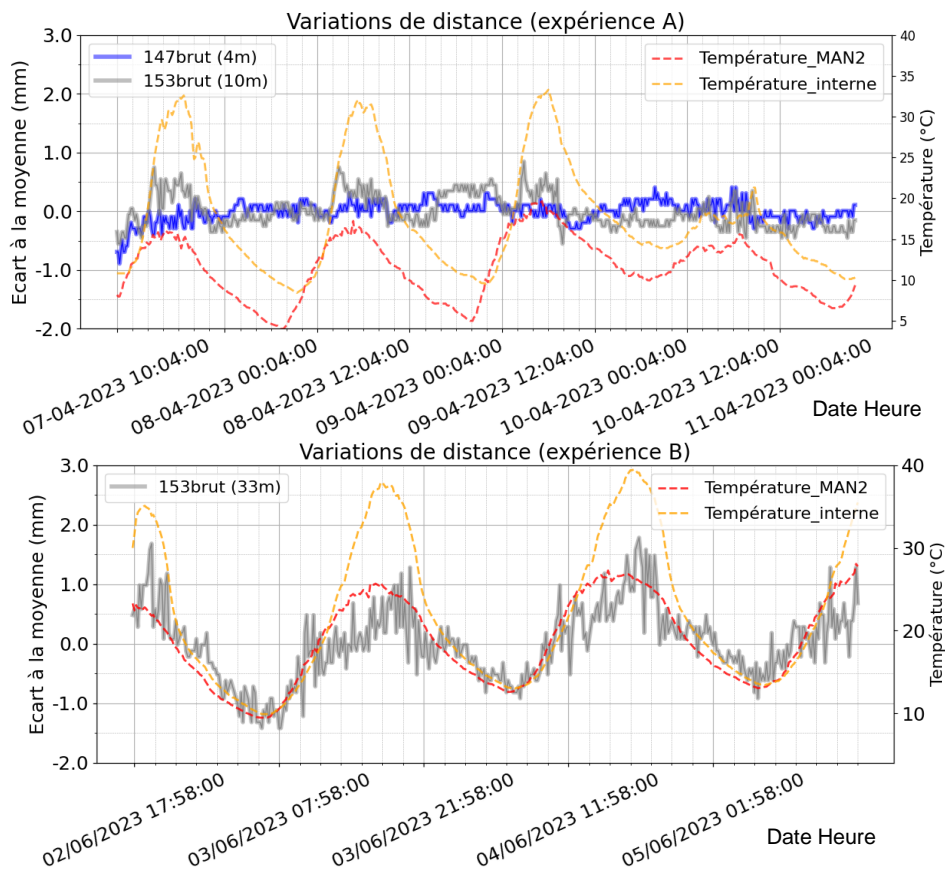


Figure 11 : Variations des distances pour différentes portées (expériences A et B).



distances brutes, le systématisme introduit par la température est d'un ordre submillimétrique à 4 m, de l'ordre de 1,0 mm à 10 m et de 2,5 mm à 33 m pour cette période de 4 j avec des températures extérieures variant de 8 à 33°C.

En reprenant les coefficients de corrélation aux paramètres météorologiques du **tableau 3**, nous constatons que les mesures à courtes distances (jusqu'à 10 m) sont faiblement corrélées à ces derniers (coefficients inférieurs à 10 % en valeur absolue) à l'inverse des longues distances pour lesquelles il est observable de bonnes corrélations supérieures à 60% avec la température. Cela vient confirmer que les capteurs sont plus sensibles à la température pour des mesures de longues distances qu'il faut compenser dès 10 m de portée pour respecter le cahier des charges de la mission.

Face au besoin de correction posé par les exigences de précision d'une surveillance (1 mm pour le cas d'étude) et n'ayant pas la formule de compensation adaptée aux capteurs, nous avons testé l'emploi d'une formule de correction d'un distancemètre de tachéomètre (**LEICA TPS1100**) aux caractéristiques laser équivalentes (figure 12).

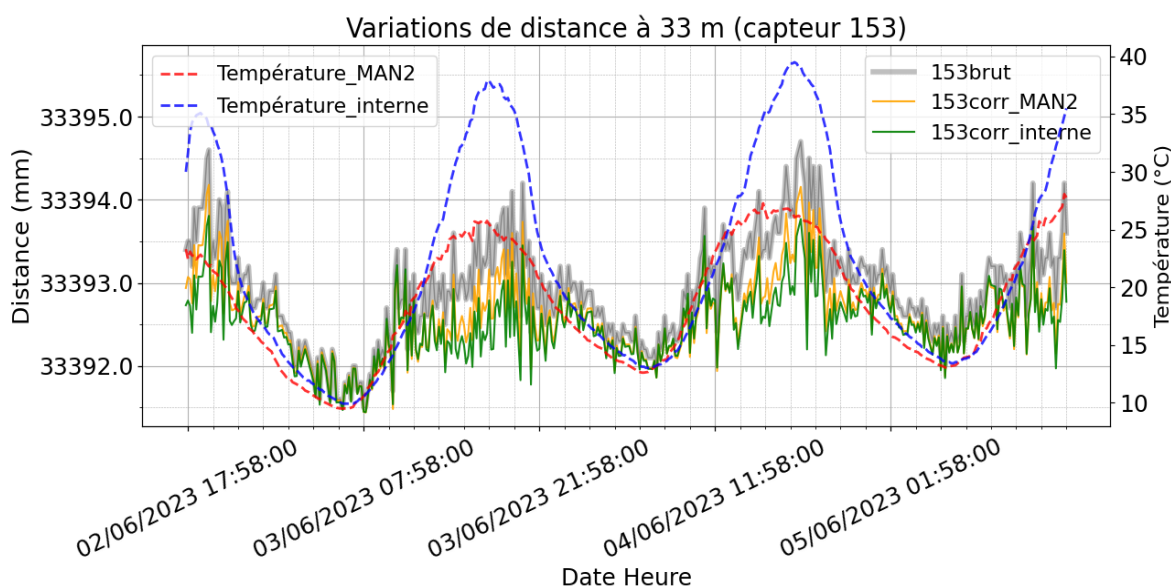


Figure 12 : Comparaison des distances à 33 m (brutes, corrigées par MAN2 et par une température interne).

Il est nécessaire de s'interroger sur la donnée météorologique qui va servir à la compensation (MAN2 ou thermomètre du boîtier). Les deux corrections ont été comparées avec l'hypothèse, pour le thermomètre interne, d'une pression et d'une humidité égale à celles de MAN2. L'étude de la figure 12 permet la comparaison qualitative des deux types de correction. Il en ressort une similarité des deux courbes et un impact sur la donnée brute



de l'ordre du dixième de millimètre, ce qui vient consolider l'idée que les écarts entre les deux corrections sont négligeables pour une utilisation à 33 m (différence de 0,1 mm en moyenne) et offrent toutes deux une compensation autour de 0,3 mm à 33 m, ce qui n'est pas suffisant pour éliminer l'erreur systématique induite par la température sur les distances mesurées.

Finalement, il est important de nuancer nos propos vis à vis du choix de la donnée de température : si l'inclinomètre nécessite une correction via sa température interne uniquement (à cause de son électronique), la température interne peut avoir un impact sur la mesure de distance tout comme le gradient de la température extérieure le long du trajet optique du faisceau laser (réfraction atmosphérique). De ce fait, pour les distances, il peut être important d'ajouter un thermomètre extérieur pour envisager une correction plus pertinente des distances par la température.

Par ailleurs, le choix d'une formule de compensation LEICA a été remis en question par l'emploi d'autres formules Barrel & Sears, issues d'autres constructeurs de tachéomètre, avec différentes longueurs d'onde proches de celle du capteur (**TRIMBLE**, **TOPCON** et **STONEX**). Les tests ont confirmé l'impact négligeable des formules de type Barrel & Sears pour la correction atmosphérique des distances mesurées par le capteur. Nous en concluons alors que, soit la mesure de distance varie au cours du temps (dilatation des matériaux non prise en compte), soit la procédure de correction des distances n'est pas aboutie.

Considérant la perturbation thermique non négligeable de la mesure de distance, cette expérience apporte donc des limites d'utilisation des capteurs dans le domaine de l'inspection d'ouvrages pour des portées longues (>35 m), mais aussi pour des portées courtes dans le cas du chantier de la reconstruction de la cathédrale (précision de 1 mm dépassée dès 10 m) et pour lesquelles l'utilisation de formules de type Barrel & Sears ne permet pas de réduire suffisamment l'impact de la réfraction atmosphérique sur les mesures.

\*\*\*

Pour résumer, le capteur *WISEN 6F08* est équipé d'un distancemètre à mesure de phase similaire à des distancemètres courants de tachéomètres quant aux propriétés du laser (longueur d'onde). Selon le constructeur, les capteurs ont vocation à être utilisés pour du suivi automatique de déplacements sur une portée maximale de 100 m avec une précision annoncée sur la mesure de distance de 1 mm sans avoir à corriger les mesures de

distance. Pourtant, l'étude a soulevé que les paramètres météorologiques affectaient les mesures de distance selon la portée envisagée notamment la journée (pour le cas particulier de cette expérience avec des températures extérieures entre 8 et 33°C). Le jour, à très courte portée, la perturbation par la température entraîne une amplitude submillimétrique de variation des mesures qui atteint le millimètre dès 10 m, puis 2,5 mm pour 33 m de portée. Ainsi, à partir d'une portée de 10 m, nous avons songé à corriger les mesures de distance par une formule de compensation (Barrel & Sears). Dans cette perspective, il a été utilisé des formules de compensation (**LEICA TPS1100** notamment) de distancemètres de tachéomètres similaires en termes de caractéristiques laser (longueur d'onde proche). La correction apportée de l'ordre de 0,3 mm à 33 m (en amplitude de variation) ne permet pas d'éliminer la perturbation périodique des données brutes affectées par les paramètres météorologiques. Donc, cela nous permet d'avancer que les mesures de distances varient avec la température (phénomène de dilatation des matériaux non envisagée pour la cible et pour le support du capteur) ou bien que la formule de compensation ne prend pas en compte tous les paramètres influençant la mesure de distance des capteurs.

## **IV Discussions et perspectives autour de la combinaison des mesures d'inclinaison et de distance au sein d'un réseau topométrique de surveillance**

### **IV.1 Perspectives d'élargissement des tests déjà réalisés**

Cette étude a permis de répondre aux premières questions soulevées par l'entreprise en ce qui concerne la portée, la précision réelle des instruments ou encore la variabilité des cibles naturelles (rugosité, couleur, inclinaison non abordées ici). Les réponses apportées rendent possible l'élargissement du sujet à d'autres problématiques pratiques. Parmi elles, nous pourrions questionner la précision effective des capteurs selon différents niveaux d'éclairage. En effet, si des tests de portée suivant la luminosité environnementale ont été menés, rien n'indique qu'une acquisition en milieu éclairé soit aussi précise qu'une autre faite dans des conditions nocturnes. Ce test pourrait être réalisé à l'avenir en réitérant l'étalonnage des capteurs selon différents niveaux de luminosité pour conclure sur un éventuel impact de la luminosité sur les mesures de distances, ou encore sur une éventuelle saturation du faisceau liée à la lumière rouge proche de la longueur d'onde du laser.

Dans une autre perspective, il peut être proposé un test de précision en utilisant un réflecteur (au lieu d'une cible naturelle). Même si la plupart des applications pratiques n'utilisent pas de réflecteur sur le terrain (discrétion de l'appareillage, endommagement dû à la fixation des prismes, etc.), les tests ont montré des performances limitées des capteurs au-delà de 35 m donc l'usage de réflecteurs pourrait améliorer la portée des capteurs pour des applications à longue portée (nous avons pu constater qu'en intérieur et à trop courte portée, le risque d'un signal retour trop fort était important). Une des limites est que si le capteur est amené à bouger, le faisceau peut facilement être dévié et ne plus viser le réflecteur (dimensionnement des réflecteurs à prévoir). Une mise en œuvre de ce test pourrait être d'une part un test de portée avec un couple {capteur-réflecteur} et d'autre part un étalonnage de précision tenant compte de la constante d'addition du couple utilisé pour savoir si l'intégration d'un réflecteur améliore la précision des mesures de distance.

Concernant l'inclinomètre, un étalonnage du capteur est proposé en fonction d'une variation de température. Ces coefficients d'étalonnage permettraient de corriger les inclinaisons de la température quels que soient le mouvement du capteur ou la variation de température de la période de référence (selon la saison) ce qui n'est pas le cas actuellement

avec l'étalonnage in situ proposé par le constructeur. Si ce dernier convient pour des applications en ferroviaire où l'installation des capteurs avant le passage du train permet d'obtenir une période de référence exempte de mouvement qui remplit les consignes de l'étalonnage in situ du fournisseur, cela n'est pas forcément envisageable sur des chantiers de reconstruction de bâtiment où un mouvement peut intervenir dès l'installation du capteur. Cette possibilité permettrait d'installer directement les inclinomètres sur site, sans avoir une période de référence dépourvue de mouvement. Physiquement, il pourrait être installé un inclinomètre sur une table d'optique avec différentes inclinaisons en faisant varier la température pour chaque inclinaison. Ne disposant pas de chambre climatique au laboratoire, le principal problème reste le contrôle de la température.

## IV.2 Ouverture sur la combinaison des mesures d'inclinaison et de distance

La faculté double des capteurs à acquérir à la fois des données de distance et d'inclinaison met en relief son utilisation sur un chantier de suivi d'ouvrages d'art. Effectivement, cette double information offre la possibilité d'avoir une vision plus complète des mesures selon deux configurations.

Dans le cas d'une installation de capteur avec l'objectif de suivre des inclinaisons au plus proche de la structure, la mesure de distance peut s'avérer être complémentaire dans le sens où elle apporte une observation supplémentaire de déplacement selon l'axe Y du capteur (figure 13).

Un autre cas serait une application des capteurs à longue portée pour laquelle l'utilisateur chercherait à établir une mesure de distance. Ici, la mesure d'inclinaison fournirait une information additionnelle sur le mouvement éventuel d'un capteur autour de ces trois axes (variation importante des inclinaisons). De plus, considérant l'axe Y sur la même direction que le faisceau laser (figure 13), il a été envisagé de quantifier le déplacement du faisceau sur la cible visée (figure 14). À partir d'une variation d'inclinaison  $dY$  entre la mesure d'inclinaison actuelle et la mesure d'inclinaison précédente

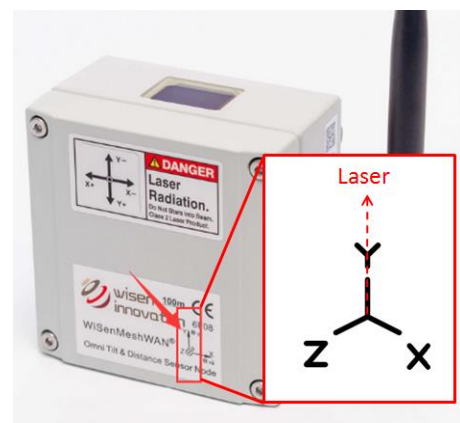
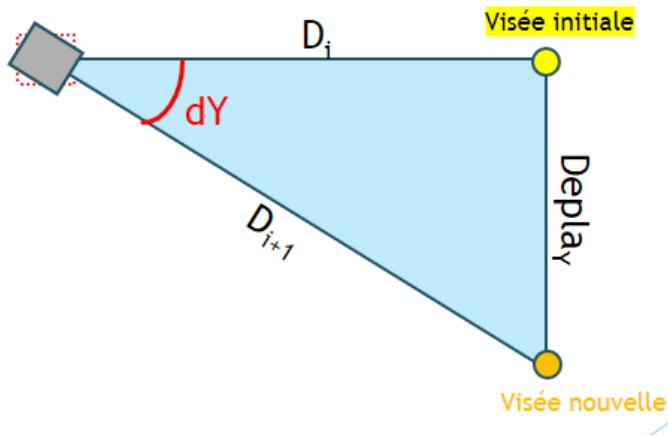


Figure 13 : Schéma de positionnement des axes d'inclinaison autour du distancemètre, WISEN.

ainsi que la mesure de distance actuelle  $D_{i+1}$ , nous donnons par trigonométrie le déplacement du faisceau laser selon l'axe Y  $Depla_Y$  :

$$Depla_Y = \sin(dY) \cdot D_{i+1} \quad [4].$$



En revanche, si cet indicateur calcule un déplacement du faisceau en fonction de l'inclinaison Y du capteur, il ne permet pas de distinguer le mouvement de la cible du mouvement du capteur dans la variation de la mesure de distance. Par ailleurs, cet indicateur prévoit une translation sur une surface verticale alors que les points visés peuvent être disposés sur

des surfaces variées (comme pour les capteurs  $D18$  et  $D19$  de la [figure 3](#) qui ciblent une surface concave). Cela suppose donc d'avoir une bonne connaissance des capteurs installés et du type de surface qu'ils visent (matériau, angle d'incidence sur la surface, etc.). L'étude de suivi de déplacements verticaux de la structure d'un bâtiment industriel réalisée par [Wierzbicki S. et al. \(2022\)](#) a montré que la prise en compte de l'angle de rotation de l'inclinomètre en complément d'une mesure de distance est fiable. Ils recommandent notamment une installation au plus proche de l'axe de surveillance, et si possible, sans espacement avec la structure pour limiter les erreurs de mesure. Dans leur cas d'étude, la tolérance maximale est fixée à 1 mm pour le déplacement du faisceau selon l'axe Y. Au-delà de ce seuil, ils proposent d'installer le capteur de distance dans une position horizontale pour suivre les déplacements verticaux ([figure 15](#)).

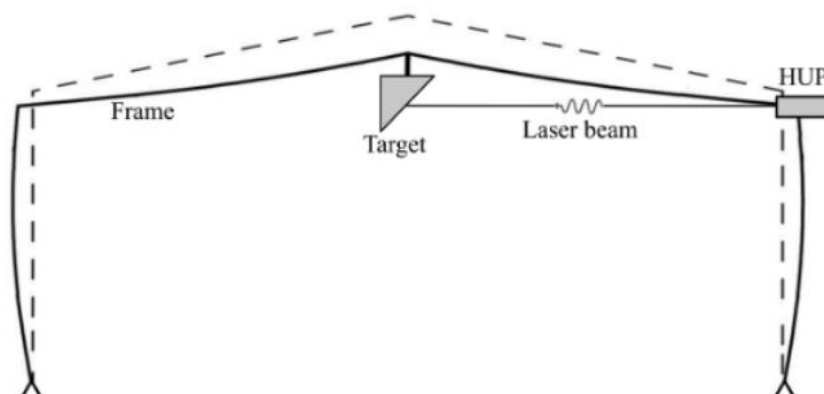


Figure 15 : Installation du capteur pour un suivi de déplacement vertical, [Wierzbicki et al. \(2022\)](#). "HUP" étant le capteur de distance.

### **IV.3 Discussion autour de l'intégration des observations des capteurs au sein d'un réseau topométrique en vue d'un ajustement de réseau**

Les domaines d'activité abordés (I.2.1) nous permettent de remarquer que la plupart des applications sont communes (glissement de terrain, SHM, tunnel, etc.) à la surveillance d'objet par tachéomètre à demeure régie sous le terme de monitoring topométrique. Il faut donc bien distinguer la notion de monitoring topométrique (coordonnées 3D) du monitoring d'instrumentation qui fait intervenir des capteurs géotechniques comme l'inclinomètre ou le distancemètre (Lançon et al., 2006).

Pourtant, Simeoni L. et al. (2011) ont su souligner dans une comparaison des méthodes de suivi sur un viaduc, que les grandeurs dérivées issues des capteurs inclinométriques bi-axes étaient redondantes avec celles d'une station totale après compensation des mesures par la méthode des moindres carrés. Il est clair que ces méthodes sont comparables du fait de leur précision similaire pour des mesures de distance mais elles restent spécifiques à leur champ d'application. Par exemple un unique capteur géotechnique ne peut surveiller qu'un à deux points tandis que le tachéomètre robotisé offre la possibilité de surveiller plusieurs dizaines de points. Il faudrait donc multiplier le nombre de capteurs sur le terrain pour pouvoir suivre le même nombre de points qu'une station totale. L'aspect économique est également à prendre en compte puisqu'un capteur géotechnique est considéré comme low cost au contraire du tachéomètre robotisé.

À l'inverse, les capteurs sont plus adaptés aux mesures rapprochées de la structure notamment dans le cas de chantiers fortement contraints en visibilité (échafaudage). Si la conception d'un réseau topométrique tient compte d'une pluralité de points fixes répartis à une distance relativement importante de l'objet surveillé (problèmes de visibilité) et d'une redondance importante des mesures, cela est difficilement reproductible pour un réseau de capteurs installé au plus proche de la structure (peu de points fixes), pour lequel un capteur acquiert seulement deux observations pas forcément corrélées aux autres capteurs ; ce qui questionne l'aspect redondant des observations. Envisager l'intégration de capteurs dans un réseau topométrique permettrait d'apporter des observations à la fois plus redondantes (visée de points par le tachéomètre et par les capteurs) et complémentaires au tachéomètre (mesures au plus proche de la structure inaccessible à longue portée) au service d'un ajustement de réseau plus complet. Néanmoins, la question posée est celle de l'introduction de mesures inclinométriques dans un logiciel d'ajustement de réseau. Si les mesures de

distance des capteurs sont assimilables dans ce type de logiciel, les inclinaisons ne le sont pas forcément. Une piste d'évolution serait donc de prévoir l'inclusion de mesures inclinométriques dans un logiciel d'ajustement. Cela suppose des hypothèses de géométrie virtuelle des inclinomètres ainsi qu'une réflexion approfondie sur le placement des inclinomètres autour de la station totale robotisée ou des capteurs de distance *WISEN* pour que ces deux types de mesure soient comparables.

En bref, cela mériterait un comparatif entre les deux méthodes de surveillance pour envisager, in fine, leur complémentarité dans un calcul d'ajustement de réseau topométrique.

\*\*\*

Finalement, envisager la réalisation de futurs tests permettrait de parfaire cette étude du point de vue de la qualification des performances réelles des capteurs : étalonnage des inclinomètres, étalonnage des distances selon la luminosité, utilisation de réflecteurs pour améliorer la portée et la précision. De plus, la mesure double des inclinaisons et des distances pour un même capteur permet une vision complémentaire des grandeurs dérivées surveillées. Par ailleurs, la variété des chantiers faisant intervenir des capteurs géotechniques dispose de similarités avec des missions de surveillance topométrique qu'il conviendrait de confronter et, à terme, de combiner au sein d'un réseau topométrique à ajuster pour savoir si le monitoring d'instrumentation permet d'améliorer les résultats du calcul d'ajustement topométrique (précision finale, redondance, etc.)

## Conclusion

Les capteurs géotechniques connectés représentent une solution low cost de suivi d'ouvrages d'art "clé en main", à la fois autonome dans son fonctionnement et pratique dans son utilisation. Ce travail a donné la possibilité de questionner la fiabilité de ces capteurs en mettant à l'épreuve des capteurs géotechniques *WISEN 6F08* (IoT) de type inclinomètre et distancemètre. Un des objectifs a aussi été de préciser les performances réelles de ces capteurs au regard des documentations techniques de l'appareillage qui ne sont pas toujours très complètes.

L'étude a montré que les inclinomètres MEMs testés requièrent une compensation thermique (pour la période de 4 jours envisagée avec des températures de 8 à 33°C) des mesures notamment la journée considérant l'amplitude de variation des inclinaisons non négligeable introduite par la température. Conserver uniquement les données de nuit qui sont peu impactées par cette dérive thermique n'est qu'une solution sommaire qui dégraderait la qualité d'un suivi d'ouvrages. L'étalonnage in situ proposé par le fournisseur permet d'éliminer ce phénomène vers des données d'inclinaisons conformes aux attentes de précisions autour de 0.010° notamment grâce au thermomètre interne du boîtier. Cependant, cet étalonnage ne permet pas une correction identique selon la période de référence considérée et peut ne pas aboutir pour le cas de capteurs qui ne présentent pas de variations de température assez fortes (10°C) ou qui subiraient un mouvement dès leur installation. La piste d'un étalonnage plus cohérent a été soulevée tout en sachant que la littérature ne fait référence que très rarement à des étalonnages d'inclinomètres MEMs facilement reproductibles.

Des capteurs de distance ont été étalonnés et les résultats questionnent la précision de 1 mm (sur une distance de 100 m) avancée dans la documentation qui pourrait mériter une correction selon les portées envisagées (environ +2 mm à 100 m). L'expérience a permis d'avancer une influence des paramètres météorologiques sur les mesures du capteur selon la distance. Pour des températures extérieures variant de 8 à 33°C, au-delà de 10 mètres, les mesures justifient d'un besoin de correction thermique au vu de la précision attendue et de l'amplitude de variation des mesures de l'ordre de 1 mm introduite par cette dérive. L'utilisation de formules correctives n'a abouti que sur une compensation de l'ordre du dixième de millimètre ce qui n'est pas suffisant pour éliminer cette perturbation liée à la météo. Cela soulève donc une variation des mesures de distance selon la température



(phénomène de dilatation des matériaux non pris en compte) particulièrement importante au-delà de 35 mètres (2,5 à 3,0 mm d'amplitude de variations des mesures). Les autres manipulations non développées dans ce mémoire convergent vers cette même conclusion concernant l'utilisation limitée des capteurs de distance au-delà de 35 mètres (couleur, rugosité et angle d'incidence de la cible par rapport au faisceau). Donc, les indications techniques de la documentation des appareils sont à nuancer du fait des examens menés tant sur la précision (étalonnage), la portée ou l'impact de la variation des paramètres météorologiques influençant ces capteurs de distance.

En somme, ce document propose l'élargissement de la détermination des performances des capteurs à d'autres tests subsidiaires, l'envisagement d'une combinaison des mesures d'inclinaison et de distance au service d'une surveillance d'ouvrages plus complète et une ouverture sur la possibilité de comparer puis d'intégrer le monitoring d'instrumentation à l'ajustement de réseau d'une surveillance topométrique.

# Bibliographie

## I. Ouvrages

ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE FKI H BEN SALAH (EST-FBS), (2020). *Mesures de distance*, [en ligne]. Disponible sur : <<http://estfbs.usms.ac.ma/wp-content/uploads/2020/03/Mesure-des-distances.pdf>> (consulté le 10/03/2023)

JUILLARD J., (2020). *Sensors & MEMS*, [en ligne]. Disponible sur : <<https://hal.science/hal-03214716>>. (consulté le 20/02/2023)

## II. Travaux universitaires : thèses

BOERERZ J., (2008). *Analyse et modélisation de l'effet des marées sur les réseaux de nivellement hydrostatiques du Cern*, Université de Strasbourg, École Doctorale Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement (STUE), 184 pages.

KALANTARI KHANDANI M., (2016). *Precision monitoring of bridge deck curvature change during displacement*, Université du Maryland, 50 pages.

SCHUITE J., (2016). *Apports des mesures de déformation de surface et de l'inclinométrie à la caractérisation pluri-échelle des réservoirs géologiques fracturés*, Université de Rennes I, École Doctorale Sciences de la Matière, 336 pages.

## III. Articles de revues et périodiques scientifiques

EROL B., (2010). Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring, *Sensors*, [en ligne], **Volume 10** (n°12), pp 10803-10827. Disponible sur : <<https://www.mdpi.com/1424-8220/10/12/10803>>. (consulté le 15/02/2023)

FAULKNER K. et al., (2020). Tracking bridge tilt behaviour using sensor fusion techniques, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, [en ligne], **Volume 10** (n° issue 4), pp 543–555. Disponible sur : <<https://link.springer.com/journal/13349/volumes-and-issues/10-4>>. (consulté le 25/02/2023)

JASKOWSKI W. et al., (2018). The use of two-axis high precision inclination sensors in determining headframe deflection, *E3S Web of Conferences*, [en ligne], **Volume 36** (n°02003), 9 pages. Disponible sur : <[https://www.researchgate.net/publication/324342298\\_The\\_use\\_of\\_two-axis\\_high\\_precision\\_inclination\\_sensors\\_in\\_determining\\_headframe\\_deflection](https://www.researchgate.net/publication/324342298_The_use_of_two-axis_high_precision_inclination_sensors_in_determining_headframe_deflection)>. (consulté le 23/02/2023)

KALAB Z. et al., (2010). First results from long-term monitoring of distance using a laser distance meter in shallow medieval mine, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, [en ligne], **Volume 7** (n°4), pp 469-473. Disponible sur :

[https://www.researchgate.net/publication/235711706\\_First\\_results\\_from\\_long-term\\_monitoring\\_of\\_distance\\_using\\_a\\_laser\\_distance\\_meter\\_in\\_shallow\\_medieval\\_mine](https://www.researchgate.net/publication/235711706_First_results_from_long-term_monitoring_of_distance_using_a_laser_distance_meter_in_shallow_medieval_mine)>.

(consulté le 02/03/2023)

KIM Y. et al., (2013). A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring, *Sensors*, [en ligne], **Volume 13** (n°13), pp 16090-16104. Disponible sur :

<https://www.mdpi.com/1424-8220/13/12/16090>>. (consulté le 09/04/2023)

KOMARIZADEHASL S. et al., (2022). A Novel Wireless Low-Cost Inclinometer Made from Combining the Measurements of Multiple MEMS Gyroscopes and Accelerometers, *Sensors*,

**Volume 22** (n°5 ID 5605), 21 pages. Disponible sur : <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/15/5605>>. (consulté le 26/02/2023)

LANCON H. et al., (2006). Topométrie et instrumentation face aux enjeux de la surveillance des grands ouvrages, *Revue XYZ*, [en ligne], n°107, pp 22-27. Disponible sur :

<https://www.aftopo.org/produit/xyz-numero-107/>>. (consulté le 07/06/2023)

LI S. et al., (2017). Safety monitoring of continuously welded pipeline subjected to ground deformation using wireless micro-electro-mechanical system inclinometers, *Advances in Mechanical Engineering*, [en ligne], **Volume 9** (n°9), 10 pages. Disponible sur :

[https://www.researchgate.net/publication/319707627\\_Safety\\_monitoring\\_of\\_continuously\\_welded\\_pipeline\\_subjected\\_to\\_ground\\_deformation\\_using\\_wireless\\_micro-electro-mechanical\\_system\\_inclinometers](https://www.researchgate.net/publication/319707627_Safety_monitoring_of_continuously_welded_pipeline_subjected_to_ground_deformation_using_wireless_micro-electro-mechanical_system_inclinometers)>. (consulté le 25/02/2023)

LI Y. et al., (2021). Optimal Sensor Placement for Underground Tunnel Monitoring via Wireless Sensor Networks, *Wireless Communications and Mobile Computing*, [en ligne], **Volume 2021**

(n°6621987), 8 pages. Disponible sur :

<https://www.hindawi.com/journals/wcmc/2021/6621987/>>. (consulté le 20/02/2023)

LIU G. et al., (2015). Robust optimization of a Mems Accelerometer considering temperature variations, *Sensors*, [en ligne], **Volume 15** (n°3), pp 6342-6359. Disponible sur :

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4435161/> >. (consulté le 20/03/2023)

RUZZA G. et al., (2020). A Multi-Module Fixed Inclinometer for Continuous Monitoring of Landslides : Design, Development, and Laboratory Testing, *Sensors*, [en ligne], **Volume 20**

(n°3318), 20 pages. Disponible sur :

<[https://www.researchgate.net/publication/342083060\\_A\\_Multi-Module\\_Fixed\\_Inclinometer\\_for\\_Continuous\\_Monitoring\\_of\\_Landslides\\_Design\\_Development\\_and\\_Laboratory\\_Testing](https://www.researchgate.net/publication/342083060_A_Multi-Module_Fixed_Inclinometer_for_Continuous_Monitoring_of_Landslides_Design_Development_and_Laboratory_Testing)>. (consulté le 25/02/2023)

STARK T.D. et al., (2008). Slope inclinometers for landslides, *Landslides*, [en ligne], 2008, **Volume 5** (n°3), pp 339–350. Disponible sur : <[https://www.researchgate.net/publication/225499907\\_Slope\\_inclinometers\\_for\\_landslides](https://www.researchgate.net/publication/225499907_Slope_inclinometers_for_landslides)>. (consulté le 20/02/2023)

WIERZBICKI S. et al., (2022). Laser-inclinometric method for displacement measurements in structural health monitoring, *Polish Academy of Sciences Journal (PAS)*, [en ligne], **Volume LXVIII** (n° issue 4), pp 607-616. Disponible sur : <[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjngKzZuab-AhUZT6QEhDS\\_DFEQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fjournals.pan.pl%2FContent%2F125697%3Fformat\\_id%3D1&usg=AOvVaw1nNMQ8kTbsPD60sg37ymKE](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjngKzZuab-AhUZT6QEhDS_DFEQFnoECAsQAQ&url=https%3A%2F%2Fjournals.pan.pl%2FContent%2F125697%3Fformat_id%3D1&usg=AOvVaw1nNMQ8kTbsPD60sg37ymKE)>. (consulté le 23/02/2023)

WOSCHITZ H. et al., (2017). Static and kinematic testing of tiltmeters: facilities and results, *Vermessung & Geoinformation (VGI)*, [en ligne], **Volume 2007** (n°2), pp 134-142. Disponible sur : <[https://www.researchgate.net/publication/228427699\\_Static\\_and\\_kinematic\\_testing\\_of\\_tiltmeters\\_facilities\\_and\\_results](https://www.researchgate.net/publication/228427699_Static_and_kinematic_testing_of_tiltmeters_facilities_and_results)>. (consulté le 02/03/2023)

YU Y. et al., (2009). Development of Wireless MEMS Inclination Sensor System for Swing Monitoring of Large-Scale Hook Structures, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, **Volume 56** (n° 4), 8 pages. Disponible sur : <[https://www.researchgate.net/publication/224372044\\_Development\\_of\\_Wireless\\_MEMS\\_Inclination\\_Sensor\\_System\\_for\\_Swing\\_Monitoring\\_of\\_Large-Scale\\_Hook\\_Structures](https://www.researchgate.net/publication/224372044_Development_of_Wireless_MEMS_Inclination_Sensor_System_for_Swing_Monitoring_of_Large-Scale_Hook_Structures)>. (consulté le 28/02/2023)

#### **IV. Travaux universitaires : mémoires**

VUILLEMEZ A., (2007). *L'auscultation des structures sans prismes ni repères*, Université de Strasbourg, Institut National des Sciences Appliquées (INSA).

#### **V. Normes ISO**

ISO 16331-1, Relative à la conception de télémètre laser, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.iso.org/fr/standard/65622.html>>.

ISO/IEC 17025:2005, Relative aux essais (inclinométriques) réalisés en laboratoire, [en ligne].  
Disponible sur : <<https://www.iso.org/fr/standard/39883.html>>.

## **VI. Logiciels et documentation technique**

ANTRATEK ELECTONICS, documentation technique du distancemètre acoustique A16-15, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.antratek.nl/ultrasonic-distance-sensor-15m-for-llds04>>.  
(consulté le 15/04/2023)

DRAGINO, documentation technique LoraWan Lidar ToF LLDS40, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.dragino.com/products/distance-level-sensor/item/240-llds40.html>>. (consulté le 15/04/2023)

LEICA GEOSYSTEMS, documentation technique LEICA TPS1100, [en ligne]. Disponible sur : <[https://www.gefos-leica.cz/ftp/Totalni\\_stanice/Navody/TPS1100/ENGLISH/System\\_UserManual\\_en.pdf](https://www.gefos-leica.cz/ftp/Totalni_stanice/Navody/TPS1100/ENGLISH/System_UserManual_en.pdf)>. (consulté le 10/04/2023)

MICRO-EPSILON, documentation technique Opto-NCDT, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.micro-epsilon.fr/service/glossar/optoNCDT.html>>. (consulté le 05/04/2023)

STONEX, documentation technique STONEX R20, [en ligne]. Disponible sur : <[https://s12c0efdbda467d84.jimcontent.com/download/version/1623609033/module/16153343624/name/R20\\_User%20Manual\\_ENGV1.4.pdf](https://s12c0efdbda467d84.jimcontent.com/download/version/1623609033/module/16153343624/name/R20_User%20Manual_ENGV1.4.pdf)>. (consulté le 09/06/2023)

TOPCON, documentation technique TOPCON MS05AXII.

TRIMBLE, documentation technique TRIMBLE S8.

WISEN INNOVATION, documentation technique Wisen Mesh Wan, [en ligne]. Disponible sur : <[https://www.wisencn.com/type6f07\\_6f08\\_en](https://www.wisencn.com/type6f07_6f08_en)>. (consulté le 14/02/2023)

WISEN INNOVATION, interface de visualisation des données.

## **VII. Rapports de projet et rapports de recherche**

MUTICONSULT, (2021). Review of dam monitoring and data management techniques, [en ligne]. Disponible sur : <<https://www.fornybarnorge.no/contentassets/1ef0503a2fde44ff8195bd7ffbea1bf7/10211223-rien-rap-001e---review-of-dam-monitoring-and-data-management-techniques-24.02.2021.pdf>>. (consulté le 24/03/2023)

OSHIMA Y., (2009). Displacement measuring method, displacement measuring instrument, displacement measuring target and civil structure, [en ligne]. Disponible sur : <https://patentimages.storage.googleapis.com/59/92/98/48e31ecea62e32/US7535554.pdf>. (consulté le 15/04/2023)

### VIII. Sites internet

ACUITY LASER. Sensor performance, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.acuitylaser.com/sensor-resources/sensor-performance/>. (consulté le 15/02/2023)

DIGORA. Qu'est-ce que l'IoT ?, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.digora.com/fr/blog/quest-ce-que-liot-et-pourquoi-mener-une-strategie-diot>. (consulté le 15/02/2023)

GIACINTEC. Accéléromètres et inclinomètres asservis, [en ligne]. Disponible sur : [http://www.giacintec.com/cariboost\\_files/3\\_20-20Acc\\_C3\\_A9I\\_C3\\_A9rom\\_C3\\_A8tres\\_20asservis\\_20\\_281\\_29.pdf](http://www.giacintec.com/cariboost_files/3_20-20Acc_C3_A9I_C3_A9rom_C3_A8tres_20asservis_20_281_29.pdf). (consulté le 15/04/2023)

GROUND ENGINEERING PLUS (GEPLUS). Instrumentation & monitoring: Modified measurement on tunnels, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.geplus.co.uk/features/instrumentation-monitoring-modified-measurement-on-tunnels-20-05-2021/>. (consulté le 30/03/2023)

JF-PAREDE (JFP). Qu'est-ce que le transducteur capacitif ?, [en ligne]. Disponible sur : <https://fr.jf-parede.pt/what-is-capacitive-transducer>. (consulté le 07/06/2023)

JOURNAL DU NET (JDN). Marché de l'IoT en France : tous les chiffres, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1498593-marche-de-l-iot-en-france-tous-les-chiffres/>. (consulté le 16/04/2023)

ORACLE. Qu'est-ce que l'IoT ?, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.oracle.com/fr/internet-of-things/definition-internet-of-things-iot/>. (consulté le 15/04/2023)

POSITAL. Caractéristiques et technologies des inclinomètres, [en ligne]. Disponible sur <https://www.posital.com/fr/produits/inclinometres/mems/MEMS-Technology.php>. (consulté le 16/02/2023)

STARTECHUP. IoT trends in 2023, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.startechup.com/fr/blog/iot-trends-in-2023/>. (consulté le 14/04/2023)

TACTIS. Iot technologies LPWAN, [en ligne]. Disponible sur : < <https://www.tactis.fr/iot-technologies-lpwan/>>. (consulté le 12/06/2023)

## **IX. Communications dans un congrès**

BANNIKOV A. et al., *Nonlinear systematic errors in borehole inclinometer measurements*.

Conférence : 22nd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, Maritim Paradise Blue, Bulgarie, 2022, 13 pages.

COMITÉ SUISSE DES BARRAGES (CSB), *Dispositif d'auscultation des barrages*. Conférence :

22ème Congrès de la Commission Internationale des Grands Barrages, Barcelone, Espagne, 2006, 38 pages.

ISLAMY M.R.F. et al., *Design of Deformation Monitoring System for Volcano Mitigation*.

Conférence : 6th Asian Physics Symposium, Bandung, Indonésie, 2016, 6 pages.

MIKKELSEN P.E., *Advances in Inclinometer Data Analysis*. Conférence : 6th Symposium on Field

Measurements in GeoMechanics (FMGM), Oslo, Norvège, 2003, 10 pages.

RICHIR P. et al., *Use of Laser Scanners and Laser Distance Sensors to Support Safeguards*

*Activities at Gas Centrifuge Enrichment Plants*. Conférence : 14th International Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases (SPLG), Stresa, Italie, 2017, 8 pages.

SANDENE T. et al., *Monitoring of tunnel convergence during excavation of adjacent cut-and-cover*

*tunnel*. Conférence : 11th Symposium on FMGM, Londres, Royaume-Uni, 2022, 7 pages.

SIMEONI L. al., *Analysis And Prediction of Slow Landslide Evolutions By Using Automatic*

*Displacement Monitoring Systems*. Conférence : ISRM Congress, Sandton, Afrique du Sud, 2003, 6 pages.

SIMEONI L. al., *Field monitoring of a motorway viaduct moving on an extremely slow landslide*.

Conférence : 8th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Trento, Italie, 2011, 18 pages.

YANG J. et al., *An Environmental Monitoring System with Integrated Wired and Wireless Sensors*.

Conférence : 3th Wireless Algorithms, Systems and Applications (WASA) International Conference, Dallas, TX, USA, 2008, pp 224-236.

## Table des annexes

Annexe 1 Approche personnelle du calcul de convergence.....	48
Annexe 2 Choix du type d'inclinomètre.....	50
Annexe 3 Choix du type de distancemètre.....	52
Annexe 4 Installation et alignement des capteurs sur le banc d'étalonnage.....	54



## Annexe 1

### Approche personnelle du calcul de convergence

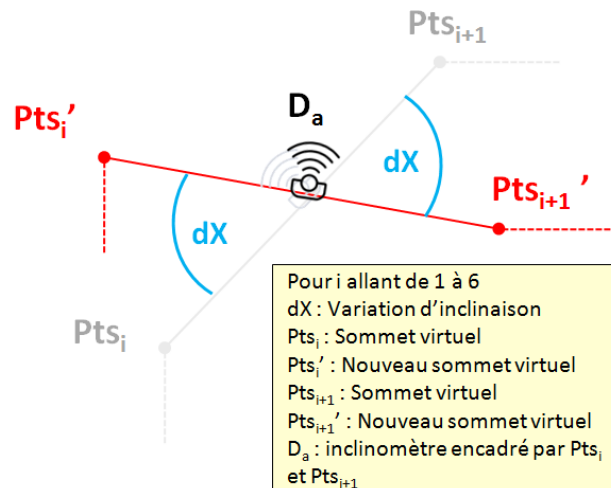


Illustration 1: Schéma personnel de principe de la variation inclinométrique.

Afin de vérifier la cohérence des valeurs de convergence fournies par défaut par le modèle d'interface *WISEN*, nous avons proposé une méthode de calcul des convergences en première approximation en se servant uniquement des données d'inclinaisons des capteurs. La convergence peut être calculée pour chaque sommet virtuel de la géométrie à partir des données des deux inclinomètres qui l'encadrent (sauf pour *Pt01* et *Pt06* réputés fixes).

#### Protocole de calcul personnel de convergence en première approximation (illustration 1) :

- Coordonnées des inclinomètres (pour  $a$  allant de 13 à 17) à partir de la moyenne des coordonnées des sommets virtuels paramétrés

$$x_{Da} = (x_{Pts_i} + x_{Pts_{i+1}}) / 2$$

$$y_{Da} = (y_{Pts_i} + y_{Pts_{i+1}}) / 2$$

- Coordonnées nouvelles des sommets virtuels selon la position du sommet virtuel (2 cas). Chaque sommet pourra être considéré d'une part dans la configuration de  $Pts_i$  et d'autre part dans la configuration de  $Pts_{i+1}$  (sauf les sommets *Pt01* et *Pt06* réputés fixes) :

[configuration 1 :  $x_{Pts_i}$ ]

$$-x_{Pts_i}^1 + x_{D_a} = -\cos(dX) \cdot (x_{Pts_i} - x_{D_a}) - \sin(dX) \cdot (y_{Pts_i} - y_{D_a})$$

$$-y_{Pts_i}^1 + y_{D_a} = -\cos(dX) \cdot (y_{Pts_i} - y_{D_a}) + \sin(dX) \cdot (x_{Pts_i} - x_{D_a})$$

[configuration 2 :  $x_{Pts_{i+1}}$ ]

$$x_{Pts_i}^2 - x_{D_a} = \cos(dX) \cdot (x_{Pts_i} - x_{D_a}) + \sin(dX) \cdot (y_{Pts_i} - y_{D_a})$$

$$y_{Pts_i}^2 - y_{D_a} = \cos(dX) \cdot (y_{Pts_i} - y_{D_a}) - \sin(dX) \cdot (x_{Pts_i} - x_{D_a})$$

- Calcul de  $x_{Pts_i}^{moy}$  et  $y_{Pts_i}^{moy}$ , les moyennes des coordonnées des nouveaux points virtuels dans la première configuration avec celles de la seconde.

- Distance initiale à  $t = 0$  de chaque sommet virtuel avec le point servant de référence :

$$Dist_{Pt01-Pts_i}^0 = \sqrt{(x_{Pts_i}^{t=0} - x_{Pt01})^2 + (y_{Pts_i}^{t=0} - y_{Pt01})^2}$$

- Distance actuelle de chaque sommet virtuel avec le point servant de référence :

$$Dist_{Pt01-Pts_i} = \sqrt{(x_{Pts_i}^{moy} - x_{Pt01})^2 + (y_{Pts_i}^{moy} - y_{Pt01})^2}$$

- Convergence du sommet virtuel par rapport au point de référence (illustration 2) :

$$C_{Pt01}^{Pts_i} = Dist_{Pt01-Pts_i} - Dist_{Pt01-Pts_i}^0$$

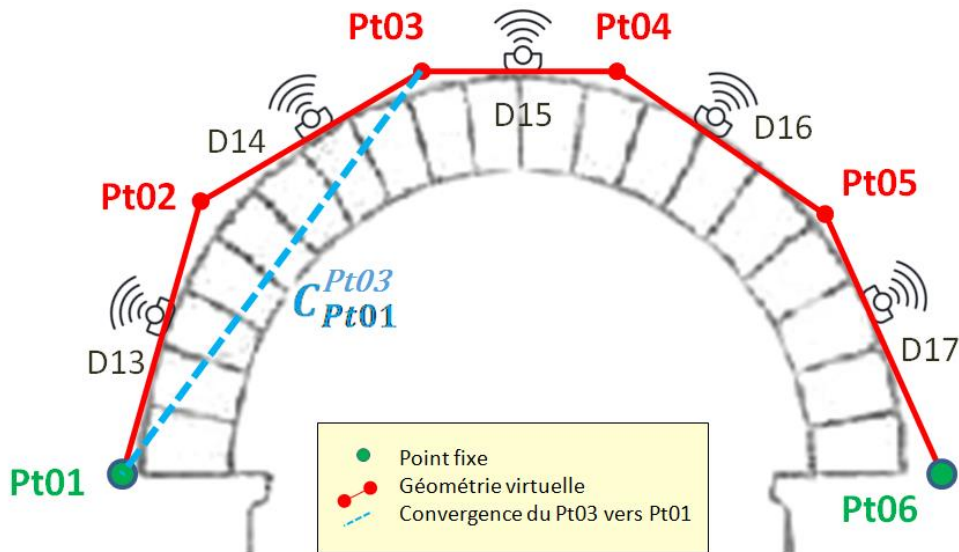


Illustration 2 : Schéma personnel de la convergence et de la géométrie virtuelle.

## Annexe 2

### Choix du type d'inclinomètre

Cette annexe présente, d'après une recherche bibliographique, différents types d'inclinomètres présents sur le marché ou conçus en interne par des organismes.

Le pendule de Blum (illustration 1) et le pendule hydrostatique (illustration 2) sont des inclinomètres de première génération à l'aspect plutôt imposant et avec une plage de mesure très limitée. Le pendule hydrostatique est difficilement transportable mais ces deux types d'inclinomètre requièrent des réglages et un entretien fréquents. Leur atout majeur est

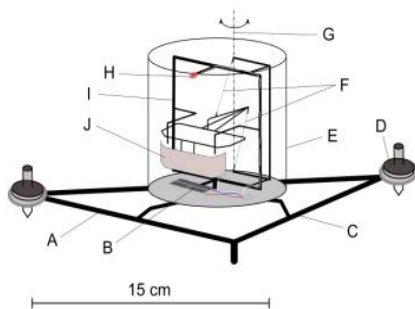


Illustration 1 : Pendule de Blum fait main, Schuite J. (2016).

la précision accessible par leur principe de mesure de  $10^{-8}$  à  $10^{-9}$  radians (Schuite, 2016). Il est à nuancer que des inclinomètres hydrostatiques industriels plus récents existent et offrent une compacité meilleure que cette conception faite main. L'application sur des chantiers de surveillance d'ouvrages rend plus difficile

l'emploi de ce type d'inclinomètre notamment pour le cas d'étude qui impose une variété de points de mesure, une instrumentation discrète, compacte et avec une plage de mesure large pour identifier certaines anomalies (choc d'un capteur par exemple).

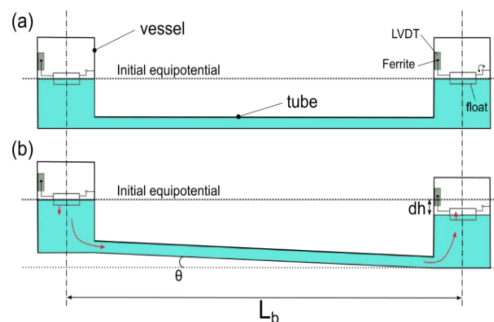


Illustration 2 : Inclinomètre hydrostatique, Shuite J. (2016) [à droite] et Boerez J. (2008) [à gauche].

Pour ce genre de mission d'auscultation, les inclinomètres asservis (illustration 3) dits de seconde génération et les inclinomètres MEMs (illustration 4) de dernière génération représentent le meilleur compromis [Précision.Praticité/Prix]. Leur nombre d'axe (deux à trois axes) permet également d'envisager un suivi selon plusieurs dimensions et ainsi qualifier les mouvements multidimensionnels (2D ou 3D) d'une surface (voûte, mur) plutôt qu'un déplacement 1D (inclinomètre hydrostatique). Même si leur précision est moindre comparée aux inclinomètres faits-mains de première génération, ces derniers disposent d'une technologie compacte et discrète qui répond aux exigences d'une surveillance d'ouvrages autour de  $3,5 \times 10^{-5}$  radians soit  $0,002^\circ$  sur une plage de  $[2 ; -2]^\circ$ . Leur disponibilité sur le marché et leur aspect bas coût (autour de 700 à 900€ pour un inclinomètre simple jusqu'à 1200 à 1600€ pour un inclinomètre avec distancemètre)

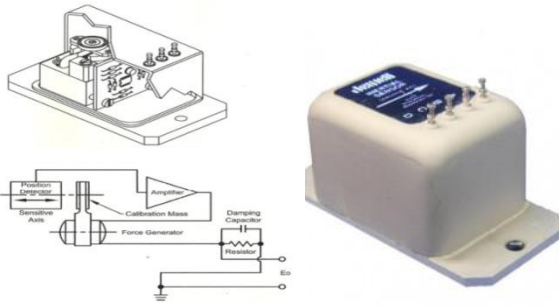


Illustration 3 : Inclinomètre asservi filaire, site web [PMInstrumentation](#) consulté le 15/04/23.

explique la demande accrue des professionnels pour ce genre d'inclinomètre. Les inclinomètres asservis sont généralement trouvés sous forme filaire (**GIACINTEC**) ce qui n'est compatible ni avec une autonomie d'alimentation (branchements électriques nécessaires) ni avec une stratégie IoT sans-fil (pas de communication entre les capteurs). Des possibilités d'évolution des dispositifs peuvent

toutefois être envisagées en concertation avec les fournisseurs. Les nouveaux capteurs MEMs du marché présentent aussi certaines limites notamment dans la nécessité de recourir à l'achat d'une passerelle (et d'un abonnement cellulaire pour le cas de capteur NB-IoT en France), leur inter-compatibilité (un lot de capteurs n'est pas compatible avec une autre marque de capteur), le transit des données traitées : il s'agit d'une solution clés en main qui suppose que les données soient envoyées directement sur les serveurs du fournisseur de la solution ce qui questionne la propriété et la sécurité de la donnée des clients ou encore le choix d'un développement interne de la solution (création d'une interface propre à l'entreprise par exemple). Il s'agit aussi de capteurs intelligents capables de détecter certaines défaillances (batterie, mouvement du capteur, etc.). Les nouveaux capteurs envisagent le couplage de ces inclinomètres à des distancemètres ou encore à des thermomètres internes au boîtier pour une correction thermique plus fiable (proximité de l'électronique) et plus facile à mettre en œuvre (**WISEN**).



Illustration 4 : Inclinomètre MEMs triaxial (+distance), site web [WISEN](#) consulté le 15/04/23.

\*\*\*

Finalement, même si l'inclinomètre MEMs connecté peut impliquer des coûts supplémentaires de communication (selon le réseau choisi), il reste un capteur low cost, compact et simple à mettre en place. Il permet de répondre aux exigences habituelles d'un suivi d'ouvrages et représente sur le marché le meilleur compromis [(Précision.Praticité)/Prix] parmi les autres inclinomètres existants. Ce type de capteur est donc préféré par les entreprises dans leurs stratégies IoT de surveillance d'ouvrages d'art.

## Annexe 3

### Choix du type de distancemètre

Cette annexe a vocation à préciser les types de distancemètre présents sur le marché et à qualifier lesquels sont les plus à même de répondre aux exigences d'une surveillance d'ouvrages supposant des portées parfois importantes (quelques dizaines à centaines de mètres) et une précision inférieure à 3 mm sur les mesures de distance.

Les distancemètres acoustiques (illustration 1) sont des capteurs à bas coût mais qui ne sont souvent pas adaptés aux stratégies IoT. Ils posent également problème au niveau de leur imprécision trop importante (supérieure à 3 mm), de leur portée limitée à une quinzaine de mètres (**ANTRATEK**) ou encore la difficulté d'associer avec précision une cible au capteur (pas de système de visée même approximatif).

Les systèmes laser par triangulation (illustration 2) sont plutôt à usage industriel considérant leur haute précision de mesure (inférieure au millimètre) et leur portée très limitée autour d'un mètre. Nous retrouvons également peu de possibilités d'associer ce système à un processus connecté IoT.

Finalement, les distancemètres laser à mesure de phase (illustration 3) et à mesure de temps de vol ou "LAser Detection And Ranging" (LiDAR) sont les plus adaptés en termes de portée puisque qu'ils peuvent respectivement atteindre une cible à plusieurs centaines de mètres (typiquement 100 m) pour la mesure de phase et plusieurs dizaines de mètres pour la mesure temps de vol (typiquement 40 m). Ils sont également disponibles pour des applications IoT. Au vu de la précision d'environ 5 cm (**DRAGINO**) liée à une mesure de temps de vol (illustration 4), ce genre de distancemètre n'est pas concevable pour un suivi de déformations de l'ordre millimétrique (si ce n'est pour un objectif de visualisation globale sommaire de la structure).

Le distancemètre à mesure de phase envisage quant à lui une précision sur les mesures inférieures à 3 mm sur sa plage de mesures (typiquement 1 mm) le rendant utilisable pour des opérations de surveillance d'ouvrages d'art (**WISEN**).



Illustration 1 : Distancemètre acoustique, site web *ANRATEK* (A16-5) consulté le 17/03/23.



Illustration 2 : Distancemètre à triangulation laser, site web *MICRO-EPSILON* (OptoNCDT) consulté le 17/03/23.



Illustration 3 : Distancemètre à mesure de phase (+inclinomètre), site web *SISGEO* (OLSWRLASER15) consulté le 15/02/2023.



Illustration 4 : Distancemètre LiDAR, site web *ANRATEK* (DRAGINO LLDS40) consulté le 15/03/23.

\*\*\*

Par conséquent, selon cette étude bibliographique, il semblerait que seul le distancemètre à mesure de phase soit envisageable pour répondre aux besoins habituels d'un suivi d'ouvrages d'art (ordre de grandeur au millimètre). Il convient néanmoins de nuancer ces propos considérant les conditions environnementales de la mesure, la taille du spot laser sur la cible et la portée envisagée qui peuvent entraîner un rejet des mesures de distance face à la tolérance de précision fixée.

## Annexe 4

### **Installation et alignement des capteurs sur le banc d'étalonnage**

Cette annexe précise le processus d'alignement du montage de fixation du capteur au banc d'étalonnage (50 m). Le montage prévoit, comme pour le réglage de l'interféromètre du banc, des libertés de translation et de rotation par le biais d'embases (illustration 1). Considérant la spécialisation du banc d'étalonnage aux tachéomètres et la petite taille du capteur testé, un système de rallonge (avec une embase et des tiges) est utilisé pour surélever le capteur. Sur le support, le capteur est supposé suivre un centrage forcé grâce à deux clampes de contraintes qui soumettent le capteur dans une direction et grâce aux deux clampes de fixation qui permettent, en les dévissant, de changer de capteur. Si l'étude a montré qu'il était nécessaire de réaligner le capteur au banc quand le capteur change, nous pourrions supposer soit un défaut de centrage du montage, soit un défaut de perpendicularité ou une variabilité de position des composants entre plusieurs capteurs. Le support (plaque noire) est réputé calé à partir des vis calantes des embases inférieures (vérification par niveau à bulle torique).

Une cible blanche est utilisée car elle représente un bon compromis entre simplicité de mise en œuvre, similarité avec des cibles pouvant être installées sur le terrain (pas de prisme) et atteinte de cible à longue portée. Il s'agit d'une cible cartonnée collée à un système emboîté sur le chariot interférométrique (illustration 1).

Ainsi, nous réglons la hauteur du montage et calons le support, puis, pour chaque capteur, nous contraignons le boîtier grâce aux clampes de contraintes et le fixons par le vissage des clampes de fixations. Nous ajustons avec les embases rotation et de translation le capteur de façon à ce qu'à courte portée, le spot soit aligné par rapport banc (nous utilisons comme référence d'alignement un tachéomètre positionné sur la console proche de la porte d'entrée du laboratoire qui vise la console fixée derrière l'inclinomètre avec une sphère de pointé). Nous accolons un morceau de papier sur la cible à très courte portée et pointons d'une marque l'emprise du spot laser. Nous déplaçons le chariot à longue portée au niveau de l'interféromètre et réglons les embases de rotation et de translation pour que le spot laser soit centré sur la marque (au vu de la taille du spot laser à 50 m de l'ordre de 3x5 cm, nous supposons que le centre de la tâche hors interférence représente la cible réellement visée). Nous déplaçons le chariot vers le capteur et procédons, au besoin, aux



réglages de rotation et de translation si le spot laser s'écarte de la marque. La même manipulation est réalisée côté interféromètre.

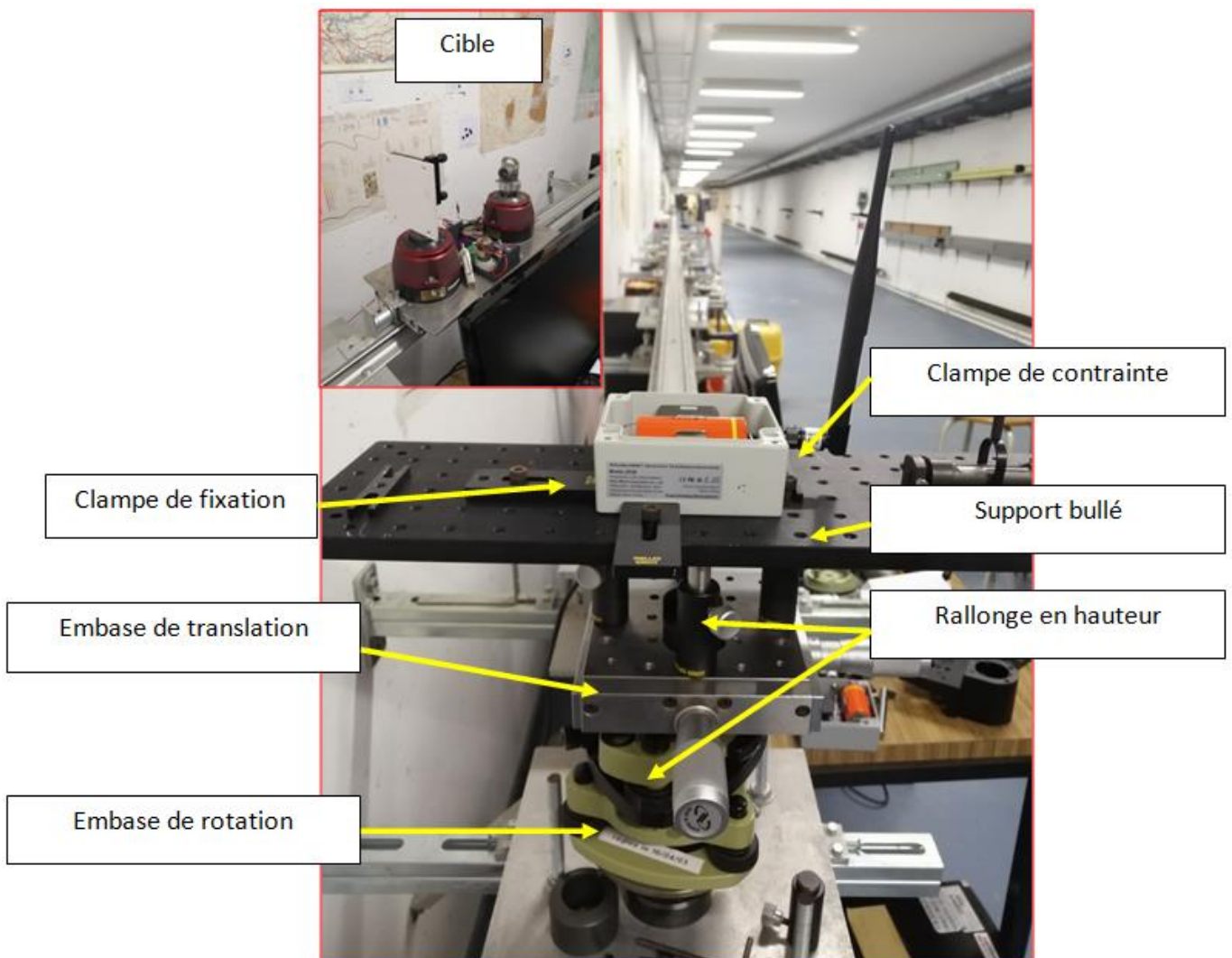


Illustration 1: Illustration personnelle annotée du dispositif du système {capteur-cible}.



## Liste des figures

Figure 1 : Schéma d'un réseau IoT, site web <i>Monnit</i> consulté le 17/02/23. ....	9
Figure 2 : Spécificités des réseaux de communication, <i>site web Mkorola</i> consulté le 17/02/23....	10
Figure 3 : Schématisation de l'installation des capteurs et des grandeurs étudiées sur la cathédrale (Illustrations de <i>123RF</i> [Colonne], <i>Techno-Science</i> [Cathédrale vue d'étage], <i>Lycée Gatti de Gamond</i> [Voûte], <i>Veneziano et al., (2013)</i> [Coupe transversale cathédrale]). ....	13
Figure 4 : Capture d'écran du principe de fonctionnement d'un inclinomètre MEMs, <i>Posital</i> . ....	15
Figure 5 : Système d'étalonnage par laser, <i>Yu et al. (2009)</i> . ....	18
Figure 6 : Installation de l'expérience A sur la terrasse de l'ESGT, <i>illustration personnelle annotée</i> . .....	19
Figure 7 : Ecarts des inclinaisons brutes à des données corrigées (température interne). ....	21
Figure 8 : Différence d'inclinaisons entre des données corrigées par des températures MAN2 ou des températures internes au boîtier. ....	22
Figure 9 : Comparaison des données d'inclinaisons corrigées aux données brutes pour l'axe Y du capteur 147. ....	22
Figure 10 : Indicateur de répétabilité : écart type des 10 mesures répétées en fonction de la distance mesurée. ....	29
Figure 11 : Variations des distances pour différentes portées (expériences A et B). ....	30
Figure 12 : Comparaison des distances à 33 m (brutes, corrigées par MAN2 et par une température interne). ....	31
Figure 13 : Schéma de positionnement des axes d'inclinaison autour du distancemètre, <i>WISEN</i> . ...	35
Figure 14 : Indicateur de déplacement du laser selon l'axe Y. ....	36
Figure 15 : Installation du capteur pour un suivi de déplacement vertical, <i>Wierzbicki et al. (2022)</i> . "HUP" étant le capteur de distance. ....	36

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Convergences calculées par la méthode manuelle et par calcul <i>WISEN</i> à la date 10/06/2023.....	14
Tableau 2 : Récapitulatif du rapport [(Précision.Praticité) / Prix] des différents types d'inclinomètres réalisé à partir de l'annexe 1 ("+" étant un aspect satisfaisant et "-" un indice moins satisfaisant). .....	16
Tableau 3 : Corrélations de la distance et des inclinaisons selon trois axes (X, Y et Z) par rapport aux paramètres météo. ....	21
Tableau 4 : Rapport [(Précision.Portée)/Prix] de différents distancemètres du marché. ("-" étant un critère moins satisfaisant et "+" un critère plus satisfaisant). ....	24
Tableau 5 : Paramètres calculés par moindres carrés. ....	28

## Utilisation des capteurs connectés (IoT) dans un système d'auscultation

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Spécialité Géomètre et Topographe, Le Mans 2023

---

### RÉSUMÉ

Les capteurs géotechniques connectés (IoT) sont de plus en plus demandés pour des applications en auscultation d'ouvrages d'art. Les documentations techniques des instruments n'étant pas toujours complètes, il a été convenu de réaliser différents tests pour qualifier les performances réelles d'inclinomètre et de distancemètre laser au regard des exigences de chantier : étalonnage, répétabilité, dérive atmosphérique, portée, rugosité de cible, etc.

Les expériences ont montré que la perturbation introduite par la température nécessite une correction des inclinaisons. Toutefois, la compensation proposée par le constructeur n'est pas toujours adaptée pour éliminer l'influence de la température. Pour les distances, l'étude a soulevé un impact non négligeable des paramètres atmosphériques pour des distances croissantes, mais dont les formules de compensation atmosphérique (de type Barrel & Sears) ne suffisent pas pour rectifier ce systématisme de mesure.

Bien que ces capteurs présentent certaines limites dans ce qu'avancent les notices techniques, ils restent une solution low cost, fiable et adaptée au suivi d'ouvrages d'art à courte portée.

**Mots clés : IoT, Capteur, Low cost, MEMs, Inclinomètre, Distancemètre, Laser, Auscultation.**

---

### SUMMARY

Connected geotechnical sensors (IoT) are increasingly in demand for engineering structures monitoring applications. As the technical specifications for these instruments is not always complete, it was agreed to carry out various tests to qualify the actual performance of tiltmeters and laser rangefinders in relation to site requirements : calibration, repeatability, atmospheric drift, range, target roughness, etc.

Experiments have shown that the disturbance introduced by the temperature requires inclination correction. However, the compensation proposed by the manufacturer is not always suitable for eliminating the influence of temperature. For distances, the survey revealed a non-negligible impact of atmospheric parameters for increasing distances, but atmospheric compensation formulas (Barrel & Sears) are not sufficient to rectify this measurement systematism.

Although these sensors have certain limitations in its technical documentation, its remain a low cost, reliable and an adapted solution for a short range monitoring of engineering structures.

**Key words : IoT, Sensor, Low cost, MEMs, Tiltmeter, Rangefinder, Laser, Auscultation.**