

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

■ Martial MERCIER

*Les capteurs géotechniques connectés suscitent de nos jours un véritable intérêt pour les professionnels de la mesure. D'une nature variée, on retrouve par exemple des inclinomètres, des fissuromètres ou encore des extensomètres. À la fois pratique dans sa forme (boîtiers compacts), bas coût par rapport à une instrumentation topométrique et autonome dans son fonctionnement (envoi des données), la solution connectée du monitoring d'instrumentation semble, sur le papier, pouvoir satisfaire les exigences d'une surveillance d'ouvrages d'art. Considérant certaines lacunes dans les notices techniques des appareils, cette étude propose de questionner les performances réelles des capteurs IoT de type inclinomètre+distancemètre et leur applicabilité à des missions d'auscultation d'ouvrages d'art.*

## MOTS-CLÉS

Capteur géotechnique, bas coût, IoT, inclinomètre, distance mètre laser, auscultation

## Stratégie IoT

S'agissant de capteurs connectés de type "Internet of Things" (IoT), la stratégie IoT s'articule autour de la transmission des mesures entre trois organes : le nœud d'acquisition (capteurs), le nœud de transmission (choix du réseau de communication) et le nœud de stockage et de visualisation. Les capteurs WISEN proposent plusieurs solutions de communication entre les capteurs et l'antenne (figure 1). Tout d'abord, la topologie en étoile permet à chaque capteur l'envoi direct de ses données à la passerelle réseau. 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, 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 place-

## Contexte de l'étude

La société SOTEC PLANS intervient sur des missions de surveillance d'ouvrages d'art fortement contraintes (peu de visibilité, discrétion de l'appareillage, préservation du site). Dans des conditions où l'utilisation des tachéomètres à demeure n'est pas propice, l'entreprise recourt à une solution géotechnique WISEN<sup>1</sup> composée de capteurs IoT inclinomètre+distancemètre. Pourtant, la documentation technique de l'appareil présente certains manques quant aux caractéristiques détaillées de l'appareil (dérive thermique, par exemple). Avec l'enjeu de déterminer finement les performances et les limites

d'un tel capteur dans un environnement contrôlé, différents tests ont pu être pensés et mis en œuvre au sein du laboratoire Géomatique et Foncier (GeF) de l'ESGT, au Mans.

## Définition des capteurs connectés

### Caractéristiques

L'étude porte sur des capteurs intelligents qui disposent d'un thermomètre interne intégré au boîtier. La précision annoncée sur les mesures de distance laser est de 1 mm pour une portée maximale de 100 m. Les mesures inclinométriques sont fournies suivant trois axes (X, Y et Z) avec une précision de l'ordre de 0,01° sur la plage [-90°;+90°].

<sup>1</sup><https://www.wissen.com/about-us/company>



Figure 1. Schéma d'un réseau IoT dédié aux capteurs testés.



ment 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.

## ■ Besoin et applications

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, leur utilisation est cohérente avec ce type de mission.

Les mesures relatives issues du capteur d'inclinaison permettent le suivi des convergences (de voûtes notamment), des flexions, des déplacements ou tassements d'un objet ainsi que des déviations d'axes. Quant aux mesures de distance laser, le capteur de distance prévoit l'étude de déplacements ou de tassements. De ce fait, leur emploi est fréquent dans l'environnement de la métrologie industrielle, du ferroviaire, des ponts, des barrages, du "Structural Health Monitoring" (santé structurelle des bâtiments) ou encore pour des glissements de terrain.

## Suivi par inclinométrie

### ■ Principe de mesure

Les capteurs d'inclinaisons trois axes testés sont des technologies "Micro Electro Mechanic system" (MEMs). Parmi les types d'inclinomètres sur le marché (hydrostatique, pendule asservi) les capteurs MEMs se distinguent, dans leur aspect bas coût et dans leur praticité d'utilisation (composants miniaturisés).

L'inclinomètre MEMs suit le même principe de mesure qu'un accéléromètre. Il s'agit d'un bloc d'électrodes mobiles soutenu par un système de ressorts autour d'électrodes fixes. Lors d'un mouvement du capteur selon une position de référence (supposée être à l'horizontale sur la figure 2), le bloc d'électrodes mobiles se déplace le long d'un axe de référence en entraînant

une variation de la capacité électrique entre les électrodes mobiles et fixes. De cette variation est traduite une information via une tension pour déduire une inclinaison à partir de ce "signal utile" (Juillard, 2020).

Le nombre d'axes perpendiculaires d'un inclinomètre peut avoir un impact sur le suivi. Tandis qu'un inclinomètre biaxial permet des mesures plus complètes dans la surveillance de surfaces (Erol, 2010), le troisième axe (Z) d'un inclinomètre reste peu utilisé à l'heure actuelle.

### ■ Erreurs de mesure

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. Tout comme chaque appareil de mesure, les inclinaisons des capteurs sont impactées par des erreurs systématiques liées à la non-perfectibilité des instruments ainsi qu'à d'autres erreurs dites accidentelles (Simeoni et al., 2003). Parmi les erreurs systématiques, nous pouvons, entre autres, mettre en avant une erreur de sensibilité des axes du capteur, un défaut de perpendicularité des composants du boîtier ou encore un bruit interne dû à l'électronique. Par ailleurs, 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 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%. Finalement, nous retiendrons que pour un inclinomètre MEMs, c'est la température qui représente le facteur d'influence induisant l'erreur systématique prédominante (Juillard, 2020).

Une compensation thermique des inclinaisons est proposée par le constructeur selon certains critères (corrélation des mesures à la température, variation minimale de température). Pourtant, il ne s'agit là que 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.

De ce fait, cela pose, a priori, 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.

Si la littérature considère des étalonnages classiques d'inclinomètres difficilement reproductibles 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.

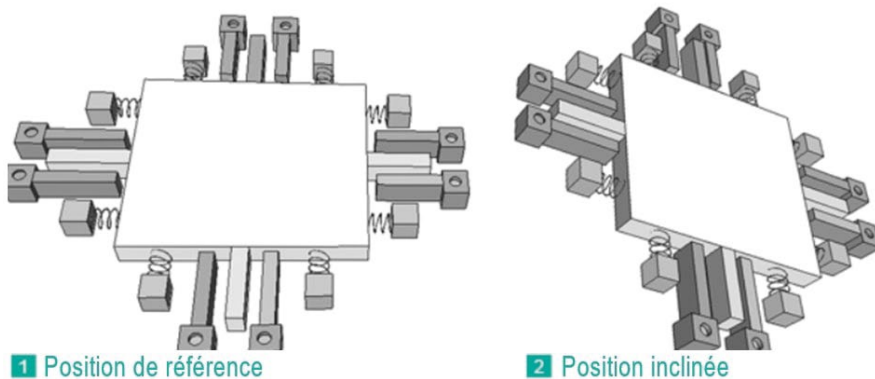


Figure 2. Fonctionnement d'un capteur d'inclinaison MEMs, Posital.



Figure 3. Installation du système autonome sur la terrasse de l'ESGT.

### ■ Mise à l'épreuve de l'inclinomètre MEMS

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 ces inclinomètres.

L'expérience (figure 3) a pour objectif d'étudier l'impact réel de la dérive en température des mesures d'inclinaison de deux capteurs triaxiaux. 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) 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 quatre jours. L'installation est alimentée par secteur et isolée de l'humidité grâce à une valise (figure 3). Par ailleurs, les données de la sonde météorologique MAN 2 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 quatre jours a pu atteindre plusieurs dizaines de degrés Celsius avec l'inertie thermique du capteur (jusqu'à 18° C, pour l'exemple). Les inclinaisons ont été corrigées selon le protocole fourni par le constructeur avec d'une part, les inclinaisons corrigées, de la température extérieure et d'autre part, les inclinaisons corrigées, de la température interne (thermomètre du boîtier).

La figure 4 permet de comparer les données d'inclinaisons corrigées des deux types de température avec les données brutes et d'analyser la corrélation de ces températures avec les variations des mesures d'inclinaison sur un échantillon représentatif de l'expérience (axe Y du capteur 147).

Premièrement, nous remarquons des amplitudes en variation des inclinaisons importantes pour des mesures brutes, notamment la journée entre 10 h et 22 h de l'ordre de 0,20°. Les coefficients de corrélation calculés à partir de la figure 4 montrent que les mesures d'inclinaison sont largement corrélées à la température (> 60 %). La dérive thermique en journée nécessite donc une correction pour respecter les exigences d'une mission de surveillance.

Cependant, d'après un calcul de corrélation, la température interne est mieux corrélée aux variations d'inclinaisons (98 %) que la température externe (74 %). De plus, d'après la figure 4, en journée (de 10 h à 22 h), l'amplitude des variations des inclinaisons corrigées via les données de température extérieure (MAN2) reste assez importante, autour de 0,10°, comparée aux inclinaisons corrigées par le thermomètre interne, pour le cas de l'axe Y du capteur 147 autour de 0,05°. Donc, le capteur inclinométrique est influencé par la température de son électronique qu'il convient de corriger.

Finalement, malgré les limites soulevées par l'emploi de la compensation constructeur, la correction des inclinaisons est efficace puisqu'elle permet de réduire l'amplitude de variation des inclinaisons brutes d'un ordre de grandeur équivalent à celui de la dérive thermique introduite (correction par température interne) autour de 0,20° pour l'axe Y. Néanmoins, certains résidus non tolérables, la journée, autour de 0,05° en amplitude de variation sont notables, mais pourraient relever, non pas de la correction appliquée mais de la dilatation thermique des matériaux (non prise en compte).

### Auscultation par distancemètre laser

#### ■ Principe de mesure

Vraisemblablement, le principe de mesure des distances par déphasage sur une onde modulée est utilisé (absence d'information claire), comme pour les distancemètres électroniques

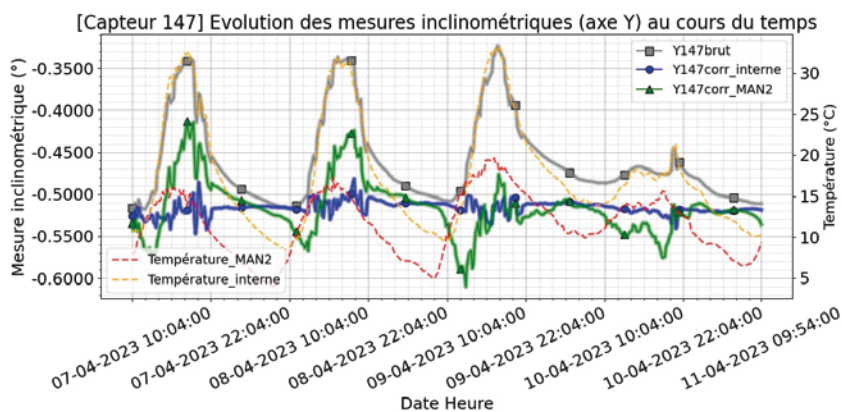


Figure 4. Comparaison des données d'inclinaisons corrigées aux données brutes pour l'axe Y du capteur 147.



des stations totales modernes. D'après notre étude, d'autres types de distancemètre sont présents sur le marché (acoustique, temps de vol), mais disposent de caractéristiques moins pertinentes (pour les besoins d'une surveillance d'ouvrages d'art) que celles d'un capteur à mesure de phase, notamment en termes de coût, de précision et de portée.

## ■ Erreurs de mesure

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), la constante d'addition du système {centre du capteur-centre de phase} (EST-FBS). Il conviendra donc d'évaluer, grâce aux expériences menées, l'ordre de grandeur de chacune de ces erreurs systématiques. 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 pour des portées importantes (EST-FBS). 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<sup>2</sup>. Cependant, le constructeur met 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.

## ■ Qualification des performances réelles

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

<sup>2</sup> [https://iag.dgfi.tum.de/media/archives/Travaux\\_99/wp51.htm](https://iag.dgfi.tum.de/media/archives/Travaux_99/wp51.htm)

ISO 16331-1<sup>3</sup> relative aux performances des distancemètres laser. Ainsi, une série de tests a été menée 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.

## Étalonnage de distancemètre 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 cartonée) 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 à partir d'embases de rotation et de translation (*figure 5*), la méthode d'étalonnage consiste en l'acquisition simultanée des distances du capteur et des distances de l'interfé-

<sup>3</sup> <https://www.iso.org/fr/standard/65622.html> ?



Figure 5. Dispositif de centrage du distancemètre.

romètre (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.

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 (développement à l'ordre 1) aux capteurs WISEN selon le protocole d'étalonnage utilisé pour déterminer les erreurs systématiques : la constante d'addition, l'erreur proportionnelle et les deux composantes de l'erreur cyclique.

À partir des observations simultanées des distances acquises par le capteur, des distances de l'interféromètre, d'une estimation par laser tracker de la distance de rattachement entre le zéro du capteur et le centre de la cible, ainsi que de la longueur d'onde de modulation du capteur, nous pouvons estimer les erreurs systématiques (constante d'addition, erreur proportionnelle et cyclique).

Par convention, la distance de rattachement est établie entre le centre de la cible et un point de la carcasse extérieure du boîtier. Bien que cela introduise un biais dans la détermination de la constante d'addition du fait de la position réelle du zéro du distancemètre, cela permettra à l'avenir de reproduire plus facilement l'étalonnage d'un même type de capteur.

Le pas de mesure utilisé est d'environ 30 cm (par comparaison avec le pas habituel utilisé pour étalonner des tachéomètres). La connaissance



(*a posteriori* de l'expérience) de la longueur d'onde de modulation du capteur vient questionner le pas de mesure trop important employé pour modéliser correctement l'erreur cyclique.

En l'absence de formule Barrel & Sears applicable pour le capteur, seules les distances interférométriques ont pu être corrigées des paramètres météo. Après un traitement par la méthode des moindres carrés en vue d'une validation individuelle des résidus normés (95 %), nous pouvons avancer en moyenne (sur les deux capteurs testés) une erreur proportionnelle des capteurs 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]. Le faible écart entre les paramètres estimés des deux capteurs souligne une invariabilité entre eux. 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 une droite de régression linéaire pour chaque capteur. 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.

## Impact des paramètres météorologiques sur les distances du capteur

Afin d'étudier l'influence de la température sur le capteur de distance, une deuxième expérience a été réalisée

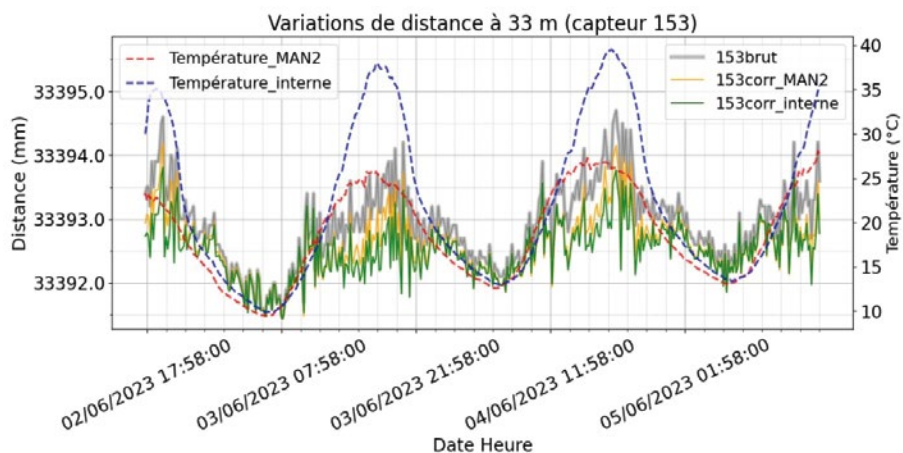


Figure 6. Comparaison des données d'inclinaisons corrigées aux données brutes pour l'axe Y du capteur 147.

dans la même configuration que celle de la figure 3 avec une visée sur une cible blanche à 4, 10 et 33 m.

La figure 6 quantifie la variation des mesures de distance au cours du temps (par rapport à la moyenne de distance sur la période de trois jours envisagée). Nous pouvons observer un motif périodique récurrent sur la période journalière, entre 6 h et 22 h, qui suit le changement de température. En termes d'amplitude de variation des distances brutes, la perturbation introduite par la température est de 2,5 mm à 33 m pour cette période de trois jours avec des températures extérieures variant de 10 à 29° C.

D'après un calcul de corrélation, les mesures à courtes distances (jusqu'à 10 m) sont faiblement corrélées à la température extérieure (coefficients inférieurs à 10 %) à l'inverse des longues distances pour lesquelles il est observable de bonnes corrélations supérieures à 60 %. 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 Barrel & Sears d'un distancemètre de tachéomètre (LEICA TPS1100) aux caractéristiques laser équivalentes.

Il est nécessaire de s'interroger sur la donnée météorologique qui va servir à la compensation (température extérieure ou thermomètre du boîtier). Les deux corrections ont été comparées avec l'hypothèse, pour le thermomètre interne, d'une pression et d'une humidité égales à celles de MAN2 (sonde extérieure). L'étude de la figure 6 permet la comparaison qualitative des deux types de correction. Il en ressort une similarité des deux courbes de correction et un impact sur la donnée brute de l'ordre du dixième de millimètre. Cela 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.

En revanche, 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 ses composants électroniques), la température externe 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 proposée par Leica Geosystems a été remis en question par l'emploi d'autres formules Barrel & Sears, issues d'autres constructeurs de tachéomètres, 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.

Donc, nous en concluons 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).

## Perspectives

Concernant l'inclinomètre, un étalonnage du capteur est proposé en fonction d'une variation de température. Ces coefficients d'étalonnage serviraient à corriger, de la température, les mesures inclinométriques 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. 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.

## Conclusion

Les capteurs géotechniques connectés représentent une solution *low cost* de suivi d'ouvrages d'art "clé en main". Ce travail a donné la possibilité de préciser les performances réelles de ces capteurs

au regard de la documentation technique de l'appareillage qui n'est pas toujours très complète.

L'étude a montré que les inclinomètres MEMs testés requièrent une compensation thermique (pour la période de quatre 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. L'étalonnage *in situ* proposé par le fournisseur permet d'éliminer ce phénomène vers des données d'inclinaisons conformes, 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.

Des capteurs de distance ont été étalonnés et les résultats questionnent la précision avancée dans la documentation qui mériterait une correction selon les portées envisagées. 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 10 à 29° C, au-delà de 10 mètres, les mesures justifient d'un besoin de correction thermique au vu de la précision attendue. L'utilisation des formules correctives n'est pas suffisante 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 de portée.

Finalement, ces capteurs connectés restent adaptés pour des missions de surveillance d'ouvrages d'art à courte portée. ●

## Contacts

Martial MERCIER

Ingénieur géomètre-topographe ESGT  
mmartialmercier@gmail.com

## Bibliographie

- ÉCOLE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE FKIH BEN SALAH (EST-FBS). (2020). *Mesures de distance*.
- EROL B. (2010). *Evaluation of High-Precision Sensors in Structural Monitoring*, Sensors, Volume 10 n°12. pp. 10803-10827. JUILLARD J. (2020). Sensors & MEMs.
- LI Y. et al. (2021). *Optimal Sensor Placement for Underground Tunnel Monitoring via Wireless Sensor Networks*. Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 2021 n°6621987.
- LIU G. et al. (2015). *Robust optimisation of a Mems Accelerometer considering temperature variations*. Sensors. Volume 15 n°3. pp. 6342-6359.
- SIMEONI L. al. (2003). *Analysis And Prediction of Slow Landslide Evolutions By Using Automatic Displacement Monitoring Systems*. ISRM Congress.

## ABSTRACT

**key words:** Geotechnical sensor, Low cost, IoT, MEMs, Tiltmeter, Rangefinder, Laser, Auscultation

*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.*