

# Surveillance d'un ouvrage d'art en béton par un réseau de capteurs GPS

Nicolas Manzini<sup>1,2</sup>, André Orcesi<sup>2</sup>, Christian Thom<sup>3</sup>, Marc-Antoine Brossault<sup>4</sup>, Serge Botton<sup>5</sup>, Miguel Ortiz<sup>6</sup>, John Dumoulin<sup>7</sup>

<sup>1</sup> SITES, 95-97 Avenue Victor Hugo, 92500 Rueil-Malmaison - France

<sup>2</sup> MAST-EMGCU, Université Gustave Eiffel, 14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne, F-77454 Marne la Vallée - France

<sup>3</sup> LaSTIG, IGN, Université Gustave Eiffel, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé CEDEX - France

<sup>4</sup> SITES, 5 Route du Perollier, 69570 Dardilly - France

<sup>5</sup> ENSG, IGN, Université Gustave Eiffel, Cité Descartes, 6-8 avenue Blaise Pascal, Champs-sur-Marne, F-77447 Marne-la-Vallée CEDEX - France

<sup>6</sup> AME-GEOLOC, Université Gustave Eiffel, Allée des Ponts et Chaussées, CS 5004, 44344 Bouguenais Cedex - France

<sup>7</sup> Cerema DTerSO, 24 rue Carton, CS 41635, 33073 Bordeaux CEDEX - France

**RESUME** Le Global Positioning System (GPS) est une constellation de satellites permettant le positionnement pratiquement n'importe où à la surface du globe. L'une des caractéristiques clés du positionnement par satellites est l'absence de dérive au cours du temps, permettant le suivi de déplacements lents à long terme. Durant la dernière décennie, différentes évolutions ont été apportées sur les méthodes de traitement (calcul en temps réel, calcul en réseau) ainsi que sur le matériel GPS (récepteurs et antennes). Grâce à ces évolutions, il est désormais possible d'obtenir une précision infra-centimétrique avec un matériel modeste et peu coûteux, permettant d'envisager son utilisation dans des applications de surveillance structurale. Les ouvrages d'art sont des éléments clés des réseaux de communication et de l'aménagement du territoire. Le vieillissement global du parc mondial augmente le nombre d'ouvrages suivis par instrumentation. Les techniques d'instrumentation traditionnelles reposent souvent sur des mesures locales et relatives, rendant difficile le suivi à long terme des ouvrages de grandes dimensions. Dans ce contexte, les systèmes de positionnement par satellites apparaissent comme complémentaires à ces techniques. Cet article présente l'instrumentation du pont de Brotonne, pont à haubans en béton précontraint situé en France, à l'aide d'un réseau de capteurs Geocube, des stations GPS intelligentes développées par l'IGN et Ophelia Sensors. Les séries temporelles GPS d'éléments caractéristiques de l'ouvrage sont comparées et corrélées avec des mesures de température acquises dans l'ouvrage. Cette étude illustre le potentiel de tels capteurs pour les applications de surveillance structurale de grands ouvrages en béton.

**Mots-clefs** GPS, Surveillance, Pont, SHM

## I. UTILISATION DU GPS POUR LA SURVEILLANCE D'OUVRAGES

Le GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement accessible publiquement pratiquement n'importe où sur le globe. Le positionnement GPS relatif, qui utilise des mesures sur la phase des signaux GPS et exploite les données d'une station de base fixe à proximité de la station de mesure, permet d'atteindre une précision infracentimétrique selon les conditions d'observation et le matériel utilisé. Cette précision, couplée aux caractéristiques clés du GPS (positionnement référencé, absence de dérive, synchronisation native), fait du positionnement par GPS une technique pertinente pour compléter les applications en génie civil. Depuis vingt ans les techniques GPS font l'objet d'un intérêt croissant pour les applications de surveillance des ponts (Yi et al., 2010) ou des structures de grande hauteur (Yi et al., 2013). Cependant, une majorité de ces travaux repose sur l'utilisation de solutions commerciales coûteuses (jusqu'à 20 000€ par station), limitant leur déploiement en scénarios opérationnels. Dans ce contexte, un intérêt récent a été porté aux solutions GPS à bas coût, dont la précision inférieure peut en partie être compensée par l'utilisation de calculs avec des paramètres adaptés (Manzini et al., 2018). La perspective de pouvoir déployer plus facilement des réseaux de capteurs GPS pour de la surveillance appelle à en valider les performances sur ouvrage.

## II. PRESENTATION DE L'INSTRUMENTATION DU PONT DE BROTONNE

Le pont de Brotonne (Seine-Maritime) est un pont à haubans en béton de 1280m de long. L'ouvrage est équipé par l'IGN depuis mai 2017 d'un réseau de 12 capteurs Geocube (Fig. 1), des stations GPS à bas coût (Benoit et al., 2014), installés sur des points stratégiques : sommets des pylônes (P1, P2), milieu de la travée centrale (S), et joints du viaduc d'accès (J1, J2). Le Geocube est un capteur intelligent, intégrant une station GPS et des modules de contrôle et de communication, permettant à la station de fonctionner automatiquement en réseau maillé sans fil. Les coûts du Geocube sont faibles grâce à l'utilisation de récepteur GPS monofréquence et d'antennes GPS de petite taille.

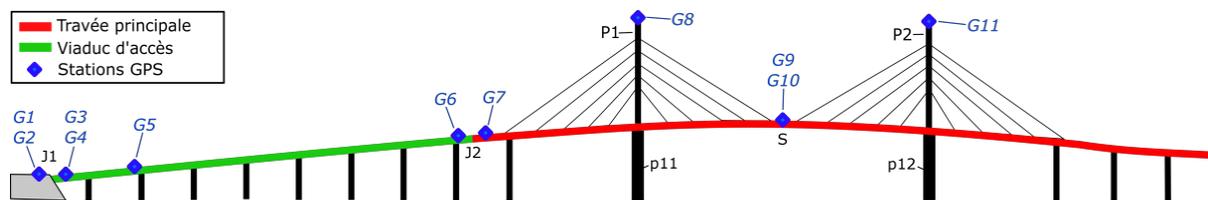


FIGURE 1. Emplacement des stations Geocube sur le pont de Brotonne

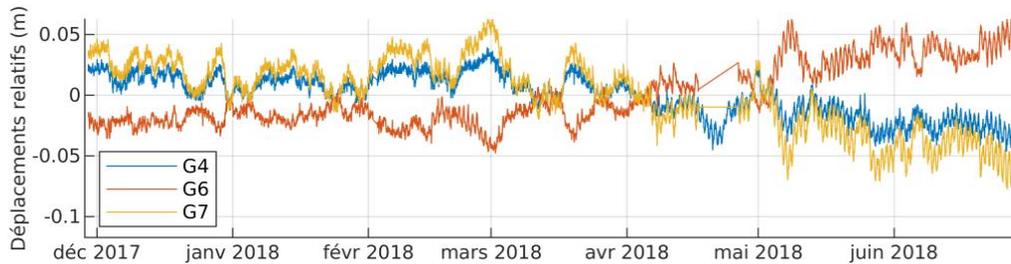
Le positionnement est effectué en temps réel en calcul relatif à l'aide d'un Géocube de référence fixe situé à proximité de l'ouvrage, avec un échantillonnage de 30 secondes. Des sondes de températures ont été insérées dans le béton des piles p11 et p12 depuis leurs faces extérieures et intérieures.

## III. DONNEES ACQUISES SUR LE PONT DE BROTONNE

Afin de valider les données acquises par les GPS déployés, ce paragraphe présente une brève analyse des séries temporelles GPS par sections du pont. Les séries GPS ont été transposées dans un référentiel local aligné avec le pont, et ont été lissées par un filtre en moyenne glissante d'une heure.

### A. Dilatation du tablier

Afin d'observer la dilatation thermique du tablier, les déplacements longitudinaux relatifs enregistrés par les capteurs situés sur le viaduc d'accès et le tablier principal à proximité des joints J1 (capteur G4, G3 a été ignoré en raison d'une panne lors de l'exploitation) et J2 (G6 et G7) sont représentés dans la Fig. 2.

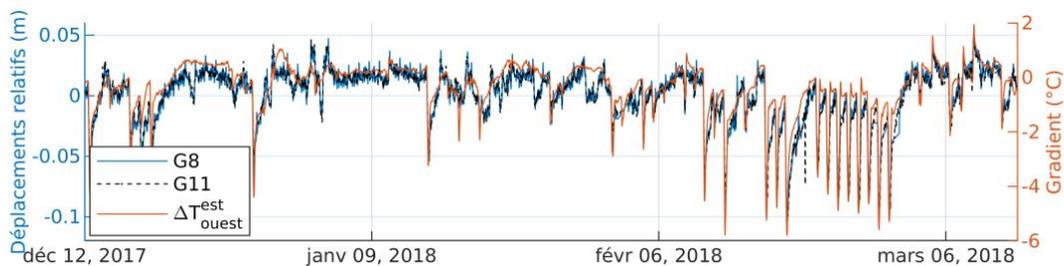


**FIGURE 2.** Déplacements longitudinaux observés sur le tablier

Les déplacements longitudinaux observés par ces capteurs sont très fortement corrélés ou anti-corrélés. Pour vérifier l'origine thermique de ces déplacements, le coefficient de corrélation de Pearson  $C_p$  est calculé pour chaque série avec la température  $T_p^{moy}$ , moyenne des températures mesurées par l'ensemble des sondes situées dans les piles et supposée représentative de la température moyenne dans l'ouvrage. Les séries des capteurs G4, G6 et G7 présentent des coefficients respectifs  $C_p$  de -0.88, 0.91 et -0.92, confirmant que les déplacements observés sont bien dus à la dilatation thermique du tablier.

### B. Déplacements des pylônes

Les déplacements longitudinaux des capteurs situés aux sommets des pylônes (G8, G11) sont symétriques et ont un profil saisonnier similaire à  $T_p^{moy}$ . Les déplacements transversaux sont identiques entre les deux capteurs, et sont comparés au gradient thermique  $\Delta T_{ouest}^{est}$ , calculé à partir des sondes situées sur les faces est et ouest des piles dans la Fig. 3. Les corrélations (respectivement 0.91 et 0.90 pour G8 et G11) confirment la capacité des GPS à suivre les mouvements liés à la dilatation globale, et ceux liés à la présence de gradients locaux dans les pylônes.



**FIGURE 3.** Déplacements transversaux relatifs observés sur les pylônes

### C. Déplacements de la travée centrale

Les déplacements enregistrés par les capteurs au centre de la travée principale (G9, G10) sont essentiellement verticaux, quasi-identiques entre les deux capteurs. Ces déplacements ne peuvent pas être directement reliés à des températures mesurées par les sondes où à des températures calculées précédemment. Pour ce type d'ouvrage, les déplacements verticaux du tablier sont

principalement imputables à l'apparition de gradients thermiques verticaux dans celui-ci. En l'absence de données disponibles dans le tablier, le gradient  $\Delta T_{ext}^{int}$  est calculé à partir de l'instrumentation des piles comme la différence entre la moyenne des sondes situées à l'intérieur des piles et la moyenne de celles situées à l'extérieur. Ce gradient a pour objectif d'être représentatif de l'inertie thermique globale de l'ouvrage, et donc des gradients pouvant apparaître dans le tablier. Les déplacements verticaux enregistrés par les capteurs G9 et G10 ont des coefficients  $C_p$  avec  $\Delta T_{ext}^{int}$  de 0.69 et 0.70, respectivement, confirmant le rôle des gradients dans le tablier.

#### IV. CONCLUSIONS

Les séries temporelles acquises sur différents éléments clés de l'ouvrage (pylônes, tablier, joints) par les capteurs GPS déployés ont pu être reliées avec le comportement attendu de l'ouvrage et corrélées avec des températures caractéristiques. Les observations confirment la précision et la stabilité suffisantes des capteurs déployés pour suivre la réponse thermomécanique d'ouvrages souples en béton, à la fois pour les phénomènes journaliers comme pour les effets saisonniers. Ces résultats valident ainsi le potentiel des capteurs GPS à bas coût pour les applications de surveillance, avec la perspective de pouvoir encourager et faciliter le déploiement de réseaux GPS pour le suivi d'ouvrages de grandes dimensions. Cela permet également d'envisager des applications de surveillance reposant sur l'étude et le suivi des corrélations et des relations entre les capteurs au cours du temps, à travers notamment l'utilisation de modèles par apprentissage.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier le Département de la Seine-Maritime pour la mise à disposition des données du pont de Brotonne qui ont été utilisées et présentées dans cet article.

#### REFERENCES

- Benoit, L., Briole, P., Martin, O., Thom, C., 2014. Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS. *J. Appl. Geod.* 8, 119-128. <https://doi.org/10.1515/jag-2013-0023>
- Manzini, N., Orcesi, A., Thom, C., Botton, S., Clement, A., Ortiz, M., Dumoulin, J., 2018. Use of low-cost GNSS receivers for Structural Health Monitoring. 40th IABSE Symposium: Tomorrow's Megastructures.
- Yi, T.H., Li, H.-N., Gu, M., 2013. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures. *Struct. Control Heal. Monit.* 20, 649-670.
- Yi, T.H., Li, H.N., Gu, M., 2010. Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring. *Sci. China Technol. Sci.* 53, 2597-2610. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4076-3>