

Récepteurs GNSS bas coût pour la surveillance des grands ponts

■ Nicolas MANZINI - André ORCESI - Christian THOM - Marc-Antoine BROSSAULT - Miguel ORTIZ - Serge BOTTON - John DUMOULIN

L'instrumentation et la télésurveillance des structures, qui visent à suivre en continu et en temps réel l'évolution de leurs comportements, sont aujourd'hui des éléments clés des politiques de gestion des parcs d'ouvrages. Le conseil départemental de la Seine-Maritime (76) a fait appel à l'IGN (Institut national de l'information géographique et forestière) pour instrumenter le pont de Brotonne à l'aide d'un réseau d'une douzaine de stations GNSS "bas coût" Géocube à partir de 2017. L'objectif de cette instrumentation est de compléter le suivi géométrique de l'ouvrage assuré par des relevés topographiques périodiques. Dans le cadre d'un projet de recherche en collaboration entre SITES, l'Université Gustave Eiffel et l'IGN, visant à étudier le potentiel des outils GNSS pour la surveillance de santé structurale des ouvrages d'art, les données acquises sur le pont de Brotonne sur la période 2017-2018 ont été analysées. Dans cet article, nous proposons une étude globale de la qualité des données à travers leur disponibilité, la comparaison aux comportements attendus par parties d'ouvrages et la comparaison avec les données thermiques disponibles.

MOTS-CLÉS

Monitoring, SHM, Surveillance de santé structurale, GNSS

plusieurs objectifs selon le contexte et le régime de surveillance en vigueur : améliorer la connaissance de l'ouvrage et de son comportement, en suivre l'évolution au cours du temps, ou encore déclencher des alertes en cas de risque pour la structure ou ses usagers.

Instrumentation des ponts par GNSS

Selon la nature et le contexte de l'ouvrage suivi, ainsi que la finalité de la surveillance, il existe de nombreuses approches pour la surveillance des ponts. Parmi les plus courantes, on retrouve :

- la surveillance vibratoire, qui repose généralement sur le déploiement d'accéléromètres, de vibromètres, ou encore de réseaux de capteurs à fibre optique pour effectuer une analyse modale du comportement de l'ouvrage ;
- la surveillance acoustique, qui exploite des capteurs d'émissions acoustiques afin de détecter d'éventuelles ruptures de câbles dans les ouvrages ;
- le suivi des déplacements relatifs et déformations des éléments spécifiques d'un ouvrage à l'aide de capteurs comme les LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) extensomètres électriques ou (capteurs) à fibre optique ;
- le suivi géométrique, qui vise à qualifier les mouvements globaux de l'ouvrage.

Pour cette dernière approche, celle-ci repose essentiellement sur des interventions ponctuelles : relevés topométriques, scanners ou photogrammétriques. Il existe néanmoins quelques solutions pouvant être opérées automatiquement, telles que les stations totales robotisées. Le suivi géométrique est généralement réservé aux grands ouvrages, où le suivi des

Principes et enjeux de la surveillance des ponts

Les ponts sont des éléments clés des réseaux de communication, aussi bien routiers, ferroviaires et maritimes, dont la bonne exploitation implique des enjeux économiques, sociétaux et de sécurité. Le cumul de deux facteurs, le vieillissement global des parcs d'ouvrages et l'augmentation du nombre d'usagers entraînent une augmentation du nombre d'ouvrages nécessitant des opérations de maintenance. En France, le rapport d'information sénatorial de 2019 sur l'état des ponts (Maurey et al., 2019) note que de nombreux ouvrages nécessitaient des réparations à court ou moyen terme – environ 10 % des 250 000 ponts français – et appelle à l'application de politiques de gestion adaptées.

En France, il existe plusieurs guides et référentiels pour la gestion des parcs d'ouvrages. Parmi ceux-ci, l'Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art (ITSEOA), qui fait référence pour les grands ouvrages, préconise entre autres un ensemble d'actions pour la surveillance des

grands ponts. La surveillance regroupe l'ensemble des contrôles et examens permettant de suivre et quantifier l'état d'un ouvrage et permet de faire des recommandations de maintenance. L'ITSEOA définit plusieurs régimes de surveillance : le régime normal dans lequel la surveillance repose sur des interventions périodiques ou ponctuelles à la suite d'événements particuliers, mais également des régimes spéciaux comme la surveillance renforcée ou haute surveillance. C'est dans le cadre de ces régimes spéciaux qu'interviennent le plus fréquemment l'instrumentation et la télésurveillance, bien que par de rares occasions, ces démarches sont également mises en œuvre sur des ouvrages neufs.

L'instrumentation consiste à déployer sur les éléments caractéristiques d'un ouvrage des capteurs collectant automatiquement des données de natures variées. Aujourd'hui, l'instrumentation est généralement combinée à la télésurveillance, qui consiste à récupérer automatiquement les données de l'instrumentation et à les exploiter à distance. L'instrumentation peut avoir



déplacements relatifs et des déformations locales n'est pas suffisant pour en qualifier le comportement. Ce suivi s'appuie essentiellement sur la détection de tendances, de valeurs extrêmes et sur la comparaison à un modèle de référence de l'ouvrage.

Dans ce contexte, les GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), qui constituent une solution de positionnement précis et référencé en 3D, sans dérive électronique au cours du temps, et qui sont capables de fournir des séries temporelles denses, apparaissent comme des outils complémentaires aux techniques de surveillance géométrique traditionnelles. La précision centimétrique, voire infracentimétrique, des solutions commerciales actuelles est compatible avec les mouvements caractéristiques des grands ouvrages souples.

La surveillance des grands ponts fait partie des premières apparitions des GNSS (ou en l'occurrence, du GPS seul à l'époque) dans des applications de génie civil, dès la fin des années 90 (Ashkenazi & Roberts, 1997). Si les premières études constatent le potentiel de cette technique, elles notent des limites opérationnelles liées au déploiement du matériel (visibilité du ciel, présence d'obstacles, vibrations) et à la précision du calcul. Avec des évolutions constantes aussi bien au niveau des satellites en service, des stations déployées ou des méthodes de traitement, les solutions commerciales "clés en main" sont devenues de plus en plus attractives pour les acteurs de la surveillance. De nombreuses études ont validé les performances des GNSS aussi bien pour le suivi statique comme dynamique des grands ponts (Yi et al., 2010). Cependant, il ressort que la quasi-totalité de ces travaux portent sur l'utilisation d'un matériel haut de gamme, avec des performances de pointe, mais dont le coût peut s'avérer rédhibitoire pour les gestionnaires lors du déploiement de plusieurs capteurs sur un ouvrage. Les solutions GNSS bas coût rencontrent un intérêt croissant dans des domaines comme la géotechnique (Benoit et al., 2014) et leurs performances permettent d'envisager des applications pour le suivi statique des grands ouvrages de génie civil.



Figure 1. Pont de Brotonne.

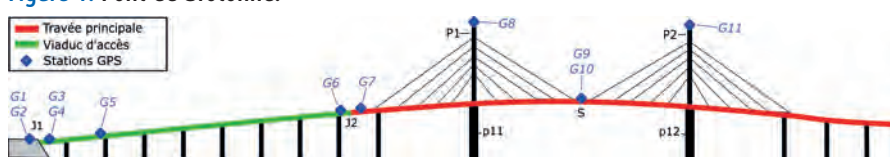


Figure 2. Plan d'installation des capteurs sur le pont de Brotonne.

Cas d'étude : le suivi géométrique du pont de Brotonne

■ Présentation de l'ouvrage

Le pont de Brotonne (Brault & Mathivat, 1976) est un pont à haubans en béton précontraint, dont la construction s'est achevée en 1977 après quatre ans de travaux et qui franchit la Seine pour relier Le Havre à Rouen (figure 1). Ses dimensions (longueur totale de l'ouvrage est 1 278 m, travée centrale de 320 m, pylônes de 125 m de haut) couplées aux méthodes de constructions innovantes déployées à l'époque (assemblage des voussoirs par encorbellement) en font un ouvrage exceptionnel, aussi parfois qualifié de prototype. Le pont de Brotonne est un élément clé de l'activité de la région, accueillant chaque jour environ 10 000 véhicules, dont 10 % de poids de lourds (France 3, 2018). Le pont fait l'objet d'une surveillance régulière depuis sa construction, avec notamment un suivi géométrique assuré par l'IGN à l'aide de relevés topographiques. Depuis 2010, des travaux de renforcement sont réalisés sur les différentes piles de l'ouvrage.

■ Présentation du système déployé

Dans l'optique de compléter le suivi géométrique du pont de Brotonne,

le conseil département de la Seine-Maritime l'a fait équiper, à partir de 2017, d'un réseau de capteurs Géocube. Le Géocube est une station GNSS bas coût et intelligente développée par l'IGN et *Ophelia Sensors*, qui transmet en temps réel ses observations par réseau maillé sans fil. Les données transmises sont traitées sur un serveur distant, avec un calcul relatif sur la phase du signal (doubles différences), permettant d'obtenir les séries temporelles 3D de chaque capteur avec une latence de quelques minutes. Durant la période 2017-2018 étudiée, les stations Géocube déployées étaient équipées de récepteurs Ublox 6, monofréquence et GPS uniquement, avec un échantillonnage fixé à 30s.

Au total, douze stations Géocube ont été déployées pour la surveillance du pont de Brotonne (dont une référence fixe à proximité sur la rive nord), sur des éléments structurels stratégiques : une station au sommet de chaque pylône, deux stations au milieu de la travée centrale, deux stations autour du joint de chaussée entre le viaduc d'accès et la travée principale, une station sur le viaduc d'accès et quatre autour du joint entre le viaduc d'accès et la culée sud (figure 2).

Les piles principales du pont (sous les pylônes) ont été équipées de sondes

de température par le Cerema, insérées à différentes profondeurs et sur différentes faces de piles. Elles permettent ainsi de rendre compte de divers gradients thermiques affectant le comportement du pont.

Analyse des données GNSS

■ Disponibilité et préparation des données

Lors du début de la surveillance en 2017, les Géocubes installés sur le pont de Brotonne ont fait partie des premiers déployés pour des applications de génie civil. Quelques difficultés de mise en œuvre ont été observées, avec des coupures de certains capteurs suite à des faiblesses dans l'alimentation et des irrégularités dans les données récoltées et les positions calculées. L'origine de ces irrégularités est double :

- la non-résolution du positionnement sur la phase (ambiguïtés entières), qui selon les conditions environnementales et les masques, peut engendrer la "perte" de 10 % à 30 % des observations qui ne pourront pas être converties en une position à un instant donné ;
- l'utilisation d'une communication sans-fil basse consommation, moins robuste qu'une transmission filaire traditionnelle, qui peut entraîner des pertes dans la transmission des observations.

La figure 3 présente le taux de disponibilité des données par jour pour chaque station sur la période 2017-2018. Ces irrégularités ne sont pas avérées limitantes pour l'exploitation des données : l'objectif étant de suivre la réponse quasi statique de l'ouvrage, l'échantillonnage à 30 secondes est bien supérieur à la fréquence nécessaire traditionnellement pour suivre ces phénomènes horaires. Pour améliorer l'exploitabilité des données, les séries temporelles de chaque capteur ont été préparées avec le protocole suivant :

- les interruptions inférieures à 6h ont été complétées par interpolation linéaire ;
- un filtre à médiane glissante d'une heure a été appliqué sur chaque série ;
- un rééchantillonnage à 5 minutes a été appliqué ;

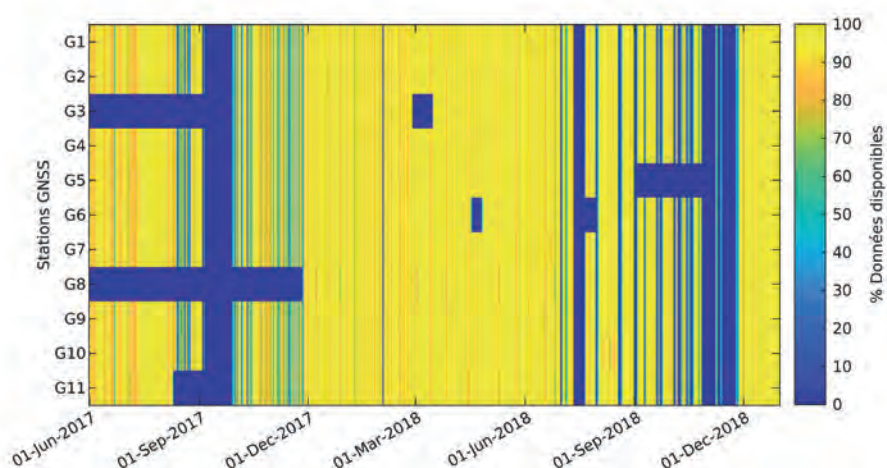


Figure 3. Taux de disponibilité des données par capteur.

- les séries temporelles ont été projetées dans un référentiel orienté selon l'ouvrage.

Les données acquises par les différents capteurs sont ensuite étudiées par parties d'ouvrages.

■ Suivi des pylônes

Les stations G8 et G11 ont été installées au sommet des pylônes P1 et P2, respectivement. Les mouvements

observés sur chaque composante par ces deux capteurs sont présentés dans la figure 4.

Les déplacements transversaux sont très similaires entre G8 et G11, avec des variations quotidiennes très variées : de quelques centimètres à parfois plus de 15 cm en une seule journée. Ces déplacements peuvent être reliés à la présence d'un gradient thermique transversal (note : l'axe transversal du repère

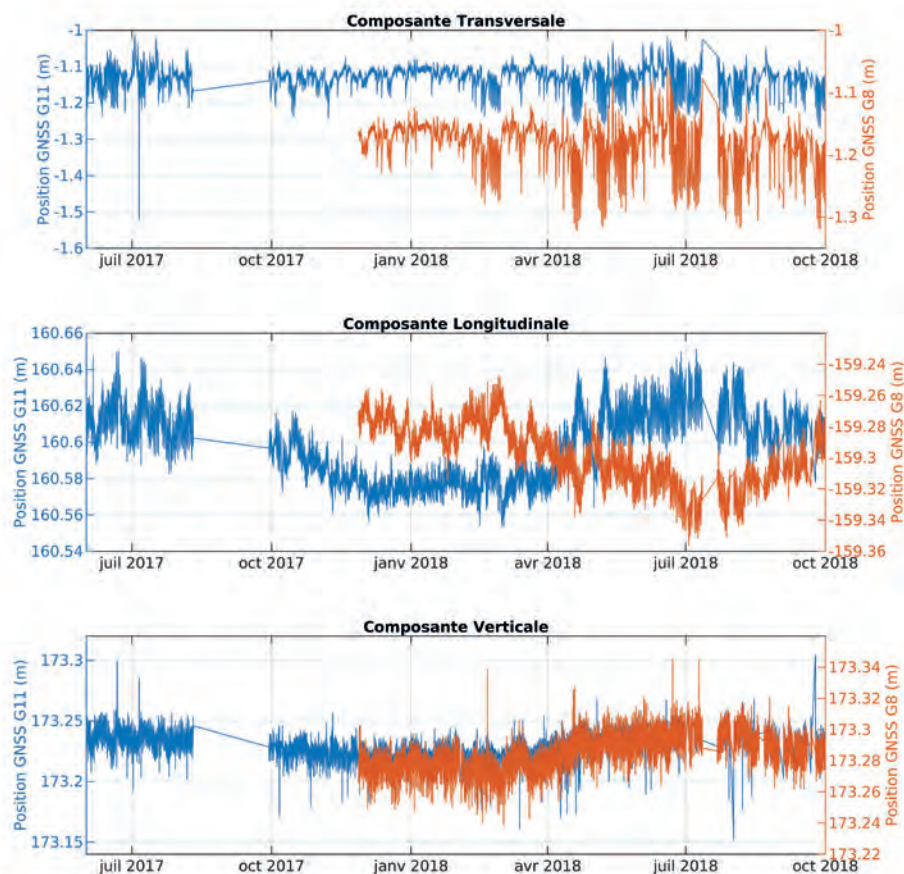


Figure 4. Déplacements observés au sommet des pylônes.



est proche de l'axe est/ouest) dans les piles et pylônes. Le matin, le soleil chauffe le flanc est des piles et pylônes, leurs faces exposées à l'est se dilatent plus que les faces à l'ombre, ce qui fait pencher les pylônes vers l'ouest. Ce phénomène se compense puis s'inverse l'après-midi avec le passage du soleil à l'ouest. L'inertie thermique importante du béton fait que, lors de journées ensoleillées, le système n'est pratiquement jamais à l'équilibre.

Pour vérifier cette explication, les déplacements transversaux sont comparés à ΔT_{ouest}^{est} , qui représente la différence de température entre les sondes thermiques externes à l'est et à l'ouest des piles (figure 5). Nous avons estimé la corrélation entre les déplacements et ce gradient à l'aide du coefficient de corrélation de Pearson : les déplacements enregistrés par G8 et G11 présentent un coefficient de 0,91 et 0,90 avec ΔT_{ouest}^{est} respectivement.

Les déplacements longitudinaux observés par G8 et G11 apparaissent comme majoritairement symétriques, avec un coefficient de Pearson de -0,85 en les

deux séries. Ils présentent des variations saisonnières sinusoïdales et des variations quotidiennes qui sont plus importantes en été qu'en hiver. Ces mouvements peuvent s'expliquer par la dilatation thermique des autres éléments structuraux du pont, notamment le tablier : avec les variations de température, le tablier se dilate longitudinalement et va pousser ou tirer sur les deux pylônes de façon symétrique.

Pour vérifier ce comportement, l'écartement des deux pylônes (qui se calcule directement en faisant la différence entre les positions des capteurs) est comparé à la température T_p^{moy} , qui représente la valeur moyenne des sondes des deux piles (figure 6). La fonction de corrélation (valeur du coefficient de corrélation selon le déphasage) est calculée, et montre un coefficient maximal de 0,86 entre les deux séries pour un déphasage de 8 heures, témoin de l'inertie thermique de l'ouvrage.

Enfin, les déplacements verticaux sont identiques entre G8 et G11. Ils présentent des mouvements quotidiens faibles, mais des variations saisonnières centi-

métriques sous la forme d'une sinusoïde de période annuelle. Ce comportement est caractéristique de la dilatation thermique saisonnière des structures.

■ Suivi du viaduc d'accès

L'un des éléments critiques du viaduc d'accès est le joint de chaussée J2, dont l'ouverture est suivie à l'aide des stations G6 et G7. Ce tandem observe principalement des mouvements longitudinaux (figure 7) : le positionnement sur la chaussée et la proximité des piles font que peu de mouvements verticaux et transversaux sont attendus sur cette section de l'ouvrage.

Les mouvements longitudinaux des deux capteurs sont fortement anticorrélés (coefficient de -0,95), mais d'amplitudes différentes. Les profils des courbes sont très similaires à ceux observés dans les déplacements longitudinaux au sommet des pylônes : ces mouvements sont dus à la dilatation thermique longitudinale des segments de tablier suivis. La dilatation thermique est un phénomène supposé linéaire à travers le matériau affecté : pour une variation de température donnée, les déplacements le long du matériau sont proportionnels à leur distance du point fixe de l'élément suivi. Ainsi, les mouvements observés par G7 sont d'une plus grande amplitude que ceux de G6, puisque le segment de tablier sur lequel G7 est situé est plus grand que celui sur lequel G6 est installé. L'amplitude des mouvements observés par G6, G7 et les capteurs G4 et G5 de l'autre côté du viaduc d'accès, sont comparés à la distance au point fixe respectif de leur segment de tablier (supposé au centre de chaque segment) dans la figure 8.

Comme attendu, une relation linéaire apparaît. L'écart d'ordonnée à l'origine peut s'expliquer par le bruit des mesures GNSS, ainsi que le fait que des phénomènes de déformations locaux ou temporaires (gradients thermiques, charge du trafic) peuvent affecter les déplacements.

Pour vérifier si les amplitudes mesurées sont cohérentes avec les déformations attendues sur un ouvrage en béton, une estimation du coefficient de dilatation thermique C_T est calculée à partir des mesures de chaque point dans le tableau suivant. C_T est calculé à partir

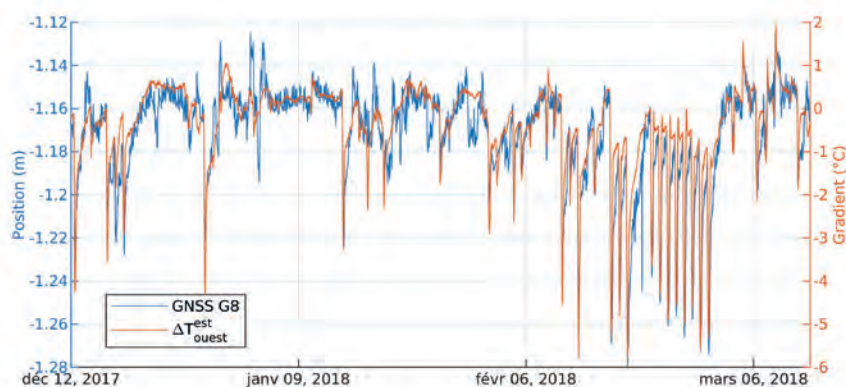


Figure 5. Déplacements transversaux observés par G8 comparés au gradient thermique transversal.

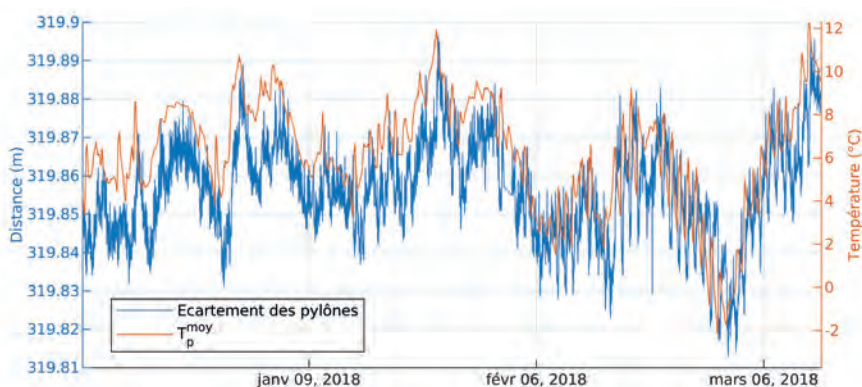


Figure 6. Comparaison de l'écartement des pylônes du pont de Brotonne avec la température moyenne des piles.

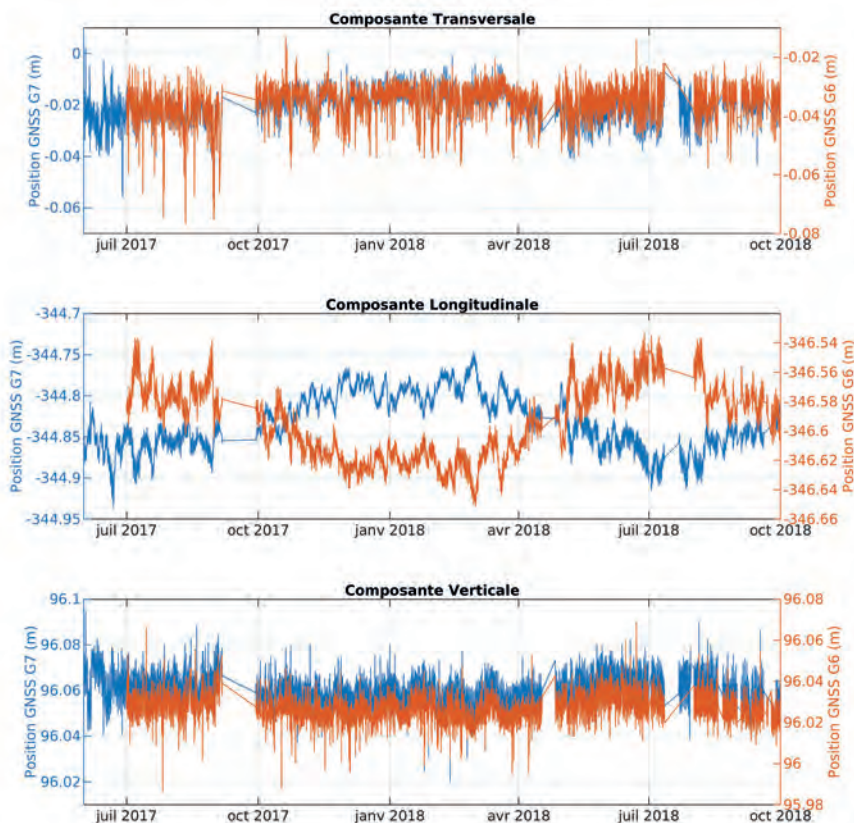


Figure 7. Déplacements observés autour du joint J2.

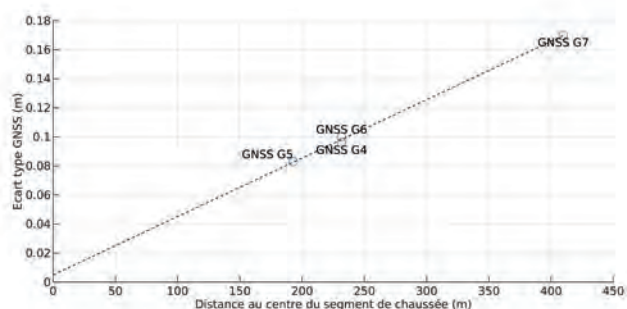


Figure 8. Amplitude des séries GNSS comparées à leur distance au point fixe de leur segment de tablier.

de chaque mesure comme le quotient de l'amplitude des déplacements observés Δd par la distance au point fixe D et l'amplitude des variations de température sur l'année Δt . En nous basant sur T_p^{moy} , nous obtenons $\Delta t = 35^\circ\text{C}$ sur un an.

Station	Δd	D	C_T
G4	0,096 m	231 m	$11,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
G5	0,083 m	93 m	$12,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
G6	0,010 m	231 m	$12,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
G7	0,170 m	410 m	$11,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Les valeurs de C_T calculées sont cohérentes entre les différents capteurs et sont proches de la valeur théorique de $C = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour du béton, confirmant la capacité des stations déployées à suivre et qualifier la réponse thermique du tablier.

■ Suivi de la travée centrale

La travée centrale est équipée en son centre par les stations G9 et G10, situées

de part et d'autre de la chaussée. Les mouvements qui y sont observés sont essentiellement verticaux (figure 9). De façon similaire à ce qui a été observé sur le tablier, les mouvements comprennent une variation annuelle sinusoïdale et des variations quotidiennes plus fortes en été qu'en hiver. En revanche, contrairement aux cas précédents, ces mouvements ne peuvent être directement reliés à T_p^{moy} , car ils ne sont pas dus à la dilatation globale de l'ouvrage, mais plutôt à la présence

de gradients verticaux dans le tablier. En l'absence de sondes de température disponibles dans cette section, il n'est pas possible de calculer précisément ce gradient. Nous avons proposé d'utiliser ΔT_{ext}^{int} , calculé comme la différence de température moyenne entre les sondes externes et internes des piles et qui se veut un indicateur de l'inertie thermique de l'ouvrage (figure 10).

Une corrélation nette (coefficients de corrélation avec de 0,69 et 0,70 pour G9 et G10, respectivement) est observée, confirmant la nature des déplacements suivis par les stations GNSS.

Les variations sur les trois composantes des capteurs G9 et G10 sont quasiment identiques, cependant courant 2018, deux périodes durant lesquelles les comportements des capteurs sont nettement différents sont identifiées. Ce phénomène est observable sur les trois composantes, mais il l'est particulièrement sur la composante longitudinale où peu de déplacements sont observés en temps normal (figure 11).

Les périodes du 25 mai au 19 juin 2018, durant laquelle le capteur G9 présente une excitation plus forte et du 24 juillet au 19 août 2018, durant laquelle G10 présente une excitation plus forte, correspondent à la présence d'échafaudages et de treuils sur la travée centrale, respectivement du côté de la chaussée où les séries sont affectées. Les travaux réalisés étaient des travaux d'entretien sur la peinture de l'ouvrage, n'entraînant pas de changement de comportement de celui-ci, ce qui peut s'observer par le retour à un comportement normal des deux capteurs à la fin des interventions.

Conclusions

■ Bilan sur l'instrumentation entre 2017 et 2018

Cette étude propose ainsi une évaluation de la capacité du réseau de capteurs

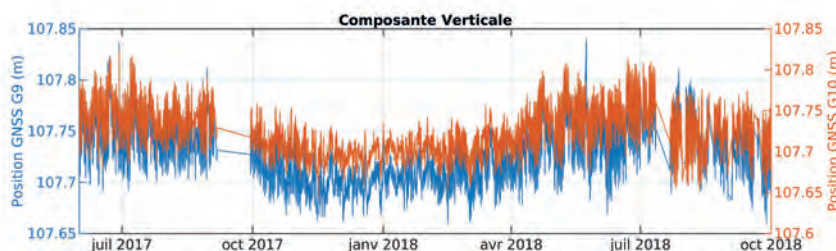


Figure 9. Déplacements verticaux observés sur le tablier.

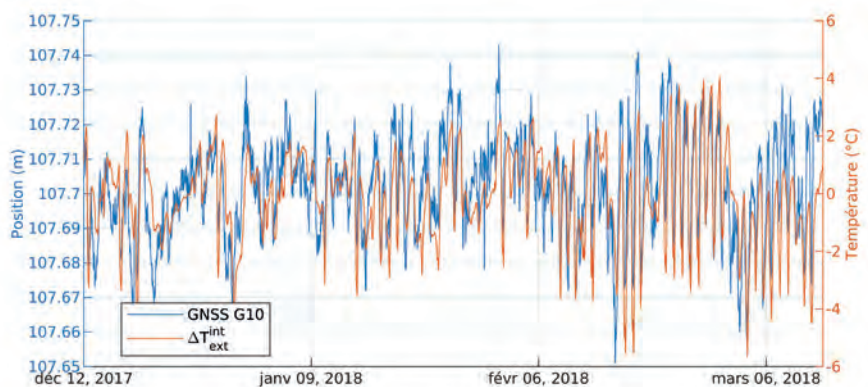


Figure 10. Comparaison des mouvements verticaux de G10 et du gradient du béton des piles.

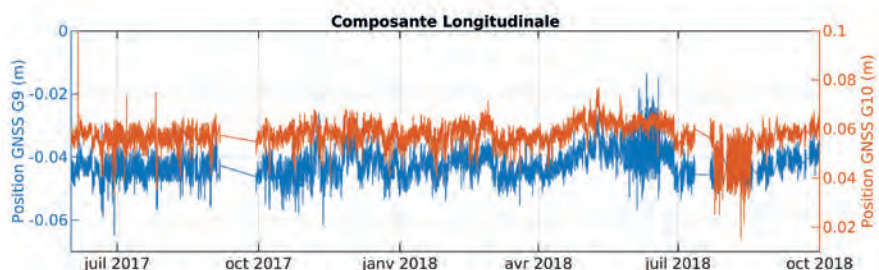


Figure 11. Déplacements longitudinaux observés sur le tablier.

GNSS à bas coût pour la surveillance de la santé structurale de grands ouvrages comme le pont de Brotonne. Quelques faiblesses, concernant essentiellement la fiabilité de l'alimentation et la transmission sans fil des données, ont été mises en avant à travers l'étude globale de la disponibilité des données. Cependant, les limitations observées n'ont pas entravé l'analyse et l'interprétation des données.

Cette étude a également montré la capacité des stations GNSS basées sur des petites puces monofréquence à identifier la réponse thermique de plusieurs éléments caractéristiques de l'ouvrage : les mouvements liés à la dilatation longitudinale du tablier, leurs effets sur les pylônes et les effets des gradients thermiques transversaux et verticaux. Ces observations sont validées grâce à la comparaison aux données des sondes de température installées dans les piles principales.

Enfin, ces travaux de recherche ont été l'occasion de mettre en avant la capacité des stations GNSS déployées à détecter des comportements anormaux, comme cela a été montré sur les capteurs du tablier durant la présence d'engins de chantier sur l'ouvrage.

Si ces travaux ont mis en avant quelques faiblesses électroniques lors de la période étudiée (2017-2018), une

nouvelle génération de Géocubes sur laquelle des travaux de fiabilisation au niveau de l'alimentation ont été réalisés a depuis été mise en service.

Au niveau des outils GNSS en général, l'arrivée sur le marché de nouveaux récepteurs bas coût à multiconstellation (type Ublox M8) puis multifréquence (type Ublox Z9) devrait permettre d'accroître la précision intrinsèque des stations (élimination des erreurs ionosphériques et modération des multi-trajets) et d'augmenter la souplesse du déploiement (plus grande distance à la référence). Ces évolutions, couplées aux résultats encourageants déjà obtenus lors de cette première période d'instrumentation, sont de bon augure pour les applications GNSS bas coût dans les applications de génie civil. Ces perspectives permettent d'envisager une démocratisation des technologies GNSS pour l'instrumentation des grands ouvrages, souvent limitées par le coût du matériel à déployer. ●

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier le conseil départemental de la Seine-Maritime (76), qui a mis à disposition les données de l'instrumentation du pont de Brotonne qui ont été utilisées dans cette étude.

Contact

Nicolas MANZINI, Ingénieur études, SITES SAS,
nicolas.manzini@sites.fr

Bibliographie

- Ashkenazi, V. & Roberts, G. W., 1997. *Experimental monitoring of the Humber bridge using GPS*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering, 120(4), p. 177-182.
- Benoit, L., Briole, P., Martin, O. & Thom, C., 2014. *Real-time deformation monitoring by a wireless network of low-cost GPS*. Journal of Applied Geodesy, 8(2), pp. 119-128.
- Brault, J. L. & Mathivat, J., 1976. *The Brotonne bridge, design and experience gained after eighteen months of construction*. Travaux, Issue 492.
- France 3, 2018. *Reportage - Entre Rouen et Le Havre, le point sur l'état du pont de Brotonne*. [Interview] 2018.
- Maurey, H., Chaize, P. & Dagbert, M., 2019. *Sécurité des ponts : éviter un drame*, s.l.: s.n.
- Yi, T. H., Li, H. & Gu, M., 2010. *Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring*. Science China Technological Sciences, 53(10), pp. 2597-2610.

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM), which aims to characterize and monitor the behaviour and performance of civil engineering structures over time, is now a key component of management policies of infrastructure fleets. In 2017, the departmental council of Seine-Maritime (76) called on the IGN (French Geographical Institute) to install a network of a dozen of low-cost GNSS sensors on the Brotonne bridge, in order to complete the periodic topographic surveys of the structure. As part of a collaborative research project between SITES, the University Gustave Eiffel, and the IGN, which aimed at studying the potential of GNSS tools for SHM, the data acquired on the Brotonne bridge in 2017 and 2018 were analyzed. In this paper, we propose a global assessment of the GNSS performance through data availability, the comparison with the expected behaviors on different parts of the structure, and the comparison with internal temperature data.