

# Surveillance de santé structurale des ouvrages d'art incluant les systèmes de positionnement par satellites

■ Camille FAVRE

*Une synthèse des connaissances actuelles sur le suivi de santé structurale des ouvrages d'art montre que les systèmes GNSS s'avèrent être des outils intéressants afin de compléter les méthodes déjà existantes. Aussi, plusieurs expériences ont été réalisées faisant intervenir des récepteurs GNSS et des accéléromètres. Après un traitement spécifique des données brutes afin de pouvoir les comparer, l'analyse des résultats obtenus a permis d'identifier le domaine d'application des deux techniques mises en œuvre. En effet, il s'avère qu'en dessous de quelques millimètres d'amplitude de déplacement, le récepteur GNSS n'est pas adapté, et concernant l'accéléromètre, compte tenu des hypothèses de l'algorithme de reconstruction des déplacements utilisé notamment avec la présence d'une fréquence de coupure, des effets quasi statiques ne peuvent être mesurés. Ainsi les expériences ont permis d'évaluer les performances de chaque capteur et de montrer qu'utilisés conjointement, ils permettraient de fournir un ensemble d'informations complémentaires pour l'analyse de la structure.*

## ■ MOTS-CLÉS

Surveillance d'ouvrages d'art, positionnement par satellites, instrumentation, accéléromètre

Cette surveillance est réalisée grâce à de nombreuses techniques reposant sur différents types d'instruments et capteurs pour mesurer notamment des accélérations, des vitesses, des déplacements ou encore des déformations. Cependant, les capteurs présentent des inconvénients plus ou moins importants. En effet, par exemple, la jauge de déformation est non seulement sensible à la température mais dérive également dans le temps et a donc des problèmes lors de mesures sur le long terme, l'inconvénient du capteur de déplacement réside dans la définition d'un point de référence et enfin l'accéléromètre est un capteur qui convient pour caractériser les vibrations mais l'estimation des déplacements lents correspondant aux basses fréquences est difficile. Les techniques de topométrie sont également utilisées dans le cadre du suivi de structures, à l'aide de tachéomètres notamment. Cependant, ces instruments présentent tout de même des limitations, notamment en termes de visibilité.

Ainsi, dans un contexte où de plus en plus d'ouvrages et de structures sont soumis à un suivi, les systèmes de positionnement par satellites (GNSS) s'avèrent être des outils intéressants afin de compléter les méthodes déjà existantes. En effet, le positionnement par satellites, disponible partout sur le globe, permet à un utilisateur d'obtenir, entre autres, une position absolue exprimée dans un système géodésique de référence mondial. Ce type de fonctionnement, qui peut être absolu ou différentiel, statique ou dynamique, présente de nombreux avantages dans

## Contexte

La surveillance structurale des ouvrages d'art est essentielle pour plusieurs raisons. Elle permet tout d'abord le suivi régulier des ouvrages tout au long de leur vie et ainsi aide à définir les actions de maintenances préventives et correctives à mettre en œuvre. Elle vise également à éviter des incidents ou même des accidents tels que celui survenu en 1967 avec l'effondrement du *Silver Bridge* aux États-Unis, provoquant la mort de plusieurs personnes.

De plus, les ouvrages d'art sont soumis à des sollicitations de natures diverses, comme le vent ou le trafic routier, et qui peuvent évoluer au cours du temps. En effet, dans le cas des ponts, on assiste par exemple depuis plusieurs décennies, à une augmentation de la fréquence du trafic ainsi que du poids

et de la rapidité des véhicules. Les données issues du suivi des structures peuvent alors être utiles pour la conception de futurs ouvrages mieux adaptés.

Enfin, la surveillance des ouvrages d'art favorise également la prévention des situations anormales pouvant survenir dans certaines régions suite à des phénomènes naturels exceptionnels tels que les séismes ou les ouragans.

Ainsi la surveillance de santé structurale des ouvrages d'art est avant tout un enjeu de sûreté et de sécurité des biens et des personnes. Si on s'intéresse au pont de Rion-Antirion en Grèce par exemple, c'est un ouvrage majeur de trois kilomètres de long qui est situé dans une zone sismique sur un sol de faible qualité. Ainsi il est très bien instrumenté et suivi de manière drastique.



le cadre du suivi d'ouvrages d'art. C'est un système dont l'utilisation est relativement simple et dont le résultat peut être obtenu en temps réel ou en temps différé et qui permet en particulier de contourner les problèmes d'intervisibilité entre différentes stations.

De plus, les évolutions récentes des systèmes GNSS, telles que la possibilité d'atteindre des fréquences d'acquisition de plus en plus élevées (jusqu'à 100 Hz) ont permis d'envisager leur utilisation dans le suivi des ouvrages d'art, et notamment dans le suivi dynamique. L'arrivée prochaine du système Galileo, équivalent européen du GPS américain et du Glonass russe, donne également davantage d'importance à la maîtrise de la position des objets qui nous entourent. En effet, contrairement à ses concurrents, ce système est fondamentalement un système civil. De plus, davantage de satellites seront disponibles du fait de l'interopérabilité entre les systèmes GPS et Galileo, permettant ainsi d'accroître la constellation de satellites.

L'utilisation des méthodes GNSS pour le suivi d'ouvrages de génie civil, dans l'état actuel des connaissances, s'applique dans de nombreux domaines, notamment le suivi continu des barrages et des glissements de terrain, le suivi des tours et immeubles de grande hauteur ou encore le suivi des ponts [Im et al., 2013].

De nombreuses recherches ont été réalisées sur les vibrations de pont causées par les piétons ou les véhicules en utilisant le système de positionnement par satellites ou encore pour mesurer les déplacements de ponts sous les effets du vent. Ainsi, les résultats indiquent que, correctement traitées, les données GPS à haute fréquence peuvent être utilisées pour mesurer des déplacements dynamiques non seulement d'immeubles de grande hauteur, de ponts à haubans et autres structures flexibles avec par exemple une fréquence modale inférieure ou égale à 1 Hz et des déplacements supérieurs à 10-20 mm, mais aussi des structures de génie civil plus raides avec par exemple une fréquence modale d'environ 4 Hz et des déplacements associés supérieurs à 6 mm. Cela a pour effet d'élargir le

champ d'investigations possibles pour la surveillance structurale.

En Grèce-Centrale, par exemple, l'identification des modes caractéristiques du pont de chemin de fer en acier nommé Gorgopotamos par analyse éléments finis est rendue difficile par la partie centrale du pont qui a été détruite deux fois pendant la Seconde Guerre Mondiale [Psimoulis et al., 2008]. Le système de positionnement par satellites a été alors utilisé afin d'obtenir davantage d'informations utiles. Des observations au passage d'un train ont permis de montrer une réponse caractérisée par une oscillation verticale dépendant des caractéristiques du train (nombre et poids des wagons passants...). Une analyse spectrale a révélé une première composante à 0.46 Hz qui pourrait correspondre à la fréquence d'excitation du pont par le passage du train et une deuxième composante plus faible à 3 Hz qui semblerait correspondre à la principale fréquence modale du pont. Ainsi l'étude a notamment mis en évidence qu'avec un récepteur possédant une fréquence d'acquisition à 20 Hz, il était possible d'aller jusqu'à 4 Hz pour déterminer les caractéristiques spectrales d'oscillation. Ainsi, le système de positionnement par satellites peut être utilisé dans la surveillance structurale des ouvrages d'art et permet d'effectuer des mesures conjointes en statique et dynamique. Cependant, comme toute technique, elle possède également des inconvénients : sa précision dépend du nombre et de la géométrie des satellites visibles, sa fréquence d'acquisition est relativement faible. Aussi, l'utilisation conjointe de deux ou plusieurs systèmes peut aider à éliminer les désavantages des instruments pris séparément.

L'accéléromètre s'avère être un capteur très intéressant. En effet, il a l'avantage de détecter une gamme étendue de fréquences, contrairement au GPS. Néanmoins, il possède des limites d'utilisation notamment la dérive dans le temps lors de l'intégration des données originales afin d'obtenir une vitesse et une position, ou encore le fait que l'accéléromètre ne peut capturer que la réponse dynamique de la structure étudiée. Aussi, dans le cadre

de différents types de mouvements, il est intéressant d'étudier les domaines d'applications des deux instruments en fonction de l'amplitude et de la fréquence. Plus spécifiquement, une comparaison des deux techniques a pu être réalisée permettant ainsi d'identifier notamment la complémentarité et les limites de ces systèmes en particulier les avantages du GPS, relatifs à sa stabilité à long terme notamment, avec les avantages de l'accéléromètre, en particulier sa fréquence d'acquisition élevée.

## Expériences réalisées

La complémentarité entre récepteur GNSS et accéléromètre a été étudiée en effectuant différentes expériences à l'aide d'un dispositif appelé "Maquette de pont" construit par l'IFSTTAR et conçu pour réaliser des mesures représentatives des ouvrages réels. Cette structure est constituée d'un assemblage de plusieurs pièces en acier et permet d'effectuer un certain nombre de mesures que l'on peut être amené à réaliser dans le cadre du suivi dynamique d'ouvrage d'art, notamment des analyses fréquentielles. En effet, cette structure représente une étape de la construction d'un pont à haubans par encorbellement. C'est une étape de construction lors de laquelle la structure est très souple et donc susceptible de vibrer sous l'effet du vent avec de fortes amplitudes.

Le dispositif, illustré à la *Figure 1*, est donc constitué de :

- un pied vertical de section circulaire creuse d'un mètre environ, fixé à sa base dans un bloc de béton posé au sol,
- la poutre elle-même mesurant six mètres de long, de section rectangulaire creuse et fixée en son centre sur le pied,
- une pièce verticale fixée sur la poutre dans la prolongation du pied, et munie d'une masse permettant de faire varier les fréquences propres du dispositif.

La structure a été mise en place sur le parking de l'IFSTTAR dans une zone plutôt dégagée, cependant, au cours de l'été, la maquette de pont utilisée pour réaliser les expériences a été endommagée. Le pylône a alors été remplacé par





Figure 1. La structure expérimentale



une tige en acier filetée aux extrémités et encastrée par un système d'écrou.

De ce fait, les caractéristiques mécaniques de la structure ont changé. Une étude théorique datant de 2003 avait été réalisée sur la structure initiale afin de déterminer les modes propres de la structure. Ainsi, une analyse modale par éléments finis à l'aide du logiciel RDM6 a dû être effectuée afin de déterminer les modes propres de la nouvelle structure après endommagement. Ces valeurs pourront ainsi être comparées aux fréquences issues des résultats expérimentaux.

Le calcul des modes propres de la structure se base sur un modèle éléments finis, visible Figure 2, et utilise la théorie des poutres. La structure est modélisée par 4 poutres. Deux masses ponctuelles sont également modélisées, la première correspond à

la masse de 1.17 kg du récepteur GNSS placé à l'extrémité de la poutre, et la seconde, de 41.4 kg, située légèrement au-dessus de la liaison pylône-poutre correspond à la masse mobile située sur la structure.

Ainsi les modes propres théoriques de la nouvelle structure sont résumés dans le tableau 1

Mode	Type	Fréquence (Hz)
1	Torsion du pylône	1.11
2	Flexion du pylône dans le plan	1.12
3	Flexion du pylône hors plan	2.42
4	Poutre	6.60

Tableau 1. Présentation des différents modes de la nouvelle poutre

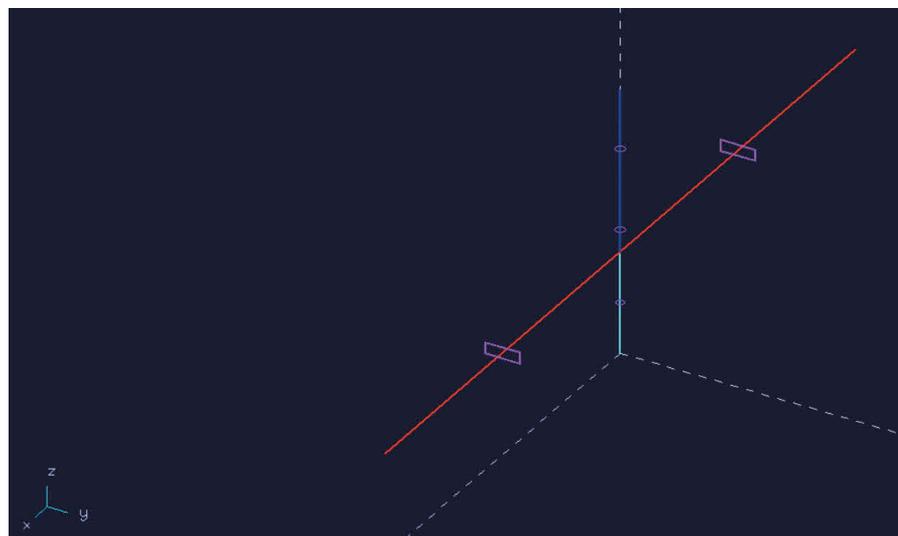


Figure 2. Modélisation de la nouvelle structure sous RDM6

Afin d'étudier la complémentarité du récepteur GNSS et des accéléromètres, la poutre de la structure a été instrumentée de deux récepteurs GNSS SP80 de Spectra Précision, l'un servant de pivot et installé à une quarantaine de mètres de la structure et l'autre directement fixé sur la poutre. Deux récepteurs ont été utilisés afin d'effectuer un positionnement en combinant (L1 + L2). Les récepteurs GNSS ont été utilisés à une fréquence d'acquisition de 20 Hz et les données constructeur nous indiquent une précision cinématique horizontale de 8 mm + 1 ppm et une précision verticale de 15 mm + 1 ppm. Des accéléromètres GCDC ont également été installés sur la poutre dont les modèles sont X6-2 et X16 utilisés respectivement à des fréquences d'acquisition de 160 Hz et 100 Hz. Ils enregistrent selon les 3 axes X, Y et Z liés directement au repère interne du capteur. Leur résolution est de  $4.88 \cdot 10^{-4}$  g/bit.

Après une instrumentation de la structure, plusieurs types d'expériences ont été réalisés. Elles font intervenir un mouvement principal vertical ou horizontal dont l'excitation était transitoire ou harmonique. Ainsi les manipulations ont consisté à mesurer les mouvements de vibration de la structure soumise soit à un déplacement initial soit à un générateur de signaux sinusoïdaux. Dans le cas d'une excitation transitoire, l'amplitude initiale a été donnée au début à la main par une personne du côté de la poutre opposé au récepteur GNSS qui la relâchait. Cette amplitude initiale a pu être déterminée à l'aide de mesures au distancemètre. Cependant, afin d'avoir une meilleure estimation sur la valeur de l'amplitude initiale et surtout sur l'instant du lâché de la poutre, une charge statique connue constituée d'une ou deux masses a été accrochée avec un fil à l'extrémité de la poutre opposée par rapport aux capteurs, comme l'illustre la Figure 3. La mise en mouvement est alors réalisée par la coupure du fil à l'aide d'une paire de ciseaux.

Dans le cas d'une excitation harmonique, des oscillations forcées ont été appliquées à la poutre. Cette excitation harmonique est réalisée à l'aide d'un système de balourd constitué



Figure 3. Montage avec les deux masses à une extrémité

d'un disque métallique entraîné par un moteur, sur lequel est fixée une masse excentrée. Un moteur est alimenté en courant continu. La vitesse de rotation est modifiée en changeant la valeur de la tension. Le mouvement de la poutre est donc engendré par la rotation de la masse fixée sur le disque. Un balayage en tension a été effectué manuellement à l'aide du moteur en augmentant progressivement la tension jusqu'à pouvoir observer visuellement les premières résonances de la structure. Avant de pouvoir effectuer une analyse des résultats obtenus pour chaque essai réalisé, il est nécessaire d'effectuer un traitement des données brutes. En effet, les différents jeux de données acquis possèdent des unités et des systèmes de référence propres à chaque instrument. Aussi, afin de pouvoir comparer toutes ces données entre elles, il est nécessaire d'uniformiser l'ensemble et de définir une unité et un système de référence commun.

Tout d'abord un passage dans une même unité, le mètre, est nécessaire. Aussi, en utilisant le logiciel libre RTKLIB, on obtient à chaque instant, dans le système de référence RGF93 cartésien, les coordonnées de la position du récepteur GNSS situé sur la poutre en mètres. En ce qui concerne l'accéléromètre, la sensibilité est le paramètre qui permet de passer des données brutes issues du capteur, aux valeurs d'accélération. Ce paramètre

est en général fourni par le constructeur ou déterminé par étalonnage. Afin de pouvoir comparer ces mesures avec celles des récepteurs GNSS, il est nécessaire de transformer les accélérations en déplacements. Le passage d'une accélération à une vitesse, d'une vitesse à un déplacement se fait par intégration du signal en fonction du temps. Cependant, si l'on effectue simplement une double intégration, une forte dérive des signaux intégrés apparaît. Dans notre cas, un algorithme ayant un comportement de filtre passe-haut est appliqué et permet de réaliser la double intégration sans qu'aucune dérive des signaux n'apparaisse [Lee et al., 2010].

Cet algorithme de reconstruction des déplacements à partir de mesures d'accélération est détaillé dans l'article [Lee et al., 2010]. L'auteur part du constat des difficultés qui existent dans la reconstruction du signal de déplacement à partir d'accélération dans le cas des structures pour lesquelles les basses fréquences dominant. Les méthodes de reconstruction conventionnelles les plus usitées présentent de nombreux inconvénients. Elles nécessitent souvent la connaissance des conditions initiales en position et en vitesse lors de l'intégration, valeurs qui sont rarement connues. De plus, le bruit de basse fréquence du signal est généralement amplifié lors du processus de reconstruction et induit des dérives temporelles du signal reconstruit. La

méthode de reconstruction proposée ici est un algorithme adapté aux structures de basses fréquences. Celui-ci est formulé comme un problème aux limites utilisant des mesures d'accélération sans aucune donnée sur les conditions initiales. Le déplacement est reconstruit par un problème inverse défini comme la minimisation de l'écart des moindres carrés entre l'accélération mesurée et la dérivée temporelle seconde du déplacement sur un intervalle de temps correspondant à la taille d'une fenêtre. Un chevauchement des fenêtres de filtrage utilisées permet également une amélioration de la précision des déplacements reconstruits. Ainsi, cette méthode de reconstruction, qui a été validée par des essais expérimentaux, semble être le meilleur outil disponible pour effectuer la reconstruction des déplacements à partir des accélérations mesurées sur la poutre. C'est pourquoi cette méthode est retenue pour l'ensemble des post-traitements effectués à partir des mesures des accéléromètres.

Enfin, afin de faciliter la comparaison des données, il est nécessaire de définir un repère commun dans lequel sera exprimé l'ensemble des mesures. Pour cela, un repère lié à la position de la poutre au repos semble le plus adéquat.

Le repère mis en place, illustré *Figure 4*, est caractérisé par un axe X parallèle à l'axe de la poutre et orienté vers le récepteur GNSS, un axe Z vertical et un axe Y venant compléter le repère afin que celui-ci soit orthonormé direct. L'origine du repère est située à la base du pied, seul point fixe de la structure.

Concernant les données GNSS, leur conversion du système de référence RGF93 cartésien au système de coordonnées lié à la poutre est réalisé par l'application d'une transformation Helmert 2D, les axes verticaux des deux systèmes étant identiques et définis par la hauteur ellipsoïdale. La détermination des paramètres de la transformation a nécessité la connaissance des coordonnées GPS de deux points de la poutre dans les deux systèmes, celles du récepteur GNSS ainsi que celles de l'origine du repère lié à la poutre. Ce dernier point n'étant pas directement



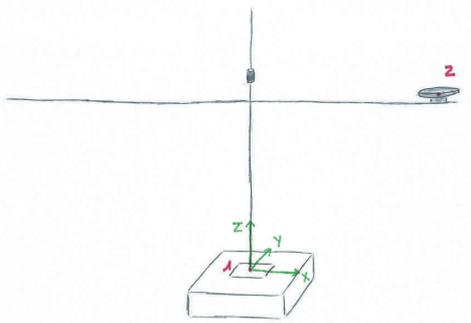


Figure 4. Définition du repère fixe lié à la poutre

▶ accessible par GPS, la topographie a été utilisée pour sa détermination.

Pour les données issues des accéléromètres, elles sont exprimées dans un repère associé au capteur appelé "body frame". Ce dernier est en rotation par rapport au repère lié à la poutre lorsque cette dernière est en mouvement. Il est alors nécessaire d'évaluer et de prendre en compte cette rotation. Cependant, une évaluation préalable de celle-ci à l'aide d'un calcul éléments finis permet de montrer que l'angle de rotation du repère de l'accéléromètre est négligeable et donc que sa prise en compte n'est pas indispensable. Il faut veiller cependant à l'orientation des axes des accéléromètres afin que les sens des axes correspondent à ceux des axes du repère lié à la poutre.

### Analyse des résultats

Une fois l'ensemble des résultats traité, ceux-ci ont pu être comparés et interprétés afin de conclure quant à la complémentarité entre les récepteurs GNSS et les accéléromètres. Par la suite, on s'intéresse principalement à la composante verticale car c'est la composante la moins précise au niveau du récepteur GNSS. Les séries temporelles obtenues à la

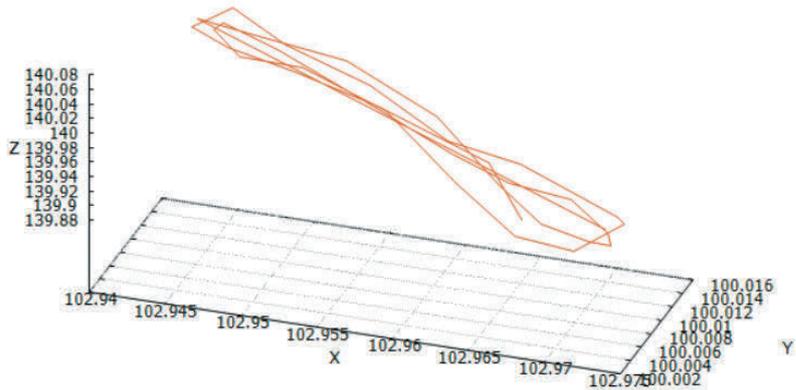


Figure 5. Représentation 3D de 3 périodes d'oscillations du récepteur GNSS : cas excitation transitoire verticale

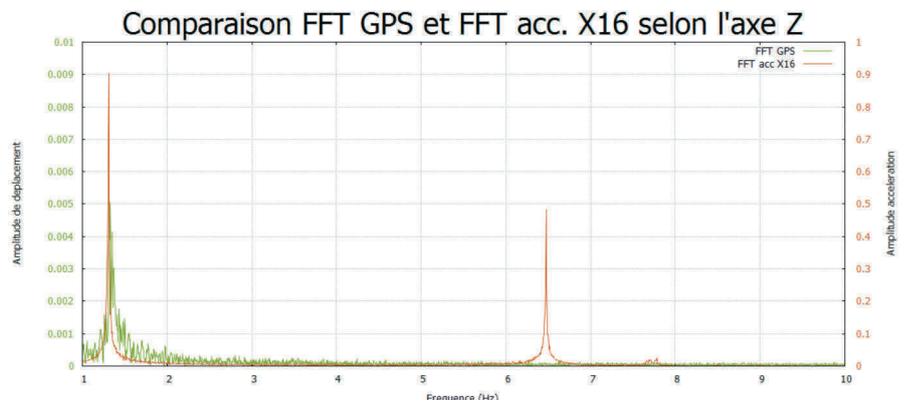


Figure 6. FFT GPS et accéléromètre X16 : mouvement vertical

suite du traitement des deux instruments ont permis d'effectuer des comparaisons en amplitude. Ainsi l'une des premières constatations qui a pu être faite est que les déplacements obtenus grâce à l'utilisation de l'algorithme de reconstruction des déplacements sur les données accélérométriques permettent de retrouver les amplitudes initiales imposées à la poutre. Un écart de seulement 5 % est observé par rapport aux mesures GNSS (voir Tableau 2).

Une représentation 3D de trois périodes d'oscillations du récepteur GNSS est représentée sur la Figure 5 lors d'un mouvement transitoire vertical. Il est

alors possible d'observer que le mouvement se fait principalement dans le plan xOz de la structure. Il s'agit d'une combinaison de translation et de rotation de la poutre qui se comporte comme un solide rigide sur le mode de vibration fondamentale du pylône.

Si une analyse fréquentielle est effectuée, les transformées de Fourier (FFT) calculées à partir des séries temporelles permettent d'identifier certains pics de fréquence associés aux modes propres de la structure. Si l'on s'intéresse aux mouvements verticaux, le récepteur GNSS permet d'identifier un pic à 1,33 Hz (voir Figure 6) en ayant effectué les mesures sur la structure initiale. Ce dernier correspond à la première fréquence propre du pylône qui est un mode de flexion dans le plan de la structure. Avec la nouvelle structure, un pic inférieur à 1 Hz est observable.

Avec les accéléromètres, il est possible d'identifier un pic supplémentaire à une fréquence de 6,48 Hz, comme l'illustre la Figure 6. Ce dernier correspond probablement au premier mode propre de

Amplitude GPS (m)	Amplitude Acc X16 (m)	Écart (m)	% d'erreur
0,24	0,23	0,01	4,2
0,29	0,30	0,01	3,4
0,32	0,31	0,01	3,1
0,27	0,26	0,01	3,7
0,25	0,24	0,01	4,0

Tableau 2. Comparaison des amplitudes initiales



la poutre dont la fréquence théorique est de 7.2 Hz. Cet écart peut s'expliquer par la position de la masse mobile sur la poutre et par l'ajout de la masse du récepteur GNSS. L'absence de ce pic sur les spectres GNSS s'explique par la faible fréquence d'acquisition des récepteurs bien qu'ils soient en théorie capable d'identifier les fréquences jusqu'à 10 Hz selon le théorème de Shannon.

Lors de la manipulation de l'excitation harmonique de la structure à l'aide du balourd, la fréquence d'excitation a été amenée manuellement sur les fréquences de résonances de la structure. La première courbe de la *Figure 7* issue d'un accéléromètre permet d'observer trois parties. Les deux premières correspondent à la réponse du pylône sur ses deux premiers modes et la troisième à la réponse de la poutre. La deuxième courbe représente l'application de l'algorithme de reconstruction de déplacement sur le signal de la première courbe. La comparaison de l'allure des courbes permet de montrer que celui-ci est capable de gérer les variations rapides d'amplitude.

Si l'on observe les séries temporelles correspondantes issues des mesures GNSS, il est possible de constater que la réponse du pylône est bien identifiée contrairement à la réponse de la poutre dont la fréquence est trop élevée pour être mesurée par cet instrument.

Une excitation quasi-statique suivie de vibrations libres a également été appliquée manuellement. On peut constater, comme l'illustre la *Figure 8*, que les déplacements déduits de l'accéléromètre sont mal reconstruits aux basses fréquences dans la phase d'excitation. Cela peut s'expliquer par la perte d'informations due à l'application de l'algorithme de reconstruction qui se comporte comme un filtre passe-haut. On peut ainsi observer expérimentalement la présence d'une fréquence de coupure qu'il est possible de déterminer par simulation numérique.

Enfin, dans le cadre d'un projet de recherche réalisé par des étudiants de l'ENSG, des mesures ont été effectuées sur le pont suspendu de Manosque. Ces essais ont permis d'identifier les

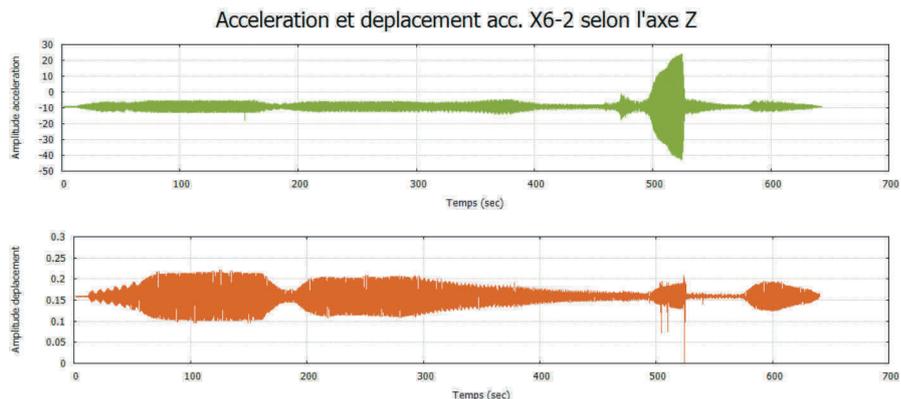


Figure 7. Série temporelle accéléromètre X16 (accélération et déplacement)

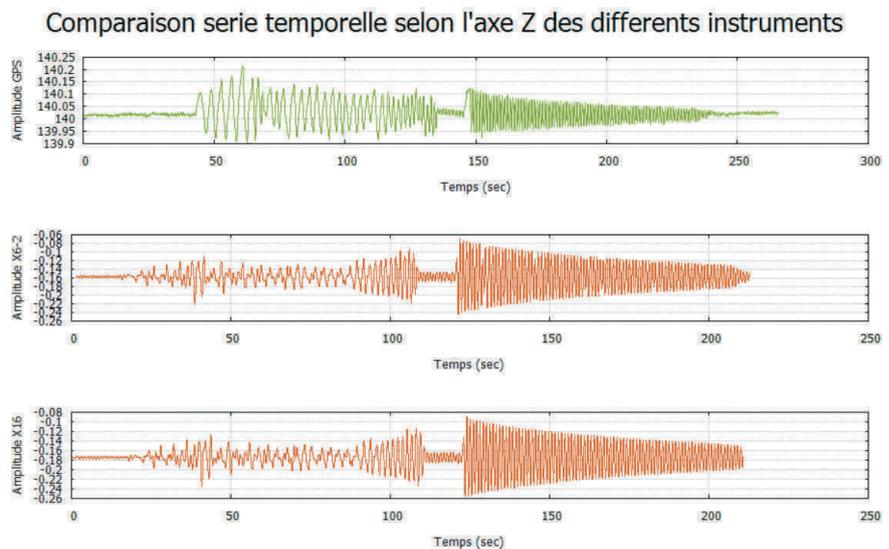


Figure 8. Série temporelle de déplacement selon Z des différents instruments utilisés : cas excitation quasi statique suivie de vibrations libres

fréquences propres du pont qui, comme on peut s'y attendre pour un pont suspendu, sont faibles. Des fréquences de 0.4 et 0.55 Hz ont été trouvées. Des essais de détection du trafic routier ont également été effectués. Ils ont montré que des récepteurs GNSS à 20 Hz étaient capables de détecter des déplacements du pont induits par le passage de véhicules.

## Conclusion et perspectives

Une synthèse des connaissances actuelles sur l'utilisation des systèmes de positionnement par satellites dans le cadre de la surveillance structurale d'ouvrages d'art a permis de mettre en avant les principaux avantages de cette technique ainsi que de montrer comment elle pouvait être mise en œuvre de manière autonome ou de

manière combinée avec d'autres types d'instrumentation.

L'analyse des résultats issus du traitement des données acquises lors des essais présentés dans cet article a permis d'évaluer les performances respectives des deux capteurs et d'étudier leur complémentarité. Leur utilisation conjointe permet de réaliser le suivi de changement de géométrie des structures dans le cadre de leur surveillance à long terme. Les expériences menées ont ainsi montré que le récepteur GNSS est capable d'effectuer un suivi dynamique des déplacements de la structure, cependant, bien qu'ayant une fréquence d'acquisition pouvant atteindre 100 Hz aujourd'hui, cet instrument reste limité par l'amplitude de déplacement lorsque le système est plus raide et que la fréquence est plus élevée. Son principal





avantage reste sa capacité à réaliser des mesures en statique avec une grande stabilité dans le temps, ce qui a permis par exemple de déterminer des amplitudes initiales de l'ordre de 10 cm des mouvements appliqués à la structure considérée. L'accéléromètre, quant à lui, permet d'obtenir des résultats dans une gamme de fréquences étendue ainsi que des petits déplacements du fait de sa fréquence d'acquisition élevée et de sa bonne sensibilité.

Les résultats qui ont été obtenus mettent en évidence deux manières possibles d'utiliser les données issues de ces capteurs : soit une utilisation de manière séparée en utilisant par exemple le récepteur GNSS pour l'analyse des phénomènes lents et l'accéléromètre pour la partie dynamique, soit en effectuant une fusion des données.

Ainsi, les perspectives de cette étude sont principalement la comparaison des résultats avec un récepteur à 100 Hz. En effet, il serait intéressant de réaliser des acquisitions avec ce type de récepteur afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux obtenus à l'aide d'un récepteur SP80 à une fréquence d'acquisition de 20 Hz. Cette expérience est envisageable car nous avons observé qu'il était possible de réaliser les traitements avec RTKLIB et d'obtenir des résultats à 100 Hz même en utilisant une base échantillonnée à 20 Hz. Une option pour le rééchantillonnage de la base est disponible sous RTKLIB.

Cependant, les résultats issus d'un récepteur GNSS à une fréquence d'acquisition de 100 Hz resteront conditionnés par l'amplitude de déplacement associée aux modes propres que l'on souhaite observer. Ainsi, le mode propre de la poutre à environ 6 Hz, d'une amplitude de 2 mm ne pourra être détectée ni avec un récepteur GNSS à 20 Hz ni avec celui à 100 Hz.

D'autres actions plus complexes pourront être réalisées comme par exemple la mise en place de la synchronisation des données afin de pouvoir plus facilement les comparer ou encore l'étude des différentes possibilités de fusion des données préalablement synchronisées. ●

## Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier les laboratoires SDOA et LISIS de l'IFSTTAR, ainsi que le DPTS de l'ENSG pour tous les moyens mis à disposition dans le cadre de cette étude.

## Contact

**Camille FAVRE**  
camillefavre92@gmail.com

## Références

- [Psimoulis et al., 2008] Psimoulis P., Pytharouli S., Karambalis D. and Stiros S. (2008). *Potential of global positioning system (GPS) to measure frequencies of oscillations of engineering structures*. Journal of Sound and Vibration, 318 : 606-623.
- [Lee et al., 2010] Lee H. S., Hong Y. H. and Park H. W. (2010). *Design of an FIR filter for the displacement reconstruction using measured acceleration in low-frequency dominant structures*. International Journal for Numerical methods in Engineering.
- [Im et al., 2013] Im, S. B., Hurlebaus, S., and Kang, Y. J. (2013). *Summary review of gps technology for structural health monitoring*. Journal of structural engineering.

## ABSTRACT

*Today, Structural Health Monitoring is a major challenge for the structural security and safety. Indeed, the requirements for structures such as bridges have changed: vehicles are faster, heavier and using the bridges more frequently. The global navigation satellite system's (GNSS) development and especially the European system Galileo have features that can be very interesting for structural monitoring. A synthesis of the current knowledge shows that the GNSS system integration among the conventional monitoring methods is possible and very interesting. Experiences were conducted in order to study the complementarity between GPS and accelerometer which is an interesting couple. The results highlight not only the qualities and defects of each sensor but also the possibility to have a set of complementary information in using them jointly.*

## COMITÉ DE LECTURE D'XYZ

- BAILLY André**,  
ingénieur, Paris
- BOTTON Serge**,  
ingénieur, ENSG Marne-la-Vallée
- CHRISMAN Nicholas**,  
rédacteur, Sciences géographiques (États-Unis)
- DUQUENNE Françoise**,  
ingénieur général des Ponts honoraire, Saint-Mandé
- DURAND Stéphane**,  
maître de conférences à l'ESGT
- FLACELIÈRE Bernard**,  
ingénieur topographe, Pau
- GRUSSENMEYER Pierre**,  
professeur des universités, INSA Strasbourg
- HULLO Jean-François**,  
Dr.-Ing., ingénieur de recherche, EDF R&D, Clamart
- KASSER Michel**,  
professeur des universités, HEIG-VD (Suisse)
- KOEHL Mathieu**,  
maître de conférences, INSA Strasbourg
- LANDES Tania**,  
maître de conférences, INSA Strasbourg
- MAILLARD Jean-Pierre**,  
géomètre-expert foncier, Marne-la-Vallée
- MAINAUD DURAND Hélène**,  
ingénieur topographe, CERN Genève
- MISSIAEN Dominique**,  
ingénieur topographe, CERN Genève
- MOREL Laurent**,  
maître de conférences, ESGT Le Mans
- NATCHITZ Emmanuel**,  
ingénieur, EIVP Paris
- PANTAZIS N. Dimos**,  
professeur, TEI Athènes
- POLIDORI Laurent**,  
directeur du CESBIO, Toulouse
- REIS Olivier**, ingénieur,  
traducteur Sarreguemines
- ROCHE Stéphane**,  
professeur, Université Laval (Québec)
- TROUILLET Michel**,  
ingénieur topographe, Lyon
- VINCENT Robert**,  
ingénieur, Paris