

## **Auscultation des grands ouvrages d'art par une technique du système GPS**

Martin Talbot, ing. Ph. D., Direction des structures, ministère des Transports.

### **RÉSUMÉ**

Nous présentons les résultats provenant de l'application d'une technique GPS pour le calcul des déplacements en 3 dimensions (verticaux, transversaux et longitudinaux) dus aux charges vives. Le cas étudié est celui du pont de l'île d'Orléans pour lequel nous n'avions à ce jour aucune valeur en déplacements. L'essai a fait appel à trois camions pesés de sorte que la charge appliquée était parfaitement connue. La précision de ces mesures est de l'ordre de 6 mm ce qui peut être considéré comme remarquable pour cette technique. Nous montrons aussi que le signal GPS peut être traité dans le domaine fréquentiel (FFT) pour donner les premières fréquences en flexion et en torsion du pont. Les résultats GPS obtenus se comparent très bien à ceux du modèle par éléments finis 3D et ce, tant pour les déplacements que pour les fréquences.

### **MESURES DE DÉPLACEMENTS DANS UNE STRUCTURE**

Parmi les outils couramment employés pour l'auscultation des ponts, nous avons les accéléromètres et les jauges de déformation. Une autre mesure intéressante, simple d'interprétation et dépendant seulement de la rigidité globale, est celle du déplacement d'un point de l'ouvrage sous chargement connu.

La mesure des déplacements est cependant une mesure difficile voire impossible à obtenir directement pour les très grands ouvrages. En effet, par exemple, les LVDT sont inutilisables compte tenu de la hauteur de l'ouvrage (et de la profondeur de l'eau et de la présence de courants). Plus récemment, l'introduction des inclinomètres de précision a permis une mesure indirecte des flèches d'un ouvrage (il faut intégrer les angles de manière à estimer une flèche). Lorsque l'ouvrage est de grandes dimensions, l'installation d'un nombre suffisant d'inclinomètres peut représenter un travail difficile à réaliser.

### **LE SYSTÈME GPS**

Le système GPS fût d'abord mis au point par l'armée américaine dans les années 1970 (le premier satellite GPS fût lancé en 1978). Puis, une seconde génération de satellite fût lancé à partir de 1989 (Block II). Le système actuel est devenu pleinement opérationnel en 1995 et consiste en 24 « Block II Satellites » tournant en orbite à 11,000 milles nautiques (20,200 km) autour de la terre (figure 1.a). Aujourd'hui, le système GPS est accessible au grand public et ce, avec une précision accrue depuis le 2 mai 2000, date à laquelle la S/A pour « Selective availability » (qui induisait une dégradation intentionnelle de la précision du signal) imposée par le US Department of Defense a été supprimée.

Au cours de ces dernières années, de nombreuses applications, basées sur l'utilisation des signaux GPS ont vu le jour. Dans le cas de notre étude, nous pouvons obtenir une grande précision par un post-traitement numérique (en jouant sur les différences de phases et en considérant un point de référence connu et immobile) tel que dans l'étude de Nakamura (2000). L'approche GPS est avantageuse car les récepteurs sont faciles à installer et à

déplacer et de plus ils se trouvent couramment sur le marché (ils peuvent même être loués). Ils donnent aussi les déplacements en 3-D, c'est-à-dire dans les trois directions x, y et z (longitudinale, transversale et verticale).

## MESURES DES DÉPLACEMENTS PAR UNE TECHNIQUE GPS

Les tests ont eu lieu le 27 juin 2001 par une chaude soirée estivale (avec une température de près de 30 C<sup>0</sup>) qui pouvait être considérée comme idéale pour une test de chargement statique sur une structure aussi flexible puisqu'il n'y avait pratiquement pas de vent. Nous avons procédé à l'installation de sept récepteurs GPS (deux au centre de chaque travée (figure 2.b) et un comme référence au sol sur la rive nord (figure 1.b et figure 2.a). Un système de signalisation a dû être prévu pour la fermeture de l'ouvrage à intervalle régulier au cours de la soirée.

La circulation était d'abord arrêté quelques minutes à chaque test. Après que la structure ait cessé de vibrer, nous procédions alors au passage d'une configuration choisie de camions passant seul sur le pont. Un exemple de passage quasi statique de 3 camions 10 roues chargés et pesés de 27 000 kg est donné à la figure 2.c.

Pour chacun des 7 récepteurs, la fréquence d'échantillonnage était de 5 mesures par seconde. C'est plus de 43000 valeurs pour chaque direction (x, y, et z) et pour chaque récepteurs de 20h24 à 22h48 qui ont ainsi été recueillies. Des exemples de données pour le récepteur 3 apparaissent aux figures 4.a et 4.b. La précision de ces mesures est estimée à  $\pm 0,006\text{m}$ . On peut d'ailleurs visualiser cette précision à la figure 6 où un zoom des valeurs montre bien l'amplitude de la variation. Les résultats expérimentaux sont comparés à ceux du modèle par éléments finis 3-D non linéaire dont un exemple de calcul de déformée est donné à la figure 3 pour le cas de trois camions pesés dans une même voie.

Le test #1 qui est un test de chargement symétrique avec 2 camions côte à côte suivi d'un camion roulant sur la ligne du centre. Ce test avait pour but de quantifier le comportement 2-D de l'ouvrage. Si on examine les valeurs du récepteur 3, situé au centre du pont, on obtient une remontée du tablier lorsque les camions sont en travée d'approche de 0,093 m (et de 0,1003 m pour le modèle par éléments finis) et une descente (la flèche centrale maximale) de -0,356 m (et de -0,355 m pour le modèle). Ce test #1 est visible à la figure 4.a aux environs de 900 secondes (à 4500 lectures de 0,2 s).

Le test le plus critique en terme de distorsion de l'ouvrage a été le test # 3 avec 3 camions circulant l'un derrière l'autre dans la même voie induisant donc de la flexion et de la torsion transversale. Les résultats en déplacements sont résumés dans le tableau suivant :

mouvement	Expérimental (m)	Modèle 3-D (m)	Figure
Vertical	0,490	0,568	Figure 5 et 6
Transversal	0,093	0,115	Figure 7
longitudinal	0,080	0,071	Figure 8

Les déplacements donnés sont la différence entre les extremum soit le point le plus haut moins le point le plus bas lors du mouvement du récepteur 3. Encore une fois, les résultats sont bons dans la limite de la précision de cette approche. Le modèle est un peu plus flexible que la réalité comme c'était d'ailleurs le cas pour les jauges et pour les accéléromètres (Talbot, 2002). Enfin, il aurait été aussi possible de réduire l'imprécision des valeurs expérimentales (visible à la figure 6) en effectuant des tests vraiment statiques avec positions d'arrêt de plusieurs minutes de manière à faire une moyenne de quelques centaines de points par position.

## **ANALYSE MODALE PAR GPS**

Bien que cela n'ait pas été prévu à l'origine, on a tenté d'appliquer la technique appelée analyse modale au signal mesuré de la réponse de la structure pour caractériser l'ouvrage en termes de modes de vibration. On a choisi ici l'exemple des deux récepteurs 3 et 4 situés au centre du pont. On peut établir les valeurs des fréquences de vibration en déterminant les fréquences pour lesquelles l'énergie du signal obtenu de chaque récepteur atteint un maximum. La représentation des fréquences d'un signal est obtenue en calculant la transformée de Fourier rapide (FFT pour *Fast Fourier Transform*) de celui-ci. Le module de cette fonction constituée de nombres complexes est appelé le spectre du signal et représente la distribution de l'énergie du signal en fonction de la fréquence. Le graphique obtenu s'appelle la densité spectrale de puissance (PSD pour *Power spectral density*, figures 9 et 10). On peut donc déterminer les fréquences excitées de la structure en repérant les pics de valeurs maximales d'énergie ou pics de la FFT.

Pour s'assurer de l'authenticité des fréquences identifiées, on a utilisé une approche basée sur les fonctions de réponses en fréquences (FRF). Après calcul, l'approche fournit deux fonctions utiles dont une fonction dite de cohérence. Pour une fréquence donnée, une valeur élevée de la fonction de cohérence ( $> 0,8$ ) nous assure que celle-ci est bel et bien une fréquence de vibration de l'ouvrage. En effet, par définition, pour un mode de vibration, les accélérations de deux points demeurent en tout temps dans un rapport constant, ce qui établit une relation linéaire (une cohérence) entre les signaux des accélérations de ces deux points.

Une autre fonction dite de phase du spectre croisé permet de spécifier si le mouvement du point considéré est en phase ( $0 \pm 20$  degrés) ou déphasé ( $180 \pm 20$  degrés) par rapport au mouvement du point de référence. Dans le cas présent, une phase de près de 0 degré signifie un mouvement en phase dans le plan, soit un mode de flexion, et une phase de près de 180 degrés signifie un mouvement en phase opposé dans le plan, soit un mode de torsion.

Lors des tests, la fréquence d'échantillonnage était de 5 lectures de déplacements par seconde. Nous avons sélectionnés les 32 768 premières valeurs de la série d'essais (soit  $2^{15}$  valeurs). Comme on l'a dit précédemment, la figure 9 montre un exemple de fonctions de réponses en fréquences (FRF) pour le mouvement vertical des récepteurs 3 et 4 (dans le cas présent pour un signal découpé en 16 signaux, puis moyenné). On y voit clairement des pics (en PSD avec une cohérence voisine de un et une phase près de zéro)

de modes de vibrations, soit deux modes de flexion de 0,293 et 0,588 Hz. Les valeurs par éléments finis donnent 0,287 et 0,539 Hz.

De la même manière, mais cette fois pour le déplacement transversal horizontal, nous avons pu identifier un mode de torsion transversale de 0,194 Hz correspondant au mode par éléments finis de 0,172 Hz à partir des déplacements transversaux (figure 10). Pour toutes ces fréquences identifiées, des phases de moins de 3 degrés et des cohérences de plus de 0,95 ont été observées ce qui confirme la netteté des résultats. Il est à noter que nous aurions certainement pu améliorer nos résultats dynamiques (en termes de nombre de modes identifiés) en utilisant un échantillonnage de 10 lectures par seconde (ce que nous n'avons pas fait par manque de mémoire de nos récepteurs) et en effectuant des passages plus rapides et donc plus dynamiques de camions plutôt que des passages quasi statiques.

## **CONCLUSION**

Les résultats obtenus lors de cette série de mesures ont permis de démontrer la pertinence d'utiliser une technique de type GPS pour mesurer les déformations d'un grand ouvrage d'art. Cette approche est particulièrement intéressante pour les cas où la configuration de celui-ci ne permet pas de mesurer les déplacements par une technique conventionnelle et que l'ouvrage démontre bien sûr une flexibilité assez importante pour qu'une précision de quelques millimètres suffise. Les résultats obtenus sont en effet très proches de ceux provenant du modèle 3-D par éléments finis non linéaire.

Nous avons aussi démontré qu'il était possible de mesurer certaines fréquences des modes de vibrations de la structure, ce qui est, en soi, assez remarquable. L'approche GPS est aussi tout à fait indiquée pour faire de la télésurveillance de structures flexibles. C'est d'ailleurs en ce sens que vont actuellement les quelques travaux répertoriés dans la littérature.

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier les nombreuses personnes concernées de la Direction territoriale de Québec (notamment Christian Lagacé, a.-g pour la collecte des données) et de la Direction des structures pour leur étroite collaboration dans toutes les étapes de ce grand dossier.

## **RÉFÉRENCES**

Ashkenazi, V., Roberts, G.W. (1997) « Experimental monitoring of the Humber bridge using GPS. » *Proc. Instn civ. Engrs, Civil Engineering*, vol. 120, 177-182.

Duff, K., Hyzak, M. (1997). « Structural Monitoring with GPS. » *Public Roads*, Spring 1997, 39-44.

Lamoureux, L., Santerre, R. (1997). « Mesure des déformations du pont Laporte par GPS. » *Géomatique*, Vol. 24, no. 1, 19-21.

Nakamura, S.-I. (2000). « GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements. » *Journal of structural engineering, ASCE*, Vol. 126, No. 12, 1413-1419.

Talbot, M. (2002). « Méthodes expérimentales et numériques utilisées pour l'évaluation du pont suspendu de l'Île d'Orléans. » *4e Conférence spécialisée en génie des structures de la Société canadienne de génie civil*, Montréal, Québec, Canada.

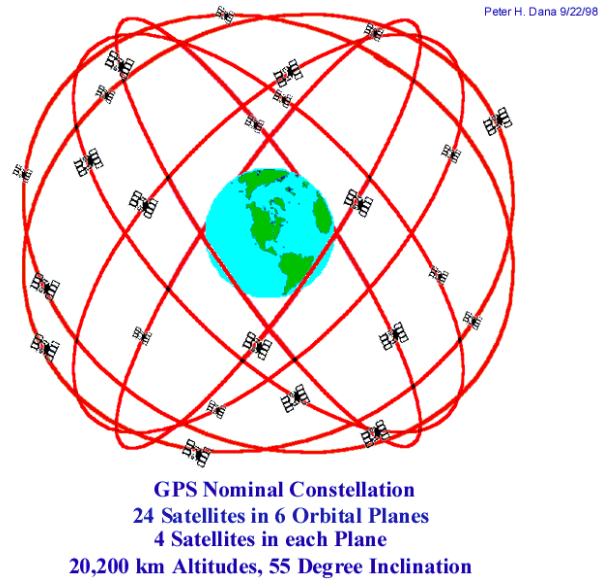


Figure 1.a : Réseau des 24 satellites GPS.

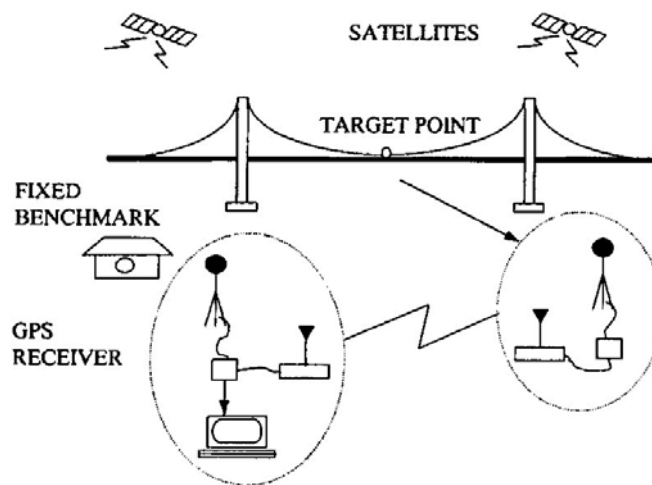


Figure 1.b : Schéma d'installation des Récepteurs (tiré de Nakamura, 2000).



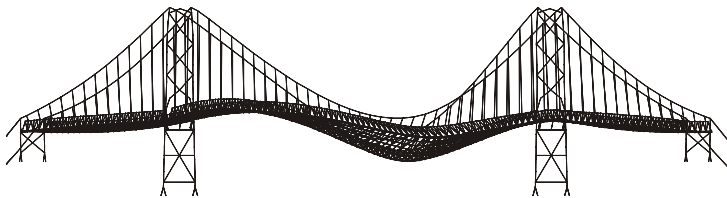
Figure 2.a : Installation du récepteur de référence.



Figure 2.b : Récepteur sur le pont.



Figure 2.c : Passage du chargement de 3 camions pesés.



**Structure :**

-Longueur totale : 722 m (d'un ancrage à l'autre)

-Travées : 127m ; 323m ; 127m

**Modèle :**

-2630 nœuds

-5338 éléments (câbles, membrures, dalle)

-14996 équations (degrés de liberté)

Figure 3 : Maillage par éléments finis déformés sous la charge des trois camions pesés dans une même voie.

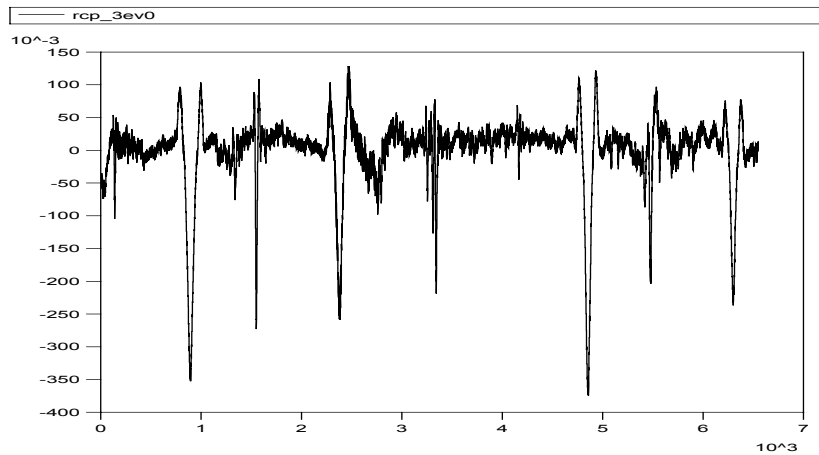


Figure 4.a : mesure du déplacement vertical (en mètres) par le récepteur 3 au centre du pont en fonction du temps (ici en secondes) pour l'ensemble des tests effectués.

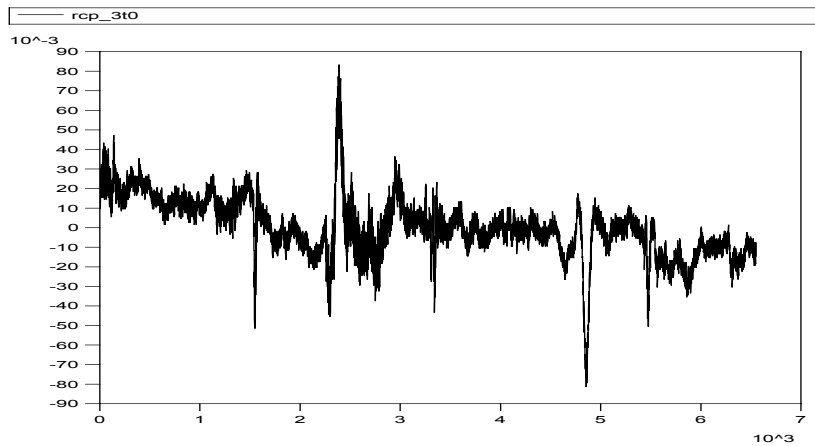


Figure 4.b : mesure du déplacement transversal (horizontal en m) par le récepteur 3 au centre du pont en fonction du temps (ici en secondes) pour tous les tests effectués.

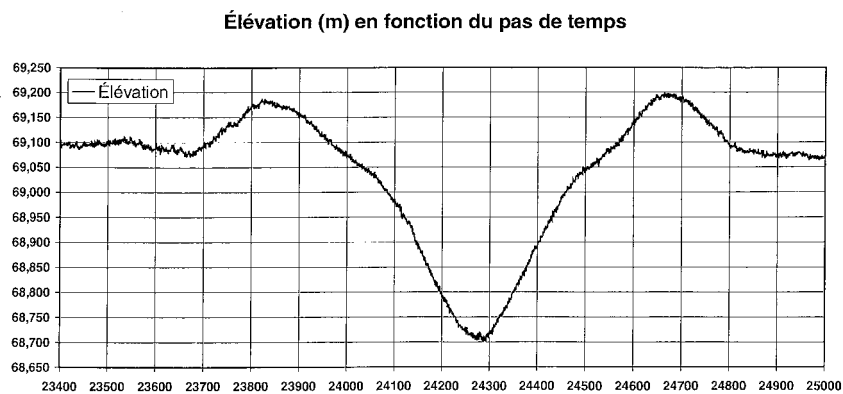


Figure 5 : mesure de l'élévation par le récepteur 3 au centre du pont (déplacement vertical en m) en fonction du pas de temps pour le test #3 avec 3 camions dans une seule voie.

Élévation (m) en fonction du pas de temps (1 pas=0,2 s)

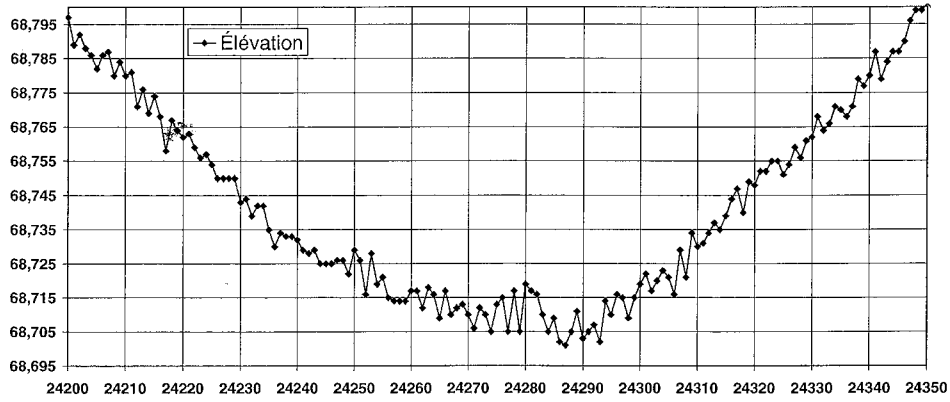


Figure 6 : mesure de l'élévation par le récepteur 3 au centre du pont (déplacement vertical en m) en fonction du pas de temps pour le test #3 avec 3 camions dans une voie : détail des variations de l'imprécision dans la zone d'un extremum.

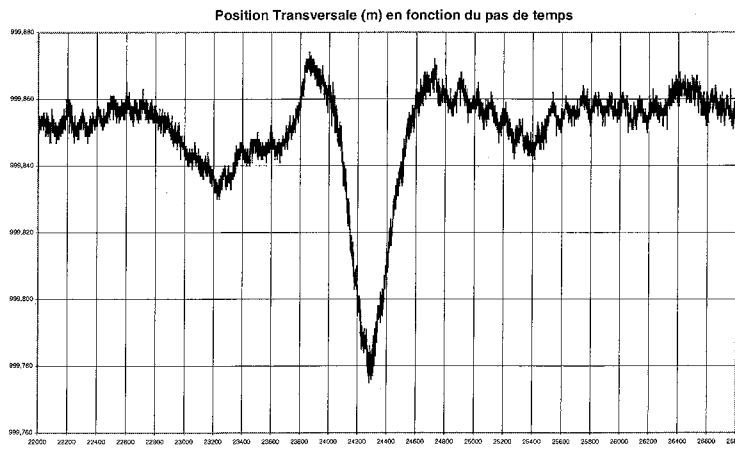


Figure 7 : mesure de la position transversale par le récepteur 3 au centre du pont (déplacement horizontal en m) en fonction du pas de temps pour le test #3 avec 3 camions dans une voie.

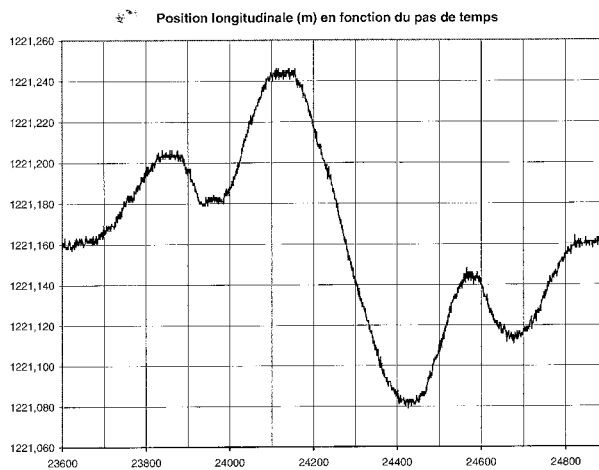


Figure 8 : mesure de la position longitudinale par le récepteur 3 au centre du pont (déplacement horizontal en m) en fonction du pas de temps pour le test #3 avec 3 camions dans une voie.



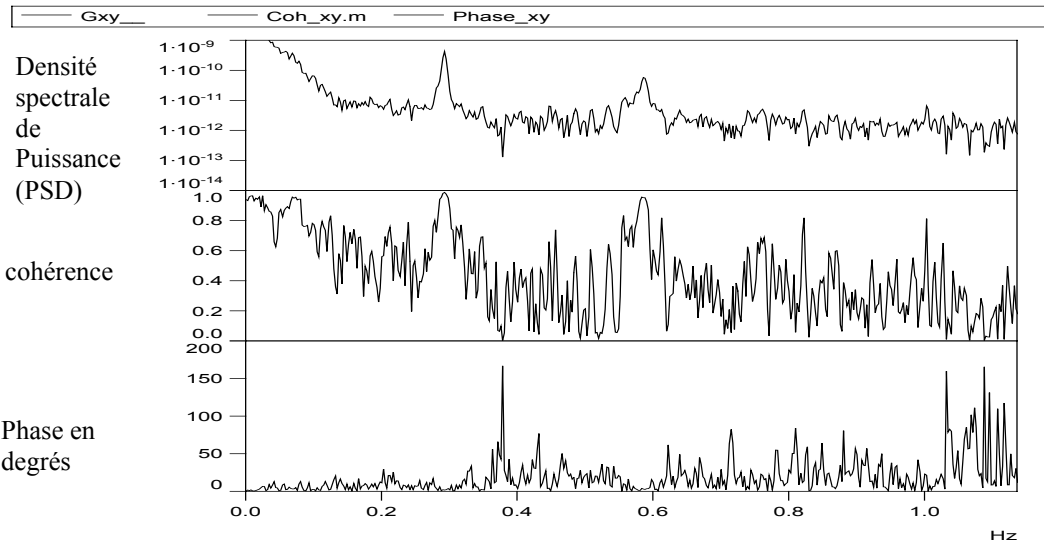


Figure 9: Fonctions de réponses en fréquences (FRF) pour les déplacements verticaux des récepteurs 3 et 4 au centre du pont (signal découpé en 16).

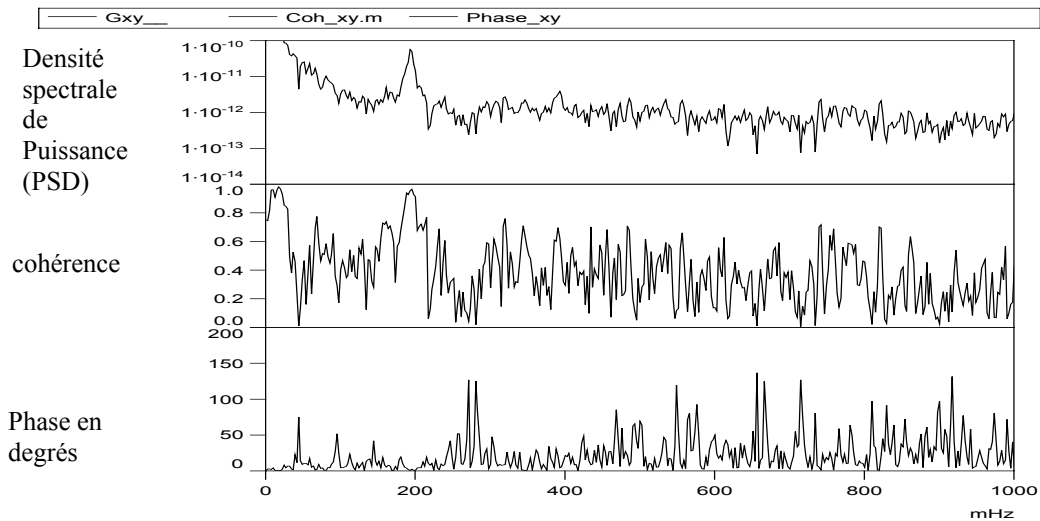


Figure 10 : Fonctions de réponses en fréquences (FRF) pour les déplacements transversaux des récepteurs 3 et 4 au centre du pont (signal découpé en 16).