

## AUSCULTATION DU PONT DE NORMANDIE PAR GPS

*Pascal BRION*

*Géomètre Topographe GPS (TECHMATION)*

### INTRODUCTION

Réalisée le 7 janvier 1995 l'auscultation du pont de Normandie par G.P.S. avait pour objet de mesurer les déformations du tablier central de l'ouvrage maintenu par des haubans en faisant intervenir 80 camions maximum d'une masse de 15 tonnes chacun. Le principe étant de charger le pont avec deux types de chargement, charges globales et charges semi locales.



**LE PONT**

### Caractéristiques

Avec ses 2141 mètres d'une butée à l'autre, ce géant reliera Le Havre à Honfleur, effaçant le record pourtant prestigieux de son ancêtre, le pont de Tancarville, inauguré en 1959 (l' "ancêtre" mesure tout de même 1 410 m...). On traversera l'estuaire de la Seine comme on saute un ruisseau, sans se douter que le pont de Normandie, avec sa portée centrale de 856 m, est le plus grand ouvrage à haubans du monde. Commencée en 1988, la construction du pont de Normandie défie les lois de la physique. Les deux immenses pylônes qui portent le tablier métallique à 52 m au-dessus du niveau de l'eau sont hauts de 214 m.

### Contraintes

Au XIXe siècle, les premiers ponts suspendus étaient encore fragiles et beaucoup s'effondraient quelques années après leur inauguration. Pour remédier à cette fragilité et réduire la flexion qui s'exerce surtout longitudinalement, les architectes eurent l'idée de tendre des haubans (câbles d'acier) des pylônes au tablier ; ils venaient de réinventer le principe du pont de liane. Le Bay Bridge qui enjambe la baie de San Francisco a été conçu selon ce principe mais certaines de ses piles reposent sur une île, ce qui facilite son ancrage. Dans l'estuaire de la Seine, il n'y a pas le moindre îlot sur lequel s'appuyer : il a donc fallu se contenter de deux appuis.

### Le vent

Des études informatiques ont été nécessaires afin de calculer les effets des forces physiques, des charges et du vent (le vent est l'ennemi des ponts suspendus). L'estuaire de la Seine est régulièrement balayé par des vents à dominantes ouest/sud-ouest, dont les rafales ont déjà atteint 180 km/h.

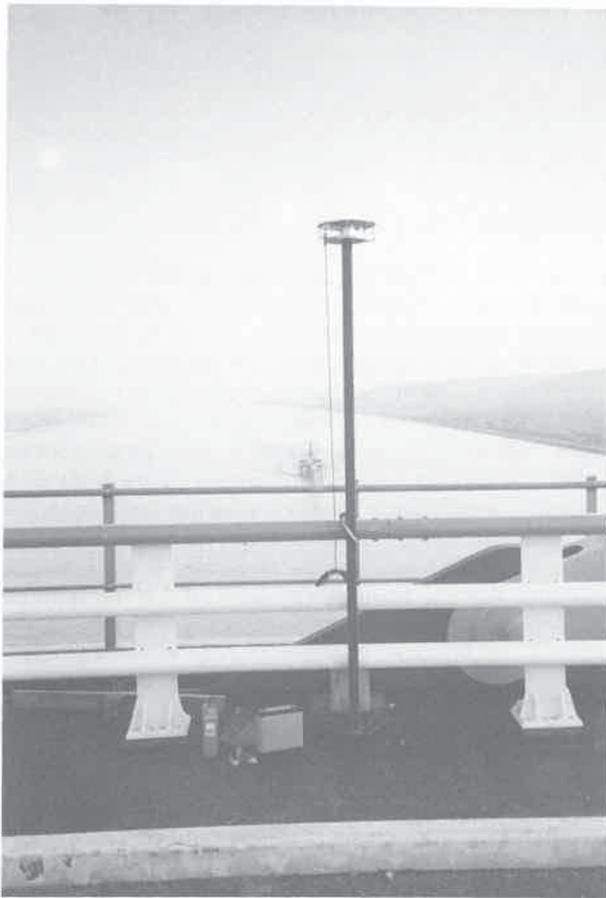
Le vent «moyen» capable de souffler consécutivement pendant plusieurs minutes génère des balancements sur la structure, auxquels s'ajoutent des turbulences liées à de puissantes rafales de quelques secondes.

Par souci de sécurité, les ingénieurs ont retenu pour leurs calculs, des hypothèses extrêmes égales à plus de 2 fois les effets d'un vent «centenaire» et de ses rafales. Tous les choix structurels du pont de Normandie ont pour objectif de réduire l'emprise du vent, grâce à un meilleur aérodynamisme. Le tablier, très profilé, a subi une longue série de tests en soufflerie ce qui permet au pont de Normandie de supporter des vents de plus de 250 km/heure. A l'inverse d'une aile d'avion qui se sert des masses d'air (portance) pour prendre de l'altitude, le tablier du pont de Normandie profite du passage du vent pour parfaire sa stabilité !

Pour éviter que les haubans ne s'entrechoquent, un système de câbles transversaux appelés «aiguilles» amortit et réduit leurs mouvements. Le dispositif est complété par des amortisseurs situés à la base de chaque hauban. Six ans ont été nécessaires pour construire cet ouvrage d'art dont la silhouette évoque, avec ses gréments d'acier, un gigantesque vaisseau immobile.

## POURQUOI LE G.P.S. ?

### Situation des antennes G.P.S.



Les antennes G.P.S. situées sur le côté Est du tablier sont fixées sur des mâts métalliques à centrage foré dédiés à ce genre de mesures. Les mâts ont une hauteur de 2.30 mètres afin que les camions ne viennent pas masquer la réception des messages des satellites lors des mesures en charge. La présence des haubans n'est pas considérée comme un masque important car ils sont fins et espacés. Les points des piles sont fixés sur la bordure en béton ainsi que le point d'appui de la rive droite, l'autre point d'appui de la rive gauche est sur un plot en béton avec un système de centrage forcé.

### Avantages

L'avantage du G.P.S. pour un tel contrôle s'avère plus facile à mettre en œuvre que des méthodes classiques. Les conditions météo requises pour les essais en charge sont limitées à un vent de 15 m/s, ce qui risque d'amener de la brume. Cette brume locale est un inconvénient majeur pour les mesures par des méthodes classiques type optomécanique, car les visées se réduisent, et la distinction des cibles et des voyants devient difficile. Les mesures classiques permettent d'effectuer des mesures tridimensionnelles en deux temps ; c'est une opération «2 + 1» pour désigner les coordonnées X et Y de la planimétrie puis l'altimétrie Z. Ce qui augmente le nombre d'intervenants par rapport aux mesures G.P.S. qui donnent les coordonnées X, Y et Z avec la même précision +/- 5mm

### Auscultation

Le suivi des déformations est assuré par 9 récepteurs G.P.S. Géodésique ASHTECH type Z-12 et M-12 avec deux points fixes positionnés sur des points extérieurs à l'ouvrage afin de nous assurer un référentiel exact qui ne subisse pas les déformations de l'ouvrage pendant les épreuves. La combinaison de 11 récepteurs permet de donner une surabondance de mesures par point, 55 vecteurs peuvent être calculés à chaque session. Les sessions d'observation sont d'une période de 15 minutes chacune (temps nécessaire pour que tous les intervenants aient la possibilité de faire leurs mesures respectives). A chaque session les récepteurs T1, T2, T3, T4, T5 et T6 sont mis en route au début et éteints à la fin de chaque observation. Les récepteurs placés sur les points P1 et P2 sont en enregistrement continu pendant toute la journée ainsi que les points placés en haut des piles et au centre du tablier (P0, Pile Nord et Pile Sud) afin de pouvoir restituer une dynamique des différentes déformations.

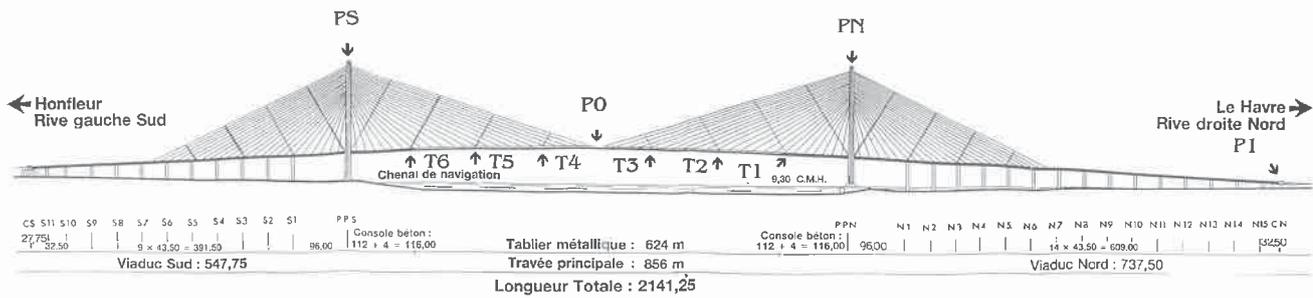
## INNOVATION

### Le centimètre temps réel

Sur les 11 récepteurs installés sur l'ouvrage deux récepteurs P0 et P1 sont équipés de l'option RT-PNAV qui permet de traiter les suivis de phases et de lever les ambiguïtés en temps réel sur les fréquences L1 et L2 avec le code P(Y). Ces deux récepteurs ont permis de visualiser en temps réel les déformations centimétriques du tablier central au point P0. Pour assurer la liaison entre les deux récepteurs P0 et P1 deux solutions étaient possibles : soit une liaison VHF soit une liaison par fibre optique. La liaison VHF n'a pas été retenue car les maîtres d'œuvre voulaient éviter des interférences avec les divers systèmes de mesures mis en œuvre lors des épreuves. La solution de liaison par fibre optique nous a donné entière satisfaction. Nous avons déroulé une fibre d'une longueur de 2 000 mètres le long du tablier. Les informations véhiculées dans la fibre étaient transmises à une vitesse de 9600 bd cela permettant d'alimenter en données de phase le récepteur P0 afin qu'il puisse calculer les ambiguïtés. Toutes les secondes le récepteur P0 donnait sa position au centimètre en X, Y et Z et il ne lui a fallu que 20 secondes avec 6 satellites pour résoudre les ambiguïtés de phase.

### CALCUL

Le bureau d'études avait fait un calcul de prédiction des déformations du pont tous les 107 mètres, là où nous avons positionné les antennes G.P.S. Les valeurs de déviation en altimétrie fournies par le maître d'œuvre se sont révélées exactes à quelques centimètres près en temps réel grâce au récepteur positionné au point P0. Après calcul les autres points sur le tablier s'avèrent être du même ordre de grandeur que les valeurs des points P0 obtenues lors des différentes épreuves. Des déplacements horizontaux de l'ordre de deux décimètres ont été enregistrés sur la pile Nord dans la direction du Sud mais avec un retour dans la position initiale, ce qui démontre bien la souplesse de l'ouvrage.



### CONCLUSION

La précision des mesures G.P.S. obtenue avec les récepteurs géodésiques ASHTECH s'adapte parfaitement à ce type d'auscultations, ainsi qu'à des mesures de même type. (Mesures tridimensionnelles millimétriques). La mise en œuvre et la méthode utilisée par

TECHMATION se sont révélées particulièrement efficaces dans la mise en œuvre et la souplesse d'exécution quelque soit les conditions météo et l'environnement. L'avenir est désormais ouvert à l'utilisation du G.P.S. comme moyen de mesures et de référence de 1er ordre, en post-traité ou en temps réel UPDGPS (Ultra Précis Différentiel G.P.S.).

RESULTATS  
Données G.P.S. et données du bureau d'études

|    |              | Charge 71  | Données B.E. | Charge 72  | Données B.E. | Charge 73  | Données B.E. | Charge 74  | Données B.E. | Charge 75  | Données B.E. | Charge 76  | Données B.E. |
|----|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| P0 | D Z          | 0,667      | 0,6353       | 0,19       | 0,141        | 0,68       | 0,6388       | 1,216      | 1,1482       | 1,267      | 1,2106       | 0,564      | 0,603        |
|    | Distance     | 0,00300167 |              | 0,01403567 |              | 0,01897367 |              | 0,00360555 |              | 0,00509902 |              | 0,03140064 |              |
|    | Gisement Gra | 195,757439 |              | 190,920852 |              | 159,033447 |              | 125,133184 |              | 25,1331837 |              | 20,3607712 |              |
| PN | D Z          | -0,008     |              | -0,007     |              | -0,016     |              | -0,013     |              | -0,013     |              | -0,01      |              |
|    | Distance     | 0,11029053 | 0,1053       | 0,09725225 | 0,1072       | 0,19266551 | 0,1853       | 0,2143945  | 0,2097       | 0,17847409 | 0,1809       | 0,0975141  |              |
|    | Gisement Gra | 190,75635  |              | 190,827574 |              | 189,41413  |              | 192,274861 |              | 190,71754  |              | 186,920027 |              |
| PS | D Z          | -0,005     |              | -0,008     |              | 0,009      |              | 0,007      |              | -0,019     |              | -0,021     |              |
|    | Distance     | 0,00538516 |              | 0,00824621 | 0,0032       | 0,00984886 | 0,027        | 0,00921954 |              | 0,01992486 |              | 0,021      |              |
|    | Gisement Gra | 48,4475762 |              | 31,1916518 |              | 53,2499757 |              | 90,2250998 |              | 38,9457075 |              | 0          |              |
| T1 | D Z          | 0,105      | 0,0788       | 0,186      | 0,13         | 0,224      | 0,1553       | 0,196      | 0,1325       | 0,072      | 0,0625       | 0,039      | 0,031        |
|    | Distance     | 0,01019804 |              | 0,00360555 |              | 0,02137756 |              | 0,00781025 |              | 0,01       |              | 0,004      |              |
|    | Gisement Gra | 174,866817 |              | 125,133184 |              | 176,034894 |              | 88,4568242 |              | 118,066894 |              | 100        |              |

|               | Largeur        | Longueur   | Charge totale | Densité de charge | PS | T6 | T5 | T4 | P0 | T3 | T2 | T1 | PN |
|---------------|----------------|------------|---------------|-------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Chargement 71 | Pleine 4 voies | 856 mètres | 1200 tonnes   | 1,4 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 72 | Pleine 4 voies | 428 mètres | 1200 tonnes   | 2,8 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 73 | Pleine 4 voies | 428 mètres | 1200 tonnes   | 2,8 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 74 | Pleine 4 voies | 428 mètres | 1200 tonnes   | 2,8 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 75 | Pleine 4 voies | 428 mètres | 1200 tonnes   | 2,8 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 76 | Demie 2 voies  | 428 mètres | 600 tonnes    | 1,4 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 77 | Pleine 4 voies | 60 mètres  | 180 tonnes    | 3,0 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 78 | Pleine 4 voies | 60 mètres  | 180 tonnes    | 3,0 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 79 | Pleine 4 voies | 60 mètres  | 180 tonnes    | 3,0 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |
| Chargement 80 | Pleine 4 voies | 60 mètres  | 180 tonnes    | 3,0 T/mètre       | S  |    |    |    |    |    |    |    | N  |